

THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE DE NANTES

ECOLE DOCTORALE N° 598
Sciences de la Mer et du littoral
Spécialité : *Géographie*

Par

Mathieu LE DEZ

Systeme expert et télédétection pour la cartographie des habitats

Apports et valorisations pour la conservation de la biodiversité de l'estuaire de la Loire

Thèse présentée et soutenue à Nantes, le 2 décembre 2021

Unité de recherche : UMR CNRS 6554 LETG Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique

Composition du Jury :

Rapporteurs :	Jean-Claude GÉGOUT Anne PUISSANT	Professeur, AgroParisTech Nancy Professeure, Université de Strasbourg (présidente du jury)
Examineurs :	Marie-Lise BENOT Jean-Baptiste FÉRET	Maître de conférences, Université de Bordeaux Chargé de recherche, INRAE Montpellier
Dir. de thèse :	Marc ROBIN	Professeur, Université de Nantes
Co-dir. de thèse :	Patrick LAUNEAU	Professeur, Université de Nantes
Invités :	Frédéric MORÉ Jérôme SAWTSCHUK	Responsable unité milieux naturels, Délégation Nantes, Conseil départemental de Loire-Atlantique Maître de conférences, Université de Brest

« Rien ne sert de courir, il faut partir à point »

Jean de la Fontaine
Le Lièvre et la Tortue

Remerciements

Mes remerciements s'adressent d'abord à mes deux directeurs de thèse, Marc Robin et Patrick Launeau. Je vous remercie de m'avoir accordé votre confiance, d'avoir accepté d'encadrer ce travail de doctorat et de m'avoir appris les fondements de la télédétection.

Je souhaite ensuite remercier Anne Puissant et Jean-Claude Gégout d'avoir accepté d'être les rapporteurs de ce manuscrit et d'évaluer mon travail de thèse. Je remercie également Marie-Lise Benot et Jean-Baptiste Féret pour leur participation à mon jury de thèse.

Je voudrais adresser mes remerciements à Stéphanie Trécant et Frédéric Moré pour avoir soutenu ce projet dès son origine et pour avoir permis le montage de cette thèse que j'ai pu réaliser dans de très bonnes conditions au Département de Loire-Atlantique. Une mention spéciale à Stéphanie : merci pour tes conseils, nos discussions et pour ta contribution à l'ambiance d'équipe dans le service. Je tiens également à remercier l'ensemble des collègues du service Aménagement pour leur accueil chaleureux et les bons moments passés durant ces trois années. Un grand merci à David, Jacques et Nico de l'unité Milieux Naturels pour votre bonne humeur et pour les différents échanges naturalistes passionnants !

Je souhaite également remercier Jérôme Sawtschuk pour m'avoir permis de débiter en recherche dès 2014. Merci pour ta contribution à l'initiation de ce projet et pour ta participation tout au long de la thèse.

Je tiens aussi à remercier Jan-Bernard Bouzillé pour sa promotion de l'utilisation des démarches d'analyses numériques des végétations à travers notamment la publication des ouvrages 'Gestion des habitats naturels et biodiversité' et 'Connaissance de la biodiversité végétale' qui ont inspirés ce projet. Merci également pour ton implication dans la thèse et pour les différents échanges que nous avons eus à Rennes et à Madrid. Je remercie également Sébastien Rapinel pour avoir participé à ces différentes discussions autour des méthodes de traitement des données de végétation et l'usage de la télédétection pour la cartographie des communautés végétales.

Je remercie Sylvie Magnanon et Laurence Hubert-Moy d'avoir accepté de faire partie de mon comité de suivi de thèse. Vos commentaires et vos conseils constructifs ont largement contribué à orienter et à améliorer ce travail.

Je veux remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné sur le terrain pour réaliser des relevés floristiques et phytosociologiques : en particulier Dominique Chagneau, Kévin Cianfaglione, Pauline Rolandeau. Un merci particulier, à toi, Hermann Guilton pour ta disponibilité et pour avoir partagé tes connaissances phytosociologiques des végétations de la région au cours des différents échanges enrichissants que nous avons eus sur le terrain et au bureau.

Merci également à Kristell Le Bot et Sylvain Cerisier pour votre collaboration à ce projet, pour le partage de vos savoirs sur l'estuaire de la Loire et pour la diffusion de nombreuses données du GIP Loire-Estuaire.

Merci aux chercheurs et doctorants du LETG que j'ai rencontrés au cours de ces 3 années de doctorat et avec lesquels j'ai pu échanger sur leurs expériences en télédétection et en géomatique. Un merci particulier à Morgane, Juliette et Romain pour votre accueil (éphémère) dans le bureau des doctorants de l'IGARUN.

Merci aux copains pour votre bienveillance et vos encouragements réguliers au cours de ces 3 années : Élo, Adrien, Alice, Sam, Jean-Marc, Romain, Kéké, Nadège, Amélie, Armel, Camille, Tramber, JB, Noémie...

Je souhaite remercier tout particulièrement mes parents, pour leurs encouragements et leur soutien tout au long de mes études et grâce à qui j'ai pu arriver jusqu'à la réalisation de ce doctorat. Merci aussi à l'ensemble de ma famille pour leur accueil toujours aussi chaleureux lors des séjours dans le Finistère, essentiels pour se détacher ponctuellement du travail.

Enfin, je voudrais remercier Pauline, ma compagne, sans qui je ne me serais pas engagé dans cette aventure. Merci pour ton soutien et tes encouragements pendant ces années. Tu as toujours eu les bons mots pour m'aider à avancer dans ce projet. Merci pour m'avoir partagé ton expérience et pour tous les échanges passionnants qui ont très régulièrement animés nos soirées et week-ends. Merci pour ton investissement dans ce travail ! Nous allons désormais pouvoir vivre d'autres aventures.

En hommage à Pierre Dupont (1925 – 2017)
Professeur de phytogéographie à l'Université
de Nantes

Qui a consacré de nombreuses années de
ses recherches à la cartographie de
l'estuaire de la Loire

Liste des publications et communications

Publications dans des revues à comité de lecture

Le Dez M, Delbosc P, Bouzillé J-B, Robin M (2021) An expert system for the conservation of Atlantic estuarine wet meadows: application to a Natura 2000 site in France. *Biodivers Conserv.* <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02310-8>

Le Dez M, Robin M, Launeau P (2021) Contribution of Sentinel-2 satellite images for habitat mapping of the Natura 2000 site 'Estuaire de la Loire' (France). *Remote Sens Appl Soc Environ* xx:100637. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100637>

Sawtschuk J, **Le Dez M**, Urvois V, Mericskay B, Le Bot K. Données environnementales et gestion d'un site naturel littoral : Quels productions, usages et partages des cartographies de végétation dans l'Estuaire de la Loire ? *Vertigo*. Article soumis le 25/05/2021

Communications dans des séminaires et colloques

Colloque "La cartographie de la flore, un outil au service des politiques publiques de la biodiversité" en hommage au professeur Pierre Dupont. Nantes 07/06/2019 (présentation poster)

Colloque "Vegetation Diversity & Global Change" - European Vegetation Survey. Madrid 02/09/2019 -> 06/09/2019 (présentation poster)

Séminaire des doctorant.e.s de l'UMR CNRS 6554 LETG Littoral, Environnement, Télédétection, Géomatique. Brest 07/11/2019 (communication orale)

Séminaire "Journées virtuelles de l'Ecole Doctorale des Sciences de la Mer et du Littoral" En ligne 15/07/2020 ->02/09/2020 (présentation poster) *Lauréat du prix poster*

Séminaire LETG "Télédétection pour le suivi de la végétation" Rennes 18/06/2021 (communication orale)

Remerciements	5
Liste des publications et communications.....	7
Introduction générale.....	11
Chapitre 1 : Elaboration de la typologie des habitats de l'estuaire de la Loire	21
1.1 Introduction	21
1.2 Acquisition des données	28
1.3 Elaboration d'un système expert pour l'identification des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'	32
1.4 Compléments pour l'obtention d'une typologie complète des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'	85
1.5 Discussion.....	94
1.6 Conclusion	106
Chapitre 2 : Cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire par télédétection.....	109
2.1 Introduction	109
2.2 Matériel et méthode	118
2.3 Résultats.....	147
2.4 Discussion.....	195
2.5 Conclusion	213
Chapitre 3 : Analyse des usages de la cartographie des végétations et des habitats par les praticiens	217
3.1 Introduction	219
3.2 Matériel et méthode	222
3.3 Résultats.....	224
3.4 Discussion.....	230
3.5 Conclusion	236
Synthèse et conclusion générale.....	239
Bibliographie.....	251
Annexes	277

Introduction générale

Le déclin de la biodiversité

Depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, de nombreux scientifiques alertent sur l'érosion rapide de la biodiversité (Carson 1962; Reaka-Kudla et al. 1966; Diamond 1989; Heywood 1995). Le rythme actuel de disparition des espèces ne cesse de s'accroître et entraîne une sixième extinction de masse (Ceballos et al. 2020) dont les causes sont multiples et le plus souvent liées à la modification des habitats naturels par les activités humaines : changement des pratiques agricoles, urbanisation, pollution, surexploitation des espèces, colonisation par les espèces invasives (Brook et al. 2008; Tittensor et al. 2014; Godet & Devictor 2018), auxquelles commencent à s'ajouter les conséquences du changement climatique (Thomas et al. 2004; Bellard et al. 2012; Warren et al. 2018). Au cours des 40 dernières années, les activités humaines ont entraîné une diminution de 60 % des populations mondiales d'espèces sauvages (WWF 2018), et près des trois quarts de la surface de la planète ont été modifiés (IPBES 2019). Actuellement, en France, l'artificialisation et la fragmentation des habitats naturels augmentent de 1,4% chaque année sous l'effet de l'urbanisation et de l'intensification des pratiques agricoles (Basilico et al. 2020). Ainsi, l'impact de l'Homme sur la planète conduit de plus en plus de scientifiques à proposer la caractérisation d'une nouvelle ère : l'Anthropocène (Crutzen 2002; Bonneuil & Fressoz 2016).

Outre l'obligation morale de conserver le patrimoine naturel qui compose nos sociétés, la préservation de la biodiversité constitue un véritable enjeu pour le maintien de l'humanité (Díaz et al. 2018). La dégradation des écosystèmes entraîne déjà des conséquences sur les nombreux services apportés par la nature (pollinisation des cultures, disponibilité en eau douce, fertilité des terres arables, protection contre les inondations, productivité biologique des océans...) (Farber et al. 2002; Naeem et al. 2009; Luisetti et al. 2014). Au niveau mondial, on estime que des services écosystémiques d'une valeur de 3 500 à 18 500 milliards d'euros ont été perdus chaque année entre 1997 et 2011 en raison de la modification de l'occupation des sols (OCDE 2019).

Le dispositif Natura 2000

En Europe, une part importante de la biodiversité est liée aux habitats semi-naturels (prairies, pelouses, landes, marais...) qui ont été façonnés par les activités humaines au fil des siècles (Pullin et al. 2009). Cependant, depuis ces dernières décennies, l'intensification des pressions exercées sur ces milieux naturels a provoqué leur dégradation et le déclin de nombreuses espèces sur l'ensemble du continent. Pour tenter d'enrayer ce phénomène, l'Union Européenne (UE) a adopté en 1979 la directive 'Oiseaux' (79/409/EEC) pour la conservation des oiseaux sauvages (European Commission 1979), puis en 1992 la directive 'Habitats-Faune-Flore' (DHFF) (92/43/CEE) dont les objectifs sont le maintien ou le rétablissement dans un état de conservation favorable des habitats naturels, de la faune et de la flore sauvages considérés d'intérêt communautaire (European Commission 1992). Les habitats et les espèces énumérés dans ces deux textes ont été retenus pour leur risque d'extinction, leur vulnérabilité, leur rareté ou leur caractère endémique en Europe. Ces directives imposent aux États membres de l'UE de prendre des mesures générales de protection des espèces, de leurs habitats et de conserver des sites dans lesquels se retrouvent certains habitats et / ou espèces d'intérêt communautaire. Ces sites, désignés en Zones de Protection Spéciale (ZPS) relevant de la directive 'Oiseaux' et Zones Spéciales de Conservation (ZSC) relevant de la DHFF, font partie du réseau européen d'espaces naturels appelé 'Natura 2000'. Actuellement, le réseau Natura 2000 couvre plus de 17% de l'Europe et compte plus de 26 000 sites terrestres et marins répartis dans les 27 États membres, représentant le plus grand système d'aires protégées au monde (Baromètre Natura 2000 - <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/natura-2000-barometer>). Pour permettre à la Commission Européenne d'évaluer les progrès accomplis dans la réalisation des objectifs de la DHFF, les États membres de l'UE sont tenus de transmettre un rapport tous les six ans (rapportage) relatif à l'évaluation de l'état de conservation des habitats et des espèces selon l'Article 17 de la DHFF (European Commission 1992; DG Environment 2017). Plus particulièrement, l'élaboration des rapportages nécessite pour chaque habitat d'intérêt communautaire (HIC) l'acquisition de données pour quatre paramètres : (1) l'aire de répartition, (2) la superficie, (3) la structure et les fonctions et (4) les perspectives d'avenir. Par conséquent, l'application de la DHFF nécessite l'utilisation de méthodes précises et fiables pour le suivi et la surveillance des habitats (Haest et al. 2017).

Pour répondre à ces objectifs, l'utilisation d'approches cartographiques est régulièrement utilisées par les différents pays européens (Ichter et al. 2014). Plus spécifiquement en France,

un décret (n°2001-1216 du 20/12/2001) impose la réalisation de l'inventaire et la cartographie des habitats d'intérêt communautaire des sites Natura 2000 (Clair et al. 2005). Cette approche implique d'établir une identification fiable des habitats ainsi qu'une représentation précise de leur répartition. Cependant, les méthodes actuelles d'inventaires et de cartographies des habitats apparaissent peu performantes pour répondre à la nécessité d'un suivi régulier et harmonisé des habitats à l'échelle européenne. D'une part, de nombreux auteurs ont souligné la difficulté d'établir des identifications des habitats cohérentes et objectives (Oliver et al. 2013; Bouzillé et al. 2017; Meinard & Thébaud 2019; Maciejewski et al. 2020). D'autre part, les méthodes actuelles de cartographie, basées sur des prospections de terrains, sont jugées longues, coûteuses et donc difficiles à mettre en œuvre sur de vastes territoires (Hearn et al. 2011; Lewis et al. 2013). De plus la spatialisation des habitats par l'interprétation manuelle des images aériennes conduit souvent à une représentation des entités avec des limites strictes et grossières. Par conséquent, l'évaluation de l'état de conservation des HIC repose régulièrement sur des données peu fiables et partielles, nécessitant souvent d'être complétées par des avis d'experts (Evans 2006). À l'échelle locale, l'utilisation de cartes d'habitats imprécises et parfois anciennes implique des conséquences sur les mesures de gestion mises en place, avec potentiellement des effets négatifs sur la conservation des HIC (Gorrod & Keith 2009; Cherrill 2016).

Le site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'

Embouchure du plus long fleuve de France (1 006 km), l'estuaire de la Loire et sa plaine alluviale forme une vaste zone humide qui s'étire d'est en ouest sur une quarantaine de kilomètres entre Nantes et Saint-Nazaire (Fig. 1). Le site est délimité au nord par le Sillon de Bretagne qui forme un coteau continu du nord-ouest au sud-est, puis au sud par les reliefs de la voussure du Pays de Retz (Sellier 2012).

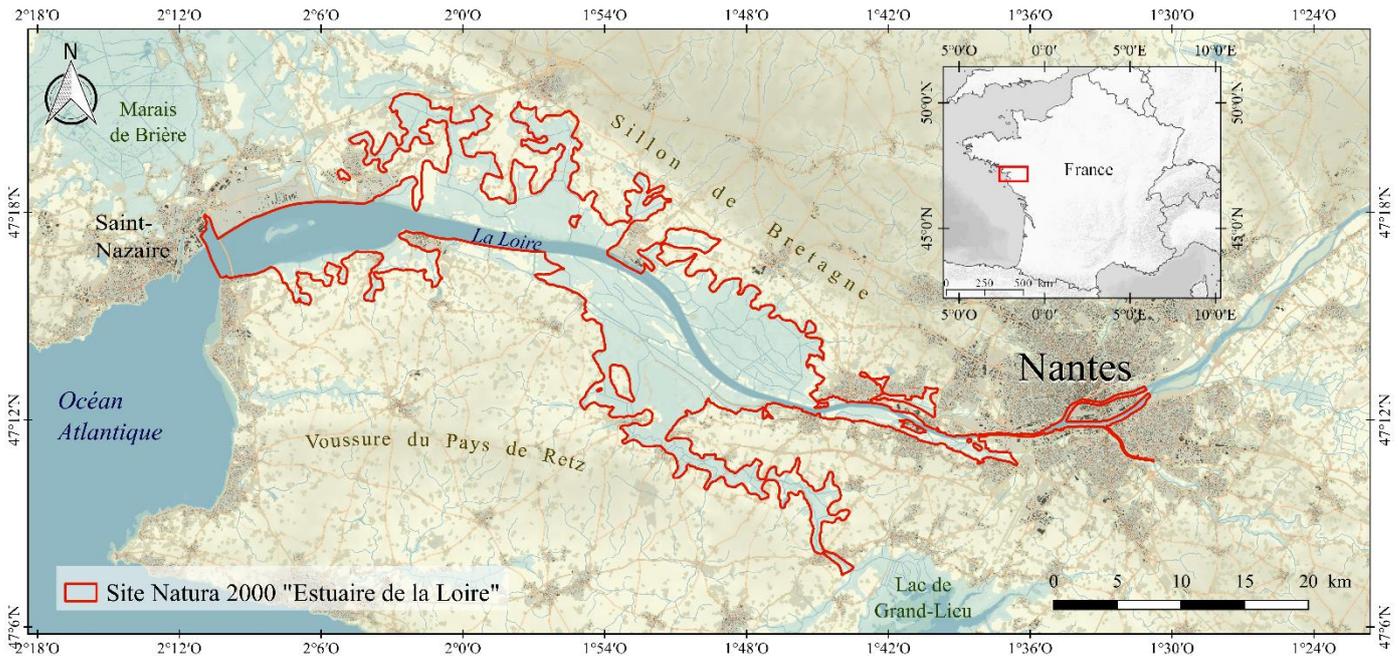


Figure 1. Localisation de l'estuaire de la Loire. Le périmètre du site Natura 2000 correspond à la ZSC - FR5200621 (*le contour de la ZPS - FR5210103 n'a pas été tracé en raison de son très grand chevauchement avec la ZSC*)

Comme la plupart des grands estuaires, le développement des activités humaines a entraîné d'importantes transformations de la Loire au cours des derniers siècles (Fleury 1974; Verger 2005). Dès le XII^{ème} siècle, les moines cisterciens entreprennent la valorisation agricole des marais estuariens par la création d'un vaste réseau de douves et de vannes destiné à réguler les échanges hydrauliques (GIP Loire Estuaire 2013). À partir du XIX^{ème} siècle, d'importants travaux d'aménagement ont été réalisés pour favoriser le transport maritime jusqu'au port de Nantes et permettre l'implantation de sites industrialo-portuaires (Demaure 1979). Il en a résulté de profondes transformations de la morphologie et du fonctionnement hydro-sédimentaire de la Loire : réduction de la largeur du fleuve, déplacement du front de salinité vers l'amont, développement du bouchon vaseux, disparition des îles (Verger 2005); avec de nombreuses conséquences sur les milieux naturels et la flore (Dupont 1978; Magnanon et al. 1998; Le Dez et al. 2017b). Depuis les années 1970, les études environnementales se sont multipliées pour décrire la richesse écologique de l'estuaire de la Loire, alerter sur la dégradation des milieux naturels et sur la nécessité d'une plus grande prise en compte des enjeux de biodiversité dans les projets d'aménagement (Kervingant & Sawtschuk 2019).

L'ensemble des connaissances acquises au cours de ces décennies a permis de mieux comprendre le fonctionnement de l'estuaire de la Loire et notamment de déterminer les principaux facteurs écologiques qui régissent les différents milieux naturels du site. Les

submersions régulières de la plaine alluviale par la Loire provoquent l'inondation plus ou moins prolongée des terrains selon les variations subtiles de la topographie et les capacités de drainage des différents secteurs de marais (Geffray & Ménanteau 2004; GIP 2012). Ces débordements apportent également des quantités plus ou moins importantes de sel et de vase qui se déposent sur les sols après le passage de la marée. Ainsi, les facteurs d'humidité des sols, de salinité et de trophie constituent des paramètres essentiels dans la structuration des végétations de l'estuaire de la Loire (Dupont 1983). L'organisation des communautés végétales est également déterminée par la nature des différents types de sols, des plus argileux à proximité du fleuve, au plus tourbeux sur les périphéries du site (Garcin et al. 2006). À l'ensemble de ces facteurs s'ajoute l'influence des différentes pratiques de gestion, constituées essentiellement par les activités agricoles extensives de fauche et de pâturage (Chambre d'agriculture de Loire-Atlantique et al. 2013). Ces caractéristiques permettent le développement d'une très grande diversité de milieux naturels, allant des végétations halophiles¹ de prés salés et de dunes littorales jusqu'aux végétations glycophiles² de prairies longuement inondables en passant par les prairies subhalophiles³ caractéristiques de cette zone de transition entre l'océan et le continent (Dupont 1978; de Foucault 1984; Chagneau et al. 2011). L'estuaire de la Loire est également marqué par la présence de surfaces importantes de roselières, avec en autres les phragmitaies, les scirpaies ou les glycériaies qui se répartissent essentiellement à proximité des berges du fleuve (Boutelier 1979; GIP 2017). Ces différents milieux accueillent de nombreuses espèces animales et végétales rares ou protégées. Pour la faune, c'est par exemple le cas de la Loutre d'Europe (*Lutra lutra*), de la Rosalie des Alpes (*Rosalia alpina*) ou du Phragmite aquatique (*Acrocephalus paludicola*) (Biotope 2007). Pour la flore, les espèces patrimoniales sont notamment l'Angélique des estuaires (*Angelica heterocarpa*), la Fritillaire pintade (*Fritillaria meleagris*), la Renoncule à feuilles d'ophioglosse (*Ranunculus ophioglossifolius*) ou le Scirpe triquètre (*Schoenoplectus triqueter*) (Dupont 1986).

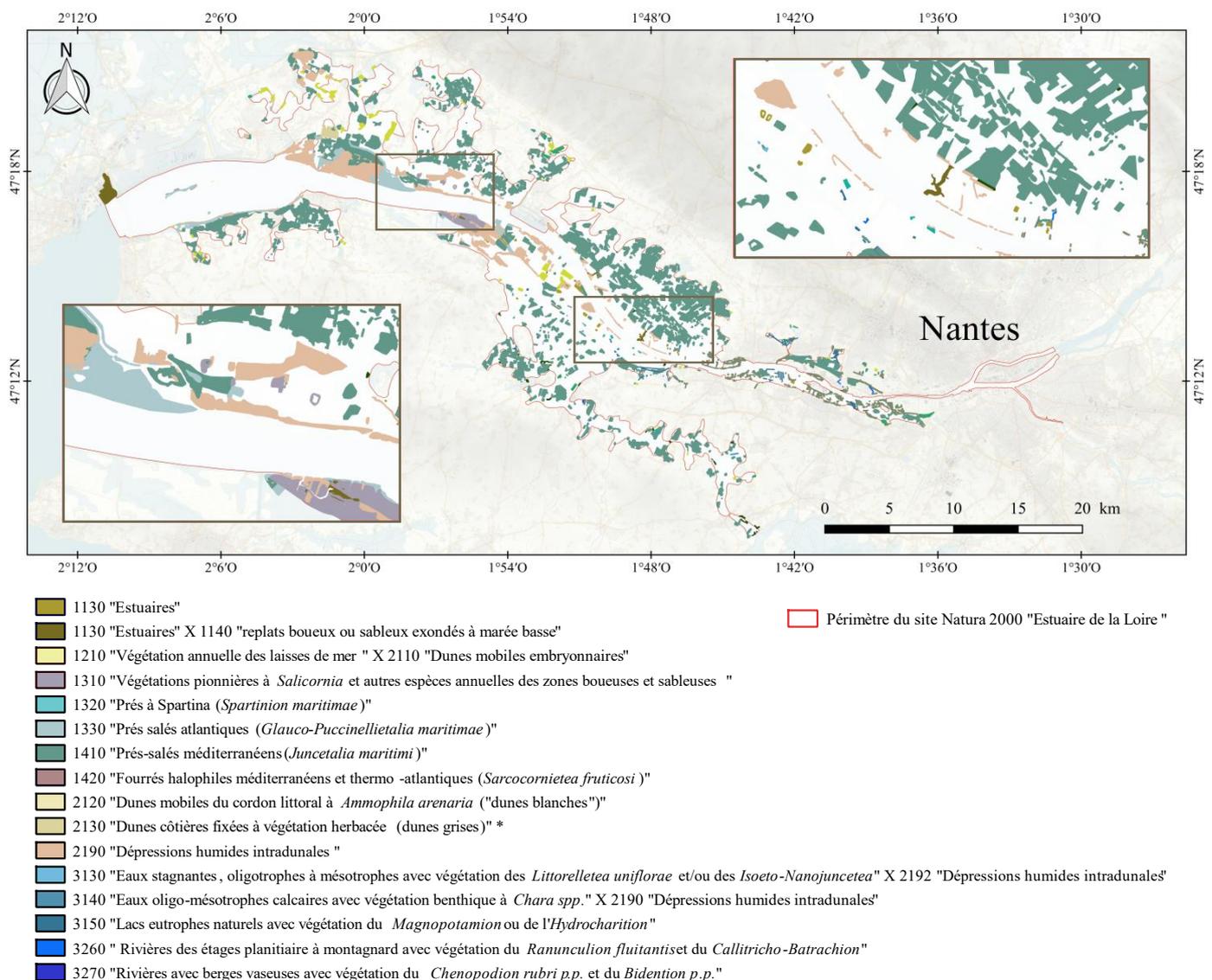
La mise en exergue des richesses écologiques de l'estuaire de la Loire a permis son intégration au réseau Natura 2000 dès 1996, avec le classement du site en ZPS (FR5210103 – 20 162 ha) pour son rôle majeur dans la migration et la reproduction de nombreuses espèces d'oiseaux (Marion et al. 1991; Jolivet & Gurliat 1995; Yésou et al. 2019). L'intérêt du site pour l'avifaune est d'autant plus marqué qu'il s'inscrit dans vaste un réseau de zones humides régionales

¹ Se développant sur des sols contenant du chlorure de sodium (Géhu 2006)

² Qui n'aime pas les sols à teneur élevée en sel (Géhu 2006)

³ Se développant sur des sols contenant du chlorure de sodium en faible quantité (Guitton & Thomassin 2016)

(marais salants de Guérande et du Mès, marais Breton – vendéen...) et locales (marais de Brière, lac de Grand-Lieu...) dont l'interdépendance est déterminante pour la conservation de nombreuses espèces menacées (Yésou & Trolliet 1995). L'estuaire de la Loire a ensuite été désigné comme Site d'Importance Communautaire⁴ (SIC) en 2004 puis a été classé en ZSC (FR5200621 – 21 726 ha) en 2014 en raison de son intérêt pour la conservation de plusieurs habitats et espèces relevant des annexes I et II de la DHFF. L'importance du site pour la conservation des habitats d'intérêt communautaire a notamment été révélée lors de l'élaboration de la première cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire en 2002 (Ouest Aménagement 2003) (Fig. 2).



⁴ Site désigné au titre de la DHFF pour l'Union européenne avant son intégration au réseau Natura 2000 en ZSC par arrêté ministériel

- 3270 "Rivières avec berges vaseuses avec végétation du *Chenopodium rubri p.p.* et du *Bidention p.p.*"
- 6410 "Prairies à *Molinia* sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (*Molinion caeruleae*)"
- 6430 "Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin"
- 6510 "Prairies de fauche de basse altitude (*Alopecurus pratensis*, *Sanguisorba officinalis*)"
- 7210 "Marais calcaires à *Cladium mariscus* et espèces du *Caricion davalliana*" *
- 91E0 "Forêts alluviales à *Alnus glutinosa* et *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*)" *
- 91F0 "Forêts mixtes à *Quercus robur*, *Ulmus laevis*, *Ulmus minor*, *Fraxinus excelsior* ou *Fraxinus angustifolia*, riveraines des grands fleuves (*Ulmenion minoris*)"

Figure 2 : Cartographie des habitats d'intérêt communautaire du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire' réalisée en 2002 par le bureau d'étude Ouest Aménagement

Ce travail avait permis d'inventorier 19 habitats d'intérêt communautaire, dont 3 reconnus comme prioritaires, c'est-à-dire identifiés comme en danger de disparition selon DHFF. Parmi ces habitats, le 1410 'Prés-salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*) et le 1130 'Estuaires' avaient été recensés comme les plus représentés avec respectivement 3 366 ha et 1 400 ha, tandis que le 2120 'Dunes mobiles du cordon littoral à *Ammophila arenaria* (dunes blanches)' et le 7210 'Marais calcaires à *Cladium mariscus* et espèces du *Caricion davalliana*' étaient les habitats les plus rares avec seulement 0,01 ha cartographiés sur l'estuaire de la Loire (Tab. 1).

Tableau 1. Liste des habitats d'intérêt communautaire inventoriés lors de l'élaboration de la première cartographie des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'

Habitats d'intérêt communautaire	Surface (ha)
1130 - Estuaires	1 400
1140 - Replats boueux ou sableux exondés à marée basse	700
1210 - Végétation annuelle des laisses de mer	4
1310 - Végétations pionnières à <i>Salicornia</i> et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses	100
1320 - Prés à <i>Spartina</i> (<i>Spartinion maritimae</i>)	0,5
1330 - Prés-salés atlantiques (<i>Glauco-Puccinellietalia maritimae</i>)	257
1410 - Prés-salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)	3 366
2110 - Dunes mobiles embryonnaires	4
2120 - Dunes mobiles du cordon littoral à <i>Ammophila arenaria</i> (dunes blanches)	0,01
2130 - Dunes côtières fixées à végétation herbacée (dunes grises) *	0,02
3130 - Eaux stagnantes, oligotrophes à mésotrophes avec végétation des <i>Littorelletea uniflorae</i> et/ou des <i>Isoeto-Nanojuncetea</i>	0,4
3140 - Eaux oligomésotrophes calcaires avec végétation benthique à <i>Chara spp.</i>	0,01
3150 - Lacs eutrophes naturels avec végétation du <i>Magnopotamion</i> ou de l' <i>Hydrocharition</i>	30
6410 - Prairies à <i>Molinia</i> sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (<i>Molinion caeruleae</i>)	32
6430 - Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin	4
6510 - Prairies maigres de fauche de basse altitude (<i>Alopecurus pratensis</i> , <i>Sanguisorba officinalis</i>)	132
7210 - Marais calcaires à <i>Cladium mariscus</i> et espèces du <i>Caricion davalliana</i> *	0,01
91E0 - Forêts alluviales à <i>Alnus glutinosa</i> et <i>Fraxinus excelsior</i> (<i>Alno-Padion</i> , <i>Alnion incanae</i> , <i>Salicion albae</i>) *	119
91F0 - Forêts mixtes à <i>Quercus robur</i> , <i>Ulmus laevis</i> , <i>Ulmus minor</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> ou <i>Fraxinus angustifolia</i> , riveraines des grands fleuves (<i>Ulmenion minoris</i>)	13

* Habitats prioritaires

Cette première mission d'inventaire et de cartographie des habitats du site Natura 2000 avait également mis en évidence les limites de la méthode utilisée, principalement en raison des difficultés à réaliser une prospection exhaustive sur un site aussi étendu (21 726 ha) et souvent difficile d'accès (présence de nombreux canaux et de secteurs de marais soumis aux submersions régulières par la Loire) (Ouest Aménagement 2003).

Contexte et objectifs du projet de recherche

Depuis 2016, le Département de Loire-Atlantique s'est vu confier l'animation des sites Natura 2000 'Estuaire de la Loire' par l'État. Cette mission s'ajoute à celle de la gestion des propriétés du Conservatoire du littoral situées au cœur de l'estuaire (environ 2 700 ha), faisant du Département de Loire-Atlantique un acteur majeur pour la conservation de la biodiversité et l'aménagement durable de ce territoire⁵. La prise en charge de l'animation Natura 2000 de l'estuaire a conduit le Département à engager la révision du Document d'Objectifs⁶ (DOCOB) qui impliquait la mise à jour de la cartographie des habitats d'intérêt communautaire. Compte-tenu des difficultés rencontrées lors de l'élaboration de la première cartographie des habitats, le Conseil départemental de Loire-Atlantique a initié une réflexion sur la démarche à adopter pour son actualisation, qui a abouti au montage de cette thèse CIFRE⁷.

Les objectifs principaux de la thèse visaient à expérimenter de nouvelles méthodes de travail, basées sur l'utilisation d'outils technologiques innovants (Bouzillé 2014; Robin 2015) afin d'apporter une plus-value (gain temps / qualité) dans le processus d'inventaire et de spatialisation des habitats de l'estuaire de la Loire. Les démarches envisagées devaient permettre une réponse opérationnelle à l'objectif d'actualisation de la cartographie des habitats du site Natura 2000 et plus généralement, être reproductibles à l'avenir et transposables à d'autres espaces naturels à superficies importantes.

⁵ A noter que le Département de Loire-Atlantique est également compétent sur la politique Espaces naturels sensibles (espaces naturels en propriété et gestion départementales)

⁶ Document établi en concertation avec les acteurs locaux. Il comprend un état des lieux écologique et socio-économique, les objectifs de conservation des habitats et des espèces d'intérêt communautaire ainsi que les mesures de gestion adaptées

⁷ Convention Industrielle de Formation par la Recherche : thèse réalisée avec un partenariat entre une entreprise ou une collectivité territoriale et un laboratoire public de recherche

Cette thèse se structure en trois chapitres :

- Le premier chapitre concerne l'élaboration de la typologie des habitats dans l'objectif de développer une méthode permettant de faciliter leur identification. Le processus méthodologique s'appuiera sur l'utilisation de la phytosociologie sigmatiste et exploitera les outils d'analyses de données de végétation qui font actuellement référence en Europe.
- Le second chapitre se focalise sur les méthodes de cartographie avec l'objectif principal de spatialiser précisément les habitats du site Natura 2000. La démarche mise en œuvre reposera sur l'utilisation de la télédétection avec l'expérimentation de plusieurs approches basées sur l'exploitation d'images satellites Sentinel-2 et de données aéroportées hyperspectrales et LiDAR.
- Le troisième chapitre propose une réflexion plus générale sur l'usage des cartographies des végétations et des habitats par les praticiens. L'intérêt de ce type de données environnementales sera évalué au moyen d'une analyse bibliographique des études produites sur l'estuaire de la Loire ainsi qu'à partir d'une enquête auprès des acteurs locaux. L'objectif de ces investigations sera d'estimer les capacités de la cartographie des habitats du site Natura 2000 à devenir un support de discussion et de partage dans un objectif de gestion concertée de ce territoire.

Chapitre 1 : Élaboration de la typologie des habitats de l'estuaire de la Loire

1.1 Introduction

Dans le cadre des politiques de conservation de la nature, le terme habitat désigne une zone terrestre ou aquatique se distinguant par ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques, qu'elles soient entièrement naturelles ou semi-naturelles (Ichter et al. 2014; Mistarz & Latour 2019). Les habitats sont importants en tant que mesure de la biodiversité au niveau du paysage (Bunce et al. 2013) et les nombreux travaux relatifs aux typologies des habitats démontrent l'intérêt de cette démarche pour l'identification, la cartographie, le suivi et la conservation de la nature (Rodwell et al. 2018). L'établissement de typologies des habitats consiste à regrouper les éléments visibles (les zones spatialement reconnaissables) inventoriés sur le terrain et possédant des caractéristiques distinctes, au sein d'un système hiérarchisé et organisé d'unités homogènes.

Plusieurs systèmes de classification des habitats ont été développés dans le but d'avoir un langage commun de communication entre les scientifiques, les gestionnaires et les décideurs politiques. Parmi ces référentiels, CORINE Biotopes (Devillers et al. 1991) a largement été utilisé à partir des années 1990. Ce système de classification a été établi afin de permettre la description de tous les types d'habitats de l'Union Européenne. L'objectif principal était d'identifier les habitats d'importance majeure pour la conservation de la nature en Europe, notamment dans le cadre des inventaires et de la sélection des sites d'intérêt communautaire du réseau Natura 2000 (Ichter et al. 2014). L'intégration de nouveaux pays dans l'UE et la nécessité d'enrichir la classification CORINE Biotopes ont conduit à développer de nouveaux référentiels. En 1996, la classification des habitats du Paléarctique (Devillers & Devillers-Terschuren 1996) a permis d'étendre la description des habitats à toute l'Europe. À partir de 1998 apparaît le système de classification EUNIS (European Nature Système d'information) (Davies et Moss 1998; Davies et al. 2004; Moss 2008) qui couvre l'ensemble des domaines marin et terrestre de l'Europe (Evans 2012). La typologie EUNIS est régulièrement actualisée et représente actuellement le système de classification des habitats le plus complet en Europe

(Chytrý et al. 2020). Parallèlement au développement de ces typologies, la mise en œuvre de la directive Habitats-Faune-Flore a conduit à la publication du Manuel d'interprétation des habitats de l'Union Européenne qui recense les habitats d'intérêt communautaire listés dans l'annexe I de la DHFF. La description de ces habitats s'appuyait initialement sur la classification CORINE Biotopes, puis a progressivement été actualisée pour inclure des habitats supplémentaires et des définitions révisées au fur et à mesure de l'élargissement de l'UE (Bunce et al. 2013). La dernière version du Manuel d'interprétation des habitats d'intérêt communautaire, dénommée EUR28, a été publiée en 2013 (European Commission 2013). Ces différents référentiels typologiques intègrent le plus souvent des descriptions succinctes des habitats basées principalement sur des critères physiologiques, la présence de certaines communautés végétales et animales ou des caractéristiques physico-chimiques de l'environnement (Evans 2012). L'objectif était de privilégier l'utilisation de critères simples afin de rendre accessible l'identification des habitats par tous les opérateurs, sans formations naturalistes approfondies (Chytrý et al. 2020). Cependant, malgré les informations contenues dans ces référentiels, des difficultés existent pour l'identification de certains types d'habitats sur le terrain (Ichter et al. 2014). Ces problèmes sont le plus souvent liés à des mauvaises définitions ou à un manque de clarté dans la description de certains types d'habitats (Ullerud et al. 2018) pouvant entraîner des divergences dans leurs interprétations (Gaudillat et al. 2018). Le caractère subjectif de l'identification des habitats, parfois basé uniquement sur la présence d'une ou deux espèces, est également mise en exergue par certains auteurs (Bouzillé 2014; Eriksen et al. 2018). Ces difficultés soulèvent la nécessité de développer des démarches plus objectives afin de rendre l'approche transposable d'un habitat à un autre.

Bien que les habitats soient définis par des caractéristiques biotique (communautés végétales et animales) et abiotique (climat et lithogéomorphologie notamment), c'est bien souvent uniquement la végétation qui est utilisée pour les identifier (Rodwell et al. 2018). Ce choix est basé sur le postulat que *« la végétation, par son caractère intégrateur (synthétisant les conditions de milieu et de fonctionnement du système) est considéré comme un bon indicateur et permet donc de déterminer l'habitat »* (Rameau 2001). Ainsi, la majorité des unités typologiques des classifications d'habitats sont définies à partir de leurs compositions floristiques et de leurs communautés végétales (Bunce et al. 2013; Gaudillat et al. 2018). Plus précisément, les classifications des habitats sont le plus souvent fondées sur les unités syntaxonomiques définis par la phytosociologie sigmatiste (Gigante et al. 2016; Rodwell et al. 2018).

La phytosociologie sigmatiste ou phytosociologie Braun-Blanquetienne est la discipline scientifique qui étudie les communautés végétales. Elle est basée sur l'inventaire et l'analyse de la végétation ainsi que les facteurs environnementaux qui l'influencent. La phytosociologie sigmatiste vise à décrire les groupements végétaux (syntaxons) et leur organisation dans un système de classification (synsystème) hiérarchisé en classes, ordres, alliances et associations végétales (Ewald 2003; Dengler et al. 2013). L'unité élémentaire de cette classification est l'association végétale qui est définie comme « *une communauté végétale avec une composition floristique définie et une physionomie homogène qui se développe sous les mêmes conditions écologiques* » (Flahaut & Schröter 1910), et qui se caractérise par une combinaison répétitive et originale d'espèces végétales. La méthode de la phytosociologie sigmatiste est basée sur l'analyse de relevés de végétation (relevés phytosociologiques) réalisés au sein de formations végétales physionomiquement et floristiquement homogènes (Braun-Blanquet 1965; Guinochet 1973; Lahondère 1997). Un relevé phytosociologique repose sur un inventaire floristique (Géhu 2006) associé à un coefficient semi-quantitatif d'abondance-dominance (Dengler 2017). Il représente donc à la fois, une étape analytique et descriptive de la communauté et se doit d'être sa fidèle retranscription. Cette démarche méthodologique est incontournable pour mieux appréhender les communautés végétales mais aussi pour la construction de référentiels syntaxonomiques pour les habitats naturels et semi naturels.

Gaudillat et al. (2018) précisent les liens entre la végétation et les habitats à travers la définition de 3 grandes logiques d'identification des habitats : 1) Dans la plupart des cas, les définitions des habitats sont uniquement basées sur la végétation et leur identification sera établie par la présence des syntaxons les caractérisant. Les habitats concernés sont dits à logique 'végétation'. 2) Dans certains cas, les définitions des habitats sont axées exclusivement sur un type de biotope (dune, falaise, rivière, pavement, etc.) et seules leurs composantes abiotiques seront utilisées pour les identifier. Néanmoins, ces habitats comportent régulièrement des végétations, mais les syntaxons présents ne constitueront pas un critère d'identification. Ces habitats sont dits à logique 'biotope'. 3) Plus rarement, les définitions des habitats sont établies à la fois à partir de la végétation et des caractéristiques de biotopes. Les habitats concernés sont dits à logique 'mixte'.

Dans ce mémoire, nous utiliseront le terme 'unité élémentaire' pour faire référence au critère utilisé pour l'identification de l'habitat (syntaxon et / ou composante abiotique).

En France, la méthode phytosociologique sigmatiste a été utilisée dans le cadre de la rédaction des Cahiers d'habitats (Bensettiti et al., 2001-2005) qui proposent une déclinaison des habitats d'intérêt communautaire en habitats 'élémentaires' en vue d'apporter des éléments de descriptions supplémentaires pour faciliter l'identification des habitats sur le terrain. Ainsi, le guide méthodologique pour la cartographie des habitats naturels des sites Natura 2000 édité par le Muséum national d'Histoire naturelle (Clair et al. 2005), préconise l'utilisation de la méthode phytosociologique sigmatiste pour l'identification des habitats. Les relevés phytosociologiques doivent être identifiés au niveau des associations végétales ou des alliances afin d'établir des correspondances vers les typologies d'habitats (Clair et al. 2019; Gaudillat et al. 2018).

Un des principaux objectifs de la phytosociologie sigmatiste est le développement d'un système de classification hiérarchique des syntaxons (synsystème) (Braun-Blanquet 1965; Ewald 2003; Dengler et al. 2013). Cependant, l'importante littérature phytosociologique produite pendant plusieurs décennies a nécessité la mise en place de synthèses afin d'établir des référentiels des végétations cohérents aux échelles régionales, nationales ou européenne (Rodwell et al. 2002). À l'échelle européenne, l'EuroVegChecklist constitue une tentative pour standardiser la classification de la végétation, en fournissant une vue d'ensemble et complète des unités de végétation depuis les classes jusqu'au niveau des alliances (Mucina et al. 2016). En France, la méthode phytosociologique sigmatiste est utilisée dans le cadre des synthèses du Prodrôme des Végétations de France (PVF) (Bardat et al. 2004). Ce référentiel décline l'ensemble des syntaxons connus sur le territoire national jusqu'au rang de l'alliance. La deuxième version (PVF2) (Bioret et al. 2013), en cours d'élaboration, propose une description détaillée des communautés végétales jusqu'au rang de l'association végétale (<http://phytosocio.org/#/pvf2>). À une échelle plus locale, certains Conservatoires botaniques Nationaux (CBN) ont développé des référentiels de végétations aux niveaux départemental (par exemple, Fernez et al. 2015) et régional (par exemple, Guitton & Thomassin 2016; Lafon et al. 2019; Catteau et al. 2021) ou à l'échelle de régions biogéographiques (par exemple, Glemarec et al. 2015; Villaret et al. 2019) qui ont contribué à améliorer l'accès aux descriptions des communautés végétales.

Cependant, malgré l'apport de ces différentes synthèses, le rattachement d'un relevé phytosociologique à une unité syntaxonomique reste une étape délicate. Actuellement, la méthode la plus couramment utilisée consiste à diagonaliser un ou des tableaux de relevés réalisés sur un site afin de rassembler ceux qui se ressemblent et les espèces selon leurs affinités sociologiques (Delpech 2006; Gillet 2000). Cette méthode permet de faire apparaître des

groupes de relevés caractérisés par des combinaisons d'espèces qui leur sont plus particulièrement fidèles. La composition floristique de ces groupements est ensuite comparée aux descriptions des syntaxons contenues dans les référentiels de végétation afin de procéder à leur identification. Plusieurs auteurs ont souligné les limites de cette méthode qui laisse place à la subjectivité et peut conduire à une certaine approximation dans l'identification des relevés pouvant entraîner des divergences d'interprétation selon les opérateurs (Kočí et al. 2003; Oliver et al. 2013; Maciejewski et al. 2020). Pourtant, ce processus de rattachement est déterminant et doit être effectué avec rigueur puisqu'il conditionne la mise en place de mesures de gestion, le suivi des dynamiques de la végétation ou l'évaluation de l'état de conservation des habitats (Hearn et al. 2011; Cherrill 2016; Ullerud et al. 2018; Eriksen et al. 2019).

Afin de répondre à une plus grande objectivité dans l'identification des végétations, des outils numériques permettant le rattachement d'un relevé phytosociologique à une unité syntaxonomique ont été développés (par exemple : TABLEFIT (Hill 1989)). C'est notamment le cas des systèmes experts (SE) qui permettent de reproduire la démarche de l'expert phytosociologue en assignant des relevés à une classification préétablie (Noble 1987; Kočí et al. 2003). Les identifications sont basées sur des formules créées à l'aide d'opérateurs logiques combinant des valeurs de couverture d'espèces et de groupes d'espèces (Landucci et al. 2011; Tichý et al. 2019). La construction des systèmes experts s'est développée au cours de la dernière décennie en Europe sur plusieurs types de végétations. Par exemple, Peterka et al. (2017) ont développé un SE sur des végétations de tourbières européennes au niveau de l'alliance, et Landucci et al. (2015) un SE pour l'identification des associations de végétations aquatiques de la République Tchèque. De manière plus globale, Mucina et al. (2016) ont établi un SE pour l'ensemble des classes phytosociologiques européennes définies dans l'EuroVegChecklist.

Ainsi, l'usage des SE s'avère particulièrement adapté à l'inventaire et la cartographie des habitats des sites Natura 2000 (Swacha et al. 2016; Rodríguez-Rojo et al. 2020; Chytrý et al. 2020). Plus particulièrement, l'utilisation d'une telle démarche paraît pertinente pour un site comme l'estuaire de la Loire, caractérisé par la présence de nombreuses communautés végétales reconnues comme particulièrement difficiles à identifier et sujettes à confusions. C'est par exemple le cas de certaines prairies subhalophiles et glycophiles respectivement assignées à l'*Alopecurion utriculati* et au *Bromion racemosi* (de Foucault 1984). Ces prairies couvrent de grandes surfaces sur le site et sont liées topographiquement par l'apport d'eau salée créant des imbrications floristiques très fortes entre elles (Dupont 1983). Leur distinction précise est

d'autant plus importante que les prairies de l'*Alopecurion utriculati* relève de l'habitat d'intérêt communautaire 1410 'Prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)' alors que le *Bromion racemosi* ne relève pas de la DHFF. Par conséquent, pour gérer et conserver la biodiversité végétale du site, il est nécessaire de différencier de manière la plus fiable possible les différents types de végétation.

Ainsi, dans le cadre de l'élaboration de la typologie des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire', nous avons développé une approche méthodologique basée sur les systèmes experts pour identifier les végétations. Les objectifs, illustrés dans la [figure 3](#), sont :

(1) de recueillir des données sur les végétations présentes sur l'estuaire de la Loire à travers une synthèse bibliographique (élaboration d'une pré-typologie et collecte de relevés phytosociologiques) et la réalisation d'une campagne de terrain (acquisition de relevés phytosociologiques).

(2) d'élaborer un système expert permettant une identification formalisée des relevés phytosociologiques :

- au niveau synsystématique (associations végétales et alliances) ;
- au niveau des habitats (habitats EUNIS et habitats d'intérêt communautaire EUR28 – Cahiers d'Habitats).

(3) d'établir la typologie phytosociologie (synsystème) et la typologie des habitats du site Natura 2000 grâce l'application du système expert sur les relevés phytosociologiques du site.

(4) de caractériser les habitats à partir de listes d'espèces caractéristiques déterminées à l'échelle du site Natura 2000.

(5) de cartographier la distribution des relevés sur l'estuaire de la Loire pour chaque habitat.

(6) de produire des fiches descriptives des habitats d'intérêt communautaire.

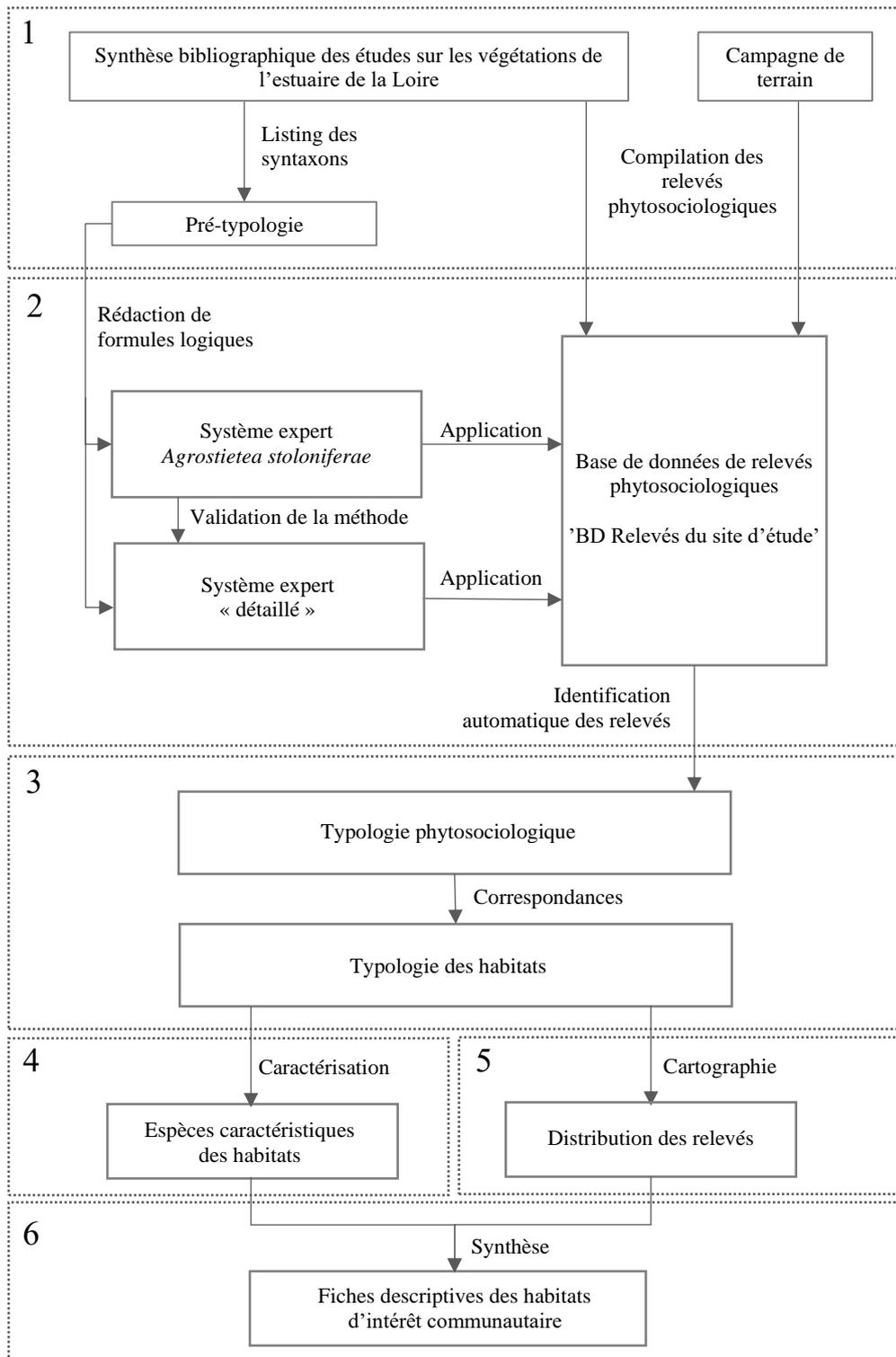


Figure 3. Schéma du processus méthodologique utilisé pour établir la typologie des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'

1.2 Acquisition des données

1.2.1 Données bibliographiques

La mobilisation des données existantes permet de synthétiser les connaissances déjà acquises et d'identifier les insuffisances persistantes (Laurent et al. 2017). Cette étape était d'autant plus essentielle que les sources potentielles de données à l'échelle du site Natura 2000 étaient nombreuses. Une synthèse bibliographique la plus exhaustive possible des études faisant mention de données de végétation sur l'estuaire de la Loire a été réalisée (Annexe 01). Cette synthèse incluait des études scientifiques, des thèses, des études d'impacts, des cartographies de la végétation. Ce travail a permis de révéler la richesse et la diversité des études produites sur ce territoire avec un total de 82 études recensées sur une période allant de 1972 à 2020. A partir de cet ensemble bibliographique, nous avons ciblé spécifiquement les études utilisant la méthode phytosociologique afin de recueillir deux types de données :

- D'une part, toutes les mentions de syntaxons (depuis l'association végétale jusqu'à la classe) cités comme présents sur le site d'étude (ou à proximité immédiate) ont été relevés et intégrés dans un schéma syntaxonomique appelé 'pré-typologie' (Annexe 02). Ce travail a permis de recenser 38 Classes, 60 ordres, 91 alliances et 118 associations végétales.
- D'autre part, tous les relevés phytosociologiques réalisés sur le site ont été saisis et stockés dans le logiciel Turboveg for Windows v.2 (Hennekens & Schaminée 2001) et leur localisation a été enregistrée dans le logiciel SIG⁸ QGIS 3.4.8 (QGIS Development Team, 2019). Les relevés de végétation anciens, sans coordonnées géographiques, ont été géoréférencés selon les descriptions des localités rapportées dans les publications originales. L'incertitude du géoréférencement était <1 km dans la plupart des cas. Au total, 1 640 relevés ont été recueillis à travers la bibliographie couvrant une période allant de 1970 à 2019 (avec une prédominance de relevés effectués durant la dernière décennie) (Fig. 4).

⁸ Système d'Information Géographique

1.2.2 Campagne de terrain

En complément des données bibliographiques, deux campagnes de terrain ont été réalisées au cours de la thèse, en 2018 et 2019. Les objectifs de ces prospections étaient de :

- Recueillir des relevés phytosociologiques complémentaires dans des secteurs du site Natura 2000 qui avaient été moins étudiés lors des précédentes études ;
- Actualiser certaines données et confirmer ou infirmer la présence de certains taxons sur l'estuaire de la Loire ;
- Obtenir une 'vision de terrain' afin de faciliter l'interprétation des relevés et mieux appréhender l'organisation spatiale des communautés végétales.

Un calendrier de prospection a été établi de façon à observer les différents types de végétation durant leur période de développement optimale. Les inventaires se sont échelonnés entre le début du printemps pour les communautés prévernales (par exemple, les pelouses annuelles sèches du *Thero – Airion*) jusqu' à l'automne pour les végétations les plus tardives (par exemple, les communautés à salicornes du *Salicornion europaeo – ramosissimae*). Les relevés ont été réalisés selon la méthode de la phytosociologie sigmatiste (Dengler 2017) au sein de formations végétales physionomiquement et floristiquement homogènes. La localisation de chaque relevé a été enregistrée précisément à l'aide d'un GPS différentiel (GPS GeoXH™ de Trimble Geo-Explorer®, précision horizontale <1 m) et des photos ont été prises afin de conserver une représentation visuelle de la zone prospectée. Au total, 259 relevés ont été réalisés spécifiquement dans le cadre de la thèse (Fig. 4). Ces relevés ont été saisis puis compilés dans la base de données Turboveg et leur localisation intégrée sous SIG.

Les relevés phytosociologiques bibliographiques et les relevés phytosociologiques réalisés lors de la campagne de terrain ont été réunis afin de constituer un jeu de données de relevés du site d'étude. Cette base de données de relevés phytosociologiques dénommée 'BD relevés du site d'étude' contient 1 899 relevés de végétation et 717 espèces.

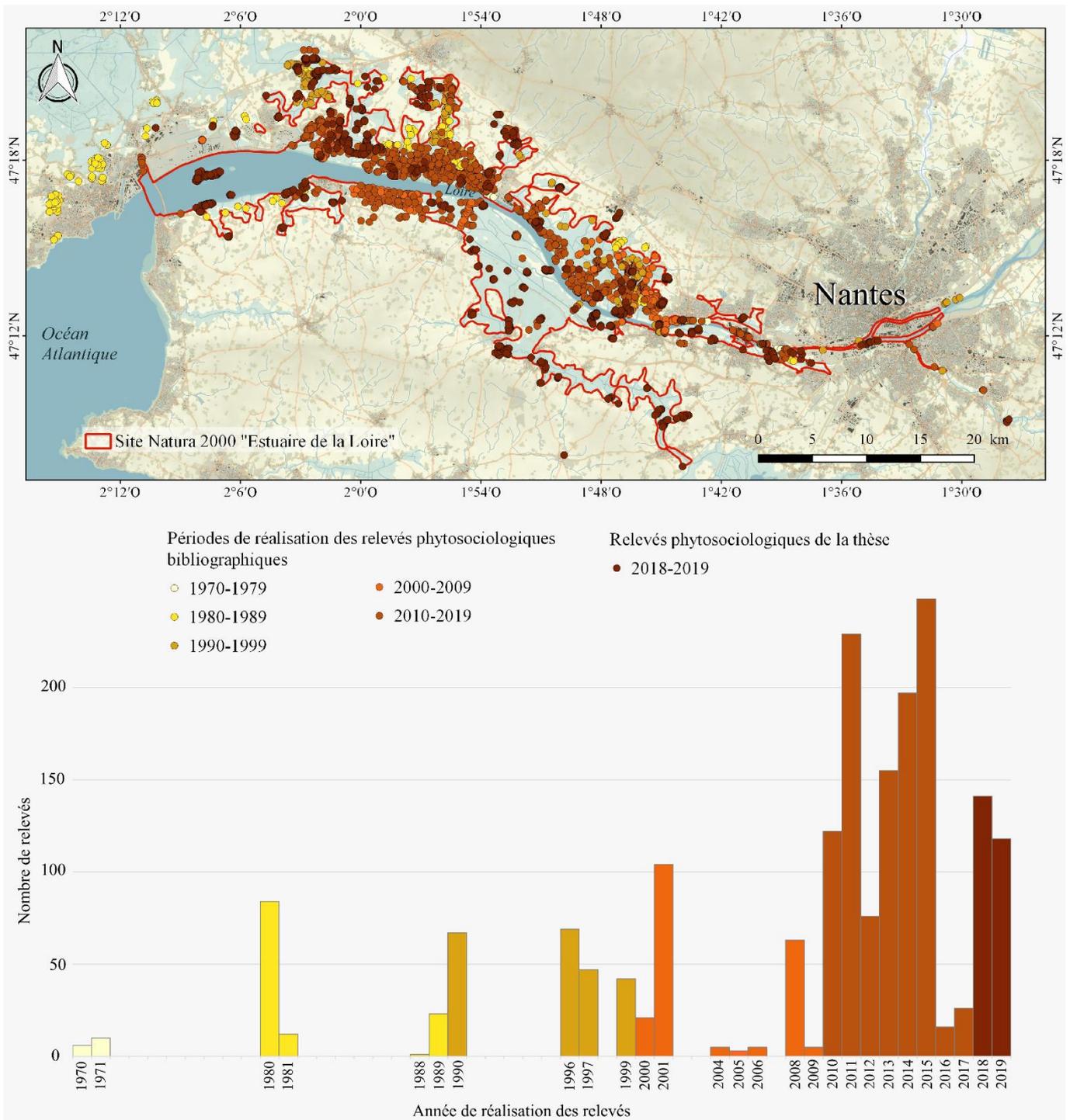


Figure 4. Localisation des relevés phytosociologiques rassemblés dans la base de données de relevés du site d'étude et diagramme représentant le nombre de relevés effectués selon les années. La figure montre que les premières études remontent à 1970 mais que l'essentiel des données recueillies se situe sur la dernière décennie

1.2.3 Nomenclature taxonomique, syntaxonomique et correspondances avec les typologies habitats

Le recueil des données bibliographiques a nécessité un important travail d'harmonisation nomenclaturale et synnomenclaturale. La taxonomie et la nomenclature des espèces ont été unifiées selon le référentiel taxonomique national TAXREF v.13.0 (Gargominy et al. 2019). Les taxons identifiés uniquement par certains auteurs au niveau des sous-espèces ou des variétés ont été fusionnés au niveau des espèces afin d'harmoniser la taxonomie de l'ensemble de données. Les noms des syntaxons et le système syntaxonomique hiérarchique suivent la structure du prodrome des végétations de France (Bardat et al. 2004; Bioret et al. 2013). Les correspondances vers les typologies d'habitats EUNIS, EUR28 et Cahiers d'Habitats ont été établies selon le référentiel français des typologies d'habitat et de végétation HABREF (Clair et al. 2019) sauf pour certains cas où le Référentiel des Noms de la Végétation et des habitats de l'Ouest (RNVO) du CBN de Brest (<http://www.cbnbrest.fr/rnvo/>) a été utilisé pour mieux correspondre au contexte local.

1.3 Élaboration d'un système expert pour l'identification des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'

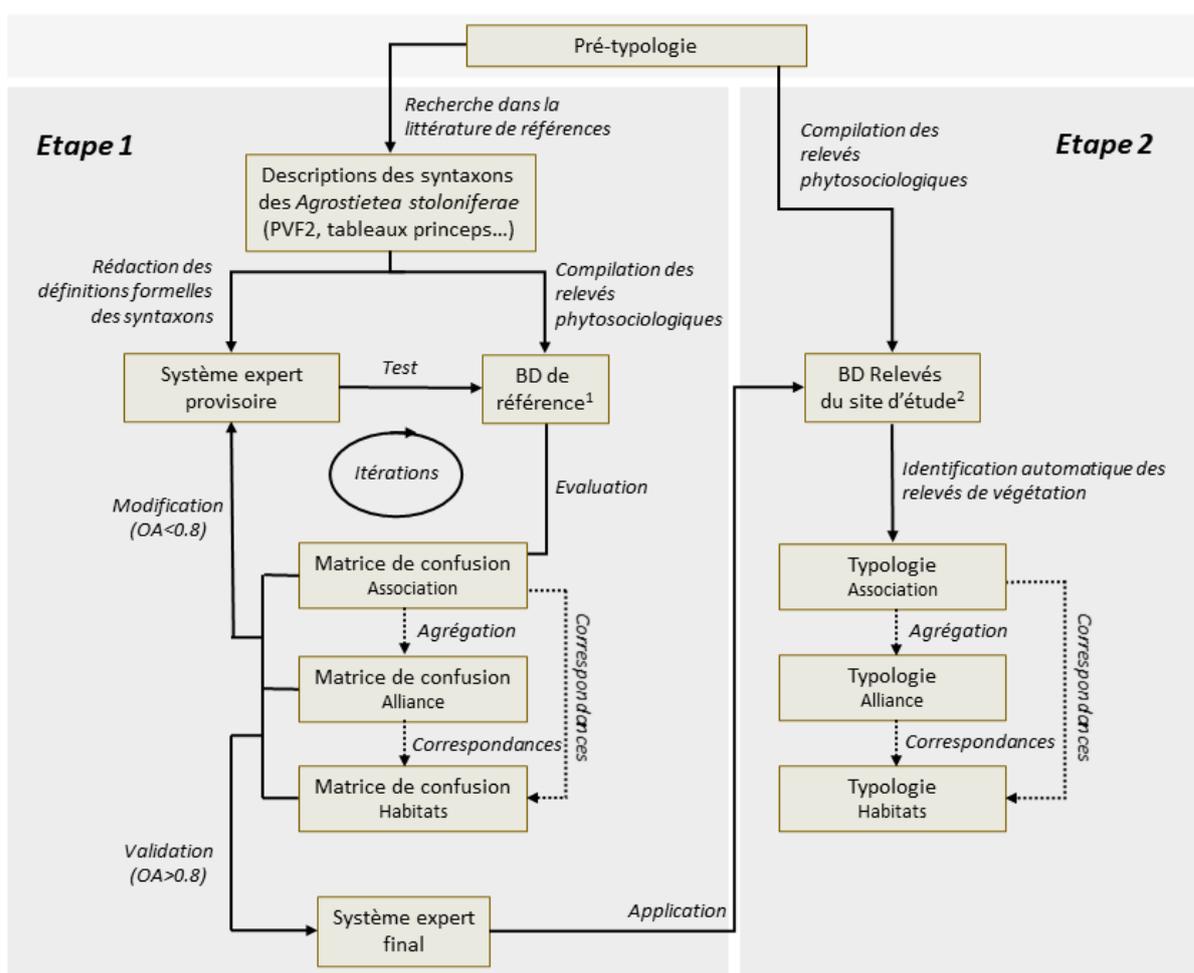
Le développement du système expert pour l'identification des habitats du site Natura 2000 a été réalisé en deux parties :

- Dans un premier temps, la démarche a été testée uniquement sur les prairies humides (partie 1.3.1). En effet, l'intérêt écologique du site réside en grande partie dans les surfaces importantes de prairies humides de la classe phytosociologique des *Agrostietea stoloniferae* (11 500 ha dans la dernière cartographie des habitats du site Natura 2000 datant de 2002) pour lesquelles de nombreux relevés ont été produits sur l'estuaire de la Loire. Ces prairies s'expriment sous une grande diversité de communautés végétales liée aux différents facteurs écologiques qui régissent ces végétations (inondation, salinité, pratiques agropastorales...) et présentent une proximité floristique les rendant particulièrement difficile à identifier.
- Dans un second temps, la méthodologie a été adaptée et extrapolée pour établir un système expert capable d'identifier la majorité des végétations de l'estuaire de la Loire (partie 1.3.2). L'objectif était de pouvoir établir un SE le plus complet possible sur la base de la pré-typologie afin de permettre une identification formalisée de la plupart des relevés phytosociologiques du jeu de données du site d'étude.

1.3.1 Expérimentation de la méthode ‘système expert’ pour l’identification des prairies humides de l’estuaire de la Loire

1.3.1.1 Méthode

Notre objectif étant de construire un système expert pour l’identification des prairies humides de l’estuaire de la Loire, nous avons structuré notre démarche méthodologique en deux étapes : (1) rédiger des définitions formelles du SE pour la classe des *Agrostietea stoloniferae* et les valider sur un jeu de données de référence ; (2) appliquer le SE sur les relevés de végétation de l’estuaire de la Loire. Cette approche est présentée dans la **figure 5**.



¹ Le jeu de données de référence correspond aux relevés holotypes et des tableaux princeps correspondant aux associations végétales identifiées sur l’estuaire de la Loire.

² Base de données de relevés de végétation compilées à partir des relevés disponibles dans la littérature relative à l’estuaire de la Loire.

Figure 5. Schéma de la démarche méthodologique adoptée pour élaborer le système expert des prairies humides de l’estuaire de la Loire

1.3.1.1.1 Etape 1 : Elaboration et validation du système expert

Elaboration du système expert

La pré-typologie phytosociologique des végétations de l'estuaire de la Loire nous a permis de recenser 2 ordres, 8 alliances et 14 associations végétales appartenant à la classe des *Agrostietea stoloniferae* (Annexe 02). A partir de cette liste de syntaxons, nous avons recherché des données de références concernant leurs descriptions à travers la littérature phytosociologique. Ces informations proviennent principalement de la synthèse française de la classe phytosociologique des *Agrostietea stoloniferae* (de Foucault & Catteau 2012) et des publications considérées comme faisant références dans cette synthèse (publications princeps décrivant les syntaxons et thèses). Ces données de références sont utilisées pour l'élaboration des formules logiques du SE. Ces formules sont constituées d'un ensemble de conditions basées sur des comparaisons de listes d'espèces discriminantes (##D), l'utilisation de listes d'espèces fonctionnelles (#TC), la présence de groupes d'espèces sociologiques (###) et des conditions de recouvrement minimum d'espèces et de groupes d'espèces (Tichý et al. 2019). Les tableaux synthétiques ont permis d'identifier les espèces les plus fréquemment associées à chaque unité de végétation afin d'établir les groupes d'espèces du système expert (##D et #TC). Les combinaisons caractéristiques d'espèces des associations végétales ont été utilisées pour former des groupes sociologiques (###). Des formules logiques ont été rédigées pour l'ensemble des unités phytosociologiques des *Agrostietea stoloniferae* identifiées dans la pré-typologie (de la classe aux associations végétales) (Kački et al. 2021).

Pour compléter le système expert, des formules logiques ont été ajoutées pour des classes phytosociologiques partageant un pool d'espèces en commun avec celle des *Agrostietea stoloniferae*. L'intégration de ces définitions supplémentaires doit permettre d'assurer une bonne distinction des relevés de la classe des *Agrostietea stoloniferae* vis-à-vis des relevés de classes proches floristiquement. Il s'agit notamment des classes des *Phragmito australis* – *Magnocaricetea elatae* et *Filipendulo ulmariae* – *Convolvuletea sepium* qui sont en lien dynamique avec les prairies des *Agrostietea stoloniferae* et qui partagent un lot important d'espèces hygrophiles (Delcoigne & Thebaud 2018; de Foucault 2011). C'est également le cas des classes des *Asteretea tripolii* ou des *Saginetea maritima* qui sont en contact avec les communautés les plus halophiles des *Agrostietea stoloniferae* et possèdent ainsi de nombreuses espèces en commun (de Foucault & Bioret 2010). Ces définitions supplémentaires n'ont été établies qu'au niveau des classes phytosociologiques et ont été définies à partir de listes

d'espèces discriminantes (##D) basées sur les informations contenues dans les synthèses françaises du prodrome des végétations de France et les listes d'espèces définies dans l'EuroVegChecklist (Mucina et al. 2016).

Le système expert possédant plusieurs niveaux syntaxonomiques, des degrés de priorités ont été utilisés dans les formules afin de chercher à identifier dans un premier temps les associations végétales, puis progressivement les niveaux supérieurs. Les relevés ne répondant à aucune définition sont signalés par le symbole '?' et les relevés répondant à plusieurs définitions par le symbole '+'. Le système expert a été préparé sous la forme d'un script TXT compatible avec le programme JUICE 7.1 (Tichý 2002) avec la dernière version des commandes et définitions du système expert (Tichý et al. 2019).

Tests et validation du système expert

Pour évaluer la capacité du système expert à identifier correctement les syntaxons et les habitats des prairies humides, un jeu de données de référence ('BD de référence') a été constitué à partir des relevés d'origine décrivant les associations végétales (tableaux princeps et tableaux décrivant les syntaxons). Ce jeu de données contient 768 relevés de végétation de référence et 245 espèces pour les 14 associations végétales de la classe des *Agrostietea stoloniferae* incluses dans la pré-typologie (Annexe 03). Le système expert a été appliqué sur l'ensemble du jeu de données de référence afin de tester sa précision. La qualité de la classification a été évaluée au moyen de matrices de confusion afin de comparer les attributions d'origine des relevés de la 'BD de référence' à celles issues de l'identification par le SE. Elles démontrent combien de relevés sont correctement classifiés et quelles sont les erreurs spécifiques (Labatut & Cherifi 2011; Congalton & Green 2019). La précision du producteur (PA)⁹ a été calculée pour connaître le pourcentage de relevés correctement identifiés pour chaque syntaxon et chaque habitat (Congalton 1991). L'indice de précision global (OA)¹⁰ a permis d'évaluer la qualité générale du SE (Stehman 1997; Smits et al. 1999). Il a été calculé à partir de la somme des relevés correctement classés divisée par le nombre total de relevés. La valeur de l'OA est comprise entre 0 lorsque qu'aucune identification n'est correcte, et 1 pour une correspondance parfaite de l'ensemble des données. Une valeur de l'OA inférieure à 0.8 (OA < 0.8) témoigne de résultats peu fiables (Rapinel et al. 2014; Zlinszky et al. 2014). Dans ce cas, les définitions ont

⁹ PA (de l'anglais *producer's accuracy*) : calculée pour chaque syntaxon et habitat en divisant le nombre de relevés correctement identifiés par le nombre total de relevés de référence

¹⁰ OA (de l'anglais *Overall accuracy*)

été complétées par des conditions supplémentaires et certaines listes d'espèces (##D ; #TC) ont été révisées et modifiées pour améliorer les résultats. Quand l'OA était supérieur à 0.8 (OA > 0.8), le SE était considéré comme précis et valide. La version finale du système expert ('système expert final') a été obtenue sur la base de multiples tests de classification avec des versions successives du système expert ('système expert provisoire'). La précision du système expert a été évaluée à l'échelle des associations végétales, des alliances et des habitats. À l'échelle des associations végétales, les attributions d'origine des relevés ont été directement comparées à celles issues de l'identification par le SE. À l'échelle des alliances, les relevés rattachés aux associations végétales ont été agrégés au niveau de leurs alliances respectives avant de procéder à leur comparaison. À l'échelle des habitats, les relevés ont été rattachés aux typologies EUNIS et EUR28 selon le référentiel français des typologies d'habitat et de végétation HABREF (Clair et al. 2019) avant de procéder à leur comparaison.

1.3.1.1.2 Etape 2 : Application du système expert sur le jeu de données du site d'étude

Le système expert validé ('système expert final') a été appliqué à l'ensemble des relevés phytosociologiques du site d'étude ('BD relevés du site d'étude') pour procéder à l'identification des prairies humides de l'estuaire de la Loire. Après le processus d'identification, les relevés appartenant aux mêmes habitats ont été regroupés en clusters et les espèces caractéristiques ont été définies. Nous utilisons ici le terme 'd'espèces caractéristiques' pour désigner les trois cas distincts d'espèces qui caractérisent les habitats : les espèces diagnostiques, constantes et dominantes (Chytrý & Tichý 2003; Tichý & Holt 2006). Les espèces diagnostiques ont été définies à partir du coefficient *phi* mesurant la fidélité des espèces à chaque unité (Sokal & Rohlf 1995; Chytrý et al. 2002). Les espèces avec des valeurs *phi* supérieures à 0.25 ont été considérées comme diagnostiques. Le test exact de Fisher ($p < 0,001$) a été utilisé pour éliminer les espèces dont la concentration d'occurrence n'était pas significative dans l'unité de végétation ciblée (Tichý & Chytry 2006). Les espèces constantes ont été définies comme celles dont la fréquence d'occurrence en pourcentage est supérieure à 35% et les espèces dominantes comme celles avec un recouvrement supérieur à 30% dans plus de 10% des relevés. Comme précisé par Rodríguez-Rojo et al. (2020), l'utilisation de listes d'espèces caractéristiques des syntaxons définies à partir d'une approche statistique peut être utile pour affiner, à une échelle locale, les listes d'espèces mentionnées dans les manuels de référence européens. Ainsi, nous avons comparé les espèces caractéristiques des habitats que nous avons définies à l'échelle du site avec (1) les espèces mentionnées dans les descriptions

officielles des habitats par l'Agence européenne pour l'environnement (EEA) pour les habitats EUNIS (Davies et al. 2004; <http://eunis.eea.europa.eu/habitats-code-browser.jsp>) et (2) avec les espèces caractéristiques listées dans le Manuel d'interprétation des habitats de l'UE (EUR28) (Commission européenne 2013; <https://eunis.eea.europa.eu/habitats-annex1-browser.jsp>).

1.3.1.2 Résultats

1.3.1.2.1 Elaboration et validation du système expert

A l'issue de plusieurs étapes itératives de tests sur le jeu de données de référence et d'évaluation à partir de matrices de confusion, nous avons obtenu une version du système expert dont l'indice de précision était supérieur à 80 % (OA > 0.8) à l'échelle des associations végétales (84%), à l'échelle des alliances (88%) et à celle des habitats (91%). La version finale du système expert contient 14 définitions formelles d'associations végétales, 8 définitions formelles d'alliances, 4 définitions formelles de sous-ordres, 2 définitions formelles d'ordres et 16 définitions formelles de classes.

Les matrices de confusion qui nous ont permis de valider le système expert final sont présentées dans la [figure 6](#).

A l'échelle des associations végétales, la qualité de la classification donne de bons résultats pour la plupart des syntaxons. Neuf associations végétales sont identifiées avec une précision supérieure à 80% (PA > 80%) : *Eleocharito palustris* – *Oenantheum fistulosae*: 96%, *Ranunculo ophioglossifolii* – *Oenantheum fistulosae*: 96%, *Potentillo anserinae* – *Alopecuretum geniculati*: 93%, *Pulicario dysentericae* – *Juncetum inflexi*: 91%, *Trifolio maritimi* – *Oenantheum silaifoliae*: 89%, *Hordeo secalini* – *Lolietum perennis*: 86%, *Carici divisae* – *Lolietum perennis*: 86%, *Senecioni aquatici* – *Oenantheum mediae*: 84%, *Gratiolo officinalis* – *Oenantheum fistulosae*: 81%. Les associations végétales de l'*Oenantheo peucedanifoliae* – *Brometum racemosi* et de l'*Agrostio stoloniferae* - *Caricetum vikingensis* sont reconnues avec une précision de 79%. Cependant, le système expert génère des confusions plus importantes pour trois associations végétales (PA < 50%) : *Cirsio arvensis* – *Alopecuretum pratensis*: 43 %, *Juncus acutiflori* – *Cynosuretum cristati*: 39% et *Plantagini majoris* - *Trifolietum resupinati*: 0%.

Référence	Associations végétales	Prédiction													Nb relevés	PA		
		EO	GO	RO	HL	OB	SO	AC	PJ	PT	CA	PA	JC	CL			TO	?
	<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i>	EO	64													3	67	96
	<i>Gratiolo officinalis</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i>	GO	2	96	8		6					1				6	119	81
	<i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i>	RO	2		74									1			77	96
	<i>Hordeu secalini</i> – <i>Lolietum perennis</i>	HL				25	1						3				29	86
	<i>Oenanthe peucedanifoliae</i> – <i>Brometum racemosi</i>	OB					15	1								3	19	79
	<i>Senecioni aquatici</i> – <i>Oenanthe mediae</i>	SO			1	1	92					1	1		6	7	109	84
	<i>Agrostio stoloniferae</i> – <i>Caricetum vikingensis</i>	AC						23								6	29	79
	<i>Pulicario dysentericae</i> – <i>Juncetum inflexi</i>	PJ	1		1				58						2	2	64	91
	<i>Plantagini majoris</i> – <i>Trifolietum resupinati</i>	PT								0				2	3		5	0
	<i>Cirsio arvensis</i> – <i>Alopecuretum pratensis</i>	CA			2							3	1		1		7	43
	<i>Potentillo anserinae</i> – <i>Alopecuretum geniculati</i>	PA			1										13		14	93
	<i>Junco acutiflori</i> – <i>Cynosuretum cristati</i>	JC	1		1	7	2		8					17		8	44	39
	<i>Carici divisae</i> – <i>Lolietum perennis</i>	CL			3											19	22	86
	<i>Trifolio maritimi</i> – <i>Oenanthe silaifoliae</i>	TO			4		1							13	145		163	89
																	OA	0.84

Référence	Alliances	Prédiction							Nb relevés	PA			
		RaO	Oen	LoT	Bro	Men	RaC	Pot			Alo	?	
	<i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i>	RaO	74	2					1			77	96
	<i>Oenanthe fistulosae</i>	Oen	8	167		6			1		4	186	90
	<i>Loto tenuis</i> – <i>Trifolium fragiferi</i>	LoT	3		23						3	29	79
	<i>Bromion racemosi</i>	Bro				139	1	1	9	7		157	89
	<i>Mentho longifoliae</i> – <i>Juncion inflexi</i>	Men		1		1	58		2	2		64	91
	<i>Ranunculo repentis</i> – <i>Cynosurion cristati</i>	RaC		1		15	9	21			5	51	41
	<i>Potentillion anserinae</i>	Pot				1			13	2	3	19	68
	<i>Alopecurion utriculati</i>	Alo		4		4					177	185	96
												OA	0.88

Référence	Habitats	Prédiction					Nb relevés	PA
		1410	/	/	/	?		
	EUR28	A2.523	A2.523	E3.41	E3.44	A2.5319		
	1410		258	6			3	267
	/		17	350	11		16	394
	/		2	3	71		2	78
	/		3			23	3	29
								OA
								0.91

1410 'Prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)'; A2.523 'Prés salés ras méditerranéens à *Juncus*, *Carex*, *Hordeum* et *Trifolium*'; E3.41 'Prairies atlantiques et subatlantiques humides'; E3.44 'Gazons inondés et communautés apparentées'; A2.5319 'Prés salés atlantiques à *Eleocharis*'

Figure 6. Matrices de confusion entre les données de référence (en ligne) et les prédictions du SE (en colonne) à l'échelle des associations végétales (a), des alliances (b) et des habitats (EUR28 et EUNS) (c).

A l'échelle des alliances, 5 syntaxons ont une précision supérieure à 80% : *Ranunculo ophioglossifolii* – *Oenanthe fistulosae*: 96%, *Alopecurion utriculati*: 96%, *Mentho longifoliae* – *Juncion inflexi*: 91%, *Oenanthe fistulosae*: 90% et *Bromion racemosi*: 89%. L'alliance du *Loto tenuis* – *Trifolium fragiferi* est reconnue avec une précision de 79%. Les confusions les plus importantes concernent le *Potentillion anserinae*: 68% et le *Ranunculo repentis* – *Cynosurion cristati*: 41%.

A l'échelle des habitats, les taux de précision sont très élevés pour l'habitat d'intérêt communautaire 1410 'Prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)': 97% et les habitats

EUNIS E3.44 et E3.41 avec respectivement 92% et 89% de PA. L'habitat EUNIS A2.5319 présente un taux de précision légèrement inférieur avec 79%.

Ainsi, nos résultats montrent que la qualité globale de prédiction (OA) s'améliore progressivement en remontant dans les niveaux hiérarchiques de la classification, depuis l'échelle des associations végétales (84%), puis à l'échelle des alliances (88%) et à celle des habitats (91%).

1.3.1.2.2 Identification des prairies humides du site d'étude

L'application du système expert sur le jeu de données de relevés phytosociologiques de l'estuaire de la Loire a permis d'identifier 1 108 relevés se rattachant à la classe des *Agrostietea stoloniferae* (soit 58,4% de l'ensemble des relevés recueillis sur le site d'étude). Parmi ces relevés, 718 sont rattachés à l'échelle de l'association végétale ou de l'alliance, ce qui a permis de les rattacher à un habitat.

Syntaxons identifiés sur le site d'étude

673 relevés ont été identifiés à l'échelle de l'association végétale et 44 ont été identifiés à l'échelle de l'alliance, caractérisant respectivement 12 associations végétales et 8 alliances (Tab. 2). Les 435 relevés restant sont identifiés à des niveaux supérieurs à l'alliance (396 relevés au niveau du sous-ordre et 39 relevés au niveau de la classe).

44 relevés ne sont identifiés qu'au niveau de l'alliance et se répartissent au sein de 5 alliances (clusters marqués par '*' dans le tableau 2) : *Oenanthion fistulosae* (19 relevés), *Ranunculo ophioglossifolii* – *Oenanthion fistulosae* (14 relevés), *Loto tenuis* – *Trifolion fragiferi* (5 relevés), *Bromion racemosi* (4 relevés) et *Potentillion anserinae* (2 relevés).

Ainsi, les alliances les mieux représentées sur l'estuaire de la Loire sont l'*Alopecurion utriculati* (283 relevés), le *Bromion racemosi* (170 relevés), le *Ranunculo ophioglossifolii* – *Oenanthion fistulosae* (134 relevés), l'*Oenanthion fistulosae* (99 relevés). Les autres alliances sont représentées par très peu de relevés : le *Potentillion anserinae* (19 relevés), le *Ranunculo reptans* – *Cynosurion cristati* (6 relevés), le *Loto tenuis* – *Trifolion fragiferi* (5 relevés) et le *Mentho* – *Juncion inflexi* (1 relevés).

Tableau 2. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des prairies humides identifiées sur le site Natura 2000. Les espèces diagnostiques (avec la valeur phi > 0,25) sont surlignées en gris et celles très diagnostiques en gris foncé (avec phi > 0,50)). La fidélité a été calculée en utilisant l'ensemble des 1 899 relevés, comprenant à la fois les prairies humides et les autres types de végétation de la zone d'étude. Les espèces dont la fréquence est inférieure à 10 % dans toutes les colonnes du tableau ne sont pas affichées.

Les noms d'alliances sont codifiés : Alo: *Alopecurion utriculati* ; RaO: *Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthion fistulosae* ; LoT: *Loto tenuis – Trifolium fragiferi* ; Bro: *Bromion racemosi* ; Oen : *Oenanthion fistulosae* ; RaC : *Ranunculo repentis – Cynosurion cristati* ; Pot: *Potentillion anserinae* ; MeJ: *Mentho longifoliae – Juncion inflexi*.

Les noms d'associations sont codifiés: TO: *Trifolio maritimi – Oenanthetum silaifoliae* ; CL: *Carici divisae – Lolietum perennis* ; RO: *Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthetum fistulosae* ; SO: *Senecioni aquatici – Oenanthetum mediae* ; HL: *Hordeo secalini – Lolietum perennis* ; OB: *Oenantho peucedanifoliae – Brometum racemosi* ; EO: *Eleocharito palustris – Oenanthetum fistulosae* ; GO: *Gratiolo officinalis – Oenanthetum fistulosae* ; JC: *Juncus acutiflori – Cynosuretum cristati* ; CA: *Cirsio arvensis – Alopecuretum pratensis* ; PA: *Potentillo anserinae – Alopecuretum geniculati* ; PJ: *Pulicario dysentericae – Juncetum inflexi* ;

* : groupes de relevés sans rattachement à l'échelle de l'association végétale mais identifiés à l'échelle de l'alliance.

Habitats EUNIS	A2.523				A2.5319	E3.41								E3.44			
Habitats EUR28	1410																
Alliances	Alo		RaO		LoT	Bro				Oen			RaC		Pot	MeJ	
Associations végétales	TO	CL	RO	*	*	SO	HL	OB	*	EO	GO	*	JC	CA	PA	*	PJ
Nombre de relevés identifiés	214	69	120	14	5	97	68	1	4	78	2	19	5	1	18	2	1
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant les habitat EUR28 1410 'Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>) et EUNIS A2.523 'Prés salés ras méditerranéens <i>Juncus</i>, <i>Carex</i>, <i>Hordeum</i> et <i>Trifolium</i>'																	
<i>Oenanthe silaifolia</i>	83	49	39	.	.	84	16	.	.	14	50	63	.	.	6	.	100
<i>Bromus racemosus</i>	66	43	13	.	.	59	29	100	.	8	.	37	.	.	.	.	.
<i>Gaudinia fragilis</i>	63	22	3	.	.	38	26	100	.	.	.	5	.	.	.	.	.
<i>Hordeum secalinum</i>	78	78	20	.	.	64	65	.	.	5	.	42	.	.	28	.	100
<i>Alopecurus bulbosus</i>	73	77	48	7	20	46	15	.	.	15	.	53	.	.	17	.	.
<i>Trifolium squamosum</i>	71	61	11	29	.	21	3	.	.	.	.	11	20	.	.	.	.
<i>Carex divisa</i>	84	83	53	7	20	7	7	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Trifolium michelianum</i>	19	.	56	.	.	.	1	.	.	6	50	11	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus ophioglossifolius</i>	.	.	27	14	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Galium debile</i>	1	.	14	.	.	.	.	.	.	6	.	.	.	.	.	.	.
<i>Glyceria declinata</i>	.	.	8	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Eleocharis uniglumis</i>	2	.	38	43	20	6	1	.	.	14	.	16	.	.	.	.	.
<i>Bolboschoenus maritimus</i>	1	3	13	64	60	.	.	.	.	1	.	.	.	.	11	.	.
<i>Juncus maritimus</i>	2	1	1	21	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sonchus maritimus</i>	.	.	1	14	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS A2.5319 'Prés salés atlantiques à <i>Eleocharis</i>'																	
<i>Triglochin maritima</i>	1	3	2	29	80	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant les habitat EUNIS A2.523 et EUNIS A2.5319 (marais salés côtiers)

<i>Juncus gerardi</i>	18	49	29	64	100	1	6	.	.
-----------------------	----	----	----	----	-----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS E3.41 'Prairies atlantiques et subatlantiques humides'

<i>Bromus hordeaceus</i>	1	1	.	.	.	.	10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Glyceria fluitans</i>	.	3	34	14	.	.	1	.	.	62	50	16	.	.	17	50	.
<i>Eleocharis palustris</i>	1	1	48	29	20	6	.	.	.	73	100	53	.	.	39	.	.
<i>Ranunculus flammula</i>	1	1	22	7	.	6	.	.	.	60	100	21	60	.	6	.	.
<i>Juncus articulatus</i>	1	1	3	.	.	2	.	.	.	15	.	5	.	.	.	.	.
<i>Myosotis laxa s. cespitosa</i>	3	.	19	.	20	2	1	.	.	5	100	11	.	.	.	.	.
<i>Carex acuta</i>	1	.	4	.	.	.	1	.	.	12	.	21	.	.	6	.	.
<i>Ranunculus repens</i>	10	7	25	.	.	43	34	100	50	46	50	84	80	.	17	.	.
<i>Oenanthe fistulosa</i>	12	13	65	36	40	11	.	.	.	40	100	68	20	.	.	.	.
<i>Lotus pedunculatus</i>	2	3	2	.	.	3	6	.	.	1	.	11	60	.	.	.	.
<i>Agrostis canina</i>	12	4	3	.	.	4	4	.	25	5	.	.	60	.	.	.	.
<i>Juncus effusus</i>	1	1	5	7	.	10	10	.	50	42	.	5	80	.	.	.	.
<i>Juncus acutiflorus</i>	1	.	8	7	.	4	3	100	.	19	.	.	60	.	.	.	.
<i>Argentina anserina</i>	3	12	6	29	20	3	13	.	.	62	.	11	80	100	22	.	.
<i>Carex leporina</i>	.	.	1	.	.	2	.	100	.	3	.	.	40	.	.	.	.

Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat E3.44 'Gazons inondés et communautés apparentées'

<i>Alopecurus geniculatus</i>	1	16	42	36	.	6	7	.	.	62	.	32	20	.	89	100	.
-------------------------------	---	----	----	----	---	---	---	---	---	----	---	----	----	---	----	-----	---

Autres espèces diagnostiques

<i>Jacobaea aquatica</i>	66	35	32	.	20	69	10	.	.	19	50	74	20
--------------------------	----	----	----	---	----	----	----	---	---	----	----	----	----	---	---	---	---

Autres espèces

<i>Agrostis stolonifera</i>	52	72	72	93	100	58	79	100	75	96	100	68	60	100	100	50	.
<i>Lolium perenne</i>	77	90	36	.	20	81	84	100	75	24	.	58	.	100	61	100	100
<i>Poa trivialis</i>	65	54	30	.	.	79	90	.	75	54	50	79	80	.	39	50	100
<i>Ranunculus acris</i>	53	20	2	.	.	70	82	100	50	4	.	16	80	100	6	.	100
<i>Alopecurus pratensis</i>	66	.	5	.	.	74	66	.	75	18	50	63	20	100	.	.	100
<i>Holcus lanatus</i>	65	30	9	.	.	67	62	100	100	6	.	5	60	.	.	.	100
<i>Cynosurus cristatus</i>	70	33	3	.	.	71	51	100	75	3	.	11	40	.	6	.	100
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	59	26	9	14	.	65	44	100	50	9	.	5	80	.	.	.	100
<i>Ranunculus sardous</i>	40	52	68	.	20	18	31	.	25	36	.	47	.	.	72	50	100
<i>Trifolium repens</i>	12	13	8	.	.	36	46	100	25	29	.	32	20	.	17	.	100
<i>Trifolium fragiferum</i>	34	20	30	.	60	32	22	.	.	32	.	42	20	100	6	.	.
<i>Rumex crispus</i>	16	9	21	21	20	15	18	100	25	13	.	.	20	.	61	50	.
<i>Carex otrubae</i>	15	28	23	21	40	22	19	.	.	31	.	53	.	.	33	.	100
<i>Elytrigia repens</i>	45	48	27	29	60	16	24	.	25	13	.	5	.	.	11	.	.
<i>Carex hirta</i>	2	4	4	14	.	9	16	.	.	8	.	.	40	100	6	.	100

<i>Trifolium pratense</i>	39	6	2	.	.	51	35	100	25	.	.	5	.	.	.	.	.
<i>Cirsium arvense</i>	8	6	.	.	.	12	46	.	25	4	.	5	40	.	11	.	100
<i>Scorzoneroides autumnalis</i>	26	7	12	.	.	26	12	.	50	15	50	21	20	.	11	.	.
<i>Plantago lanceolata</i>	5	1	3	7	.	20	13	100	25	1	50	11	.	.	.	.	.
<i>Lychnis flos-cuculi</i>	31	.	3	.	.	21	4	.	25	1	50	.	.	.	.	.	100
<i>Hypochaeris radicata</i>	18	.	1	.	.	15	19	100	25	1	.	.	.	.	.	50	.
<i>Rumex conglomeratus</i>	1	1	4	7	.	4	1	.	25	3	50	11	20	.	.	.	100
<i>Phalaris arundinacea</i>	1	.	14	.	.	6	6	.	.	41	100	47	.	.	11	.	.
<i>Carex disticha</i>	1	4	8	.	.	15	4	.	.	33	.	5	.	100	.	.	.
<i>Cerastium fontanum s. vulgare</i>	1	.	.	.	.	4	10	100	25	.	.	5	20	.	.	.	.
<i>Anacamptis laxiflora</i>	25	.	3	.	.	24	1	100	.	.	.	11	.	.	.	.	.
<i>Juncus inflexus</i>	2	12	3	.	.	1	10	.	.	6	.	.	.	.	28	.	100
<i>Persicaria amphibia</i>	3	6	13	.	.	11	10	.	.	37	50	26	.	.	.	.	.
<i>Trifolium dubium</i>	23	.	5	.	.	18	6	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Phragmites australis</i>	6	9	13	29	40	1	3	.	.	3	.	37	.	.	11	.	.
<i>Glyceria maxima</i>	.	.	7	.	.	.	.	.	.	21	.	.	.	100	17	.	.
<i>Potentilla reptans</i>	5	.	1	.	.	11	19	.	.	1	.	.	.	100	6	.	.
<i>Galium palustre</i>	2	.	11	7	.	15	.	.	.	24	50	32	.	.	.	.	.
<i>Lotus glaber</i>	21	13	6	21	40	19	12	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Bellis perennis</i>	29	9	2	.	.	19	22	.	25	.	.	5	20	.	.	.	.
<i>Carex riparia</i>	1	1	6	.	.	3	4	.	.	19	50	16	20	.	11	.	.
<i>Lysimachia nummularia</i>	6	4	3	.	.	1	3	.	.	8	.	.	.	.	.	.	100
<i>Scorzonera humilis</i>	7	3	.	.	.	2	1	100	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Juncus conglomeratus</i>	1	.	1	.	.	5	1	100	.	.	.	.	.	.	6	.	.
<i>Plantago major</i>	1	10	.	7	20	1	6	.	.	1	.	.	.	.	17	50	.
<i>Centaurea nigra</i>	4	.	1	.	.	7	1	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Rumex acetosa</i>	7	.	.	.	.	20	13	.	50	.	.	.	20	.	.	.	.
<i>Lotus corniculatus</i>	1	3	.	.	.	16	10	.	50	1	.	5	20	.	.	.	.
<i>Geranium dissectum</i>	6	.	.	.	.	7	18	.	25	.	.	5	40	.	.	.	.
<i>Equisetum fluviatile</i>	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.
<i>Deschampsia cespitosa</i>	.	.	.	7	.	.	10	.	25	6	.	.	40	.	6	.	.
<i>Achillea ptarmica</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	25	.	50	.	.	.	.	.	.
<i>Iris pseudacorus</i>	1	.	2	.	.	.	1	.	.	3	50	.	.	.	17	.	.
<i>Cardamine pratensis</i>	3	.	3	.	.	6	3	.	25	8	.	5	20	.	.	.	.
<i>Persicaria maculosa</i>	1	.	4	.	.	1	.	.	.	9	50	5	.	.	.	.	.
<i>Atriplex prostrata</i>	.	3	3	7	40	.	1	.	.	1	.	.	.	.	11	.	.
<i>Taraxacum officinale</i>	2	1	.	.	.	4	9	.	25	4	.	.	20	.	.	.	.
<i>Carex species</i>	1	.	.	.	20	1	1	.	25	5	.	5	.	.	6	.	.
<i>Poa annua</i>	1	3	2	.	.	.	1	.	.	1	.	5	.	.	.	50	.
<i>Lysimachia maritima</i>	1	.	.	21	40	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Althaea officinalis</i>	2	12	2	7	20	.	4	.	.	3	.	.	.	.	11	.	.
<i>Ranunculus sceleratus</i>	.	1	1	.	.	.	.	.	.	3	.	.	.	.	6	50	.
<i>Trifolium resupinatum</i>	14	20	10	14	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Polygonum aviculare</i>	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	6	50	.
<i>Rumex species</i>	.	.	1	.	.	2	1	.	.	1	.	.	.	.	.	50	.
<i>Trifolium species</i>	1	1	3	.	.	7	4	.	.	6	.	16	.	.	17	.	.
<i>Juncus bufonius</i>	1	.	1	.	.	2	.	.	.	1	.	.	.	.	.	50	.
<i>Schedonorus arundinaceus</i>	6	6	.	.	.	6	13	.	.	.	.	.	.	.	22	.	.

<i>Gratiola officinalis</i>	.	.	2	.	.	.	.	.	.	50	.	.	.	.	.	.	.
<i>Plantago coronopus</i>	2	10	.	.	40	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Matricaria discoidea</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	50	.
<i>Mentha pulegium</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	50	.	.	.	.	.	.	.
<i>Dactylis glomerata</i>	1	1	.	.	.	2	19	.	25	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lysimachia vulgaris</i>	.	.	3	.	.	2	.	.	.	3	.	16	20	.	.	.	.
<i>Bromus commutatus</i>	4	16	4	.	.	2	6	.	.	.	.	5	.	.	6	.	.
<i>Hordeum marinum</i>	.	6	1	14	20	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Tripolium pannonicum</i>	.	1	.	.	40	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus bulbosus</i>	4	4	1	14	.	8	3	.	.	.	.	.	.	.	6	.	.
<i>Cirsium dissectum</i>	6	1	4	.	.	3	.	.	.	1	.	5	20	.	.	.	.
<i>Leucanthemum vulgare</i>	5	.	.	.	.	5	3	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Vulpia bromoides</i>	14	9	1	.	.	7	4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Arrhenatherum elatius</i>	1	.	.	.	.	3	6	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Agrostis capillaris</i>	11	4	.	.	.	11	6	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.
<i>Taraxacum species</i>	1	.	.	.	.	7	7	.	.	1	.	5	.	.	11	.	.
<i>Persicaria species</i>	.	.	5	.	.	7	3	.	.	5	.	.	.	.	11	.	.
<i>Convolvulus sepium</i>	.	1	1	.	.	4	12	.	.	5	.	.	.	.	6	.	.
<i>Centaurea decipiens s. thuillieri</i>	12	.	.	.	.	10	4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Convolvulus arvensis</i>	.	1	.	.	20	1	4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	.	.	1	.	20	.	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.
<i>Phleum pratense</i>	1	1	.	.	.	3	6	.	.	1	.	11	.	.	.	.	.
<i>Spergula marina</i>	.	3	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Puccinellia maritima</i>	.	3	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Chamaemelum nobile</i>	.	.	7	14	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cyperus eragrostis</i>	.	.	7	14	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lathyrus nissolia</i>	10	1	2	.	.	4	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Parapholis strigosa</i>	.	.	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Salicornia appressa</i>	.	.	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cirsium palustre</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	20	.	.	.	.	.
<i>Plantago major s. pleiosperma</i>	.	.	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sonchus oleraceus</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	20	.	.	.	.	.
<i>Leontodon species</i>	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	20	.	.	.	.	.
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	.	.	1	.	.	.	.	.	.	3	.	.	.	.	11	.	.

Parmi les unités identifiées, les associations végétales les mieux représentées sont le *Trifolium maritimi* – *Oenanthe silaifoliae* (214 relevés), le *Ranunculo ophioglossifolii* – *Oenanthe fistulosae* (120 relevés), le *Senecioni aquatici* – *Oenanthe mediae* (97 relevés), le *Eleocharito palustris* – *Oenanthe fistulosae* (78 relevés), le *Carici divisae* – *Lolietum perennis* (69 relevés) et l'*Hordeo secalini* – *Lolietum perennis* (68 relevés). Les associations restantes sont représentées par très peu de relevés : le *Potentillo anserinae* – *Alopecuretum geniculati* (17 relevés), le *Junco acutiflori* – *Cynosuretum cristati* (5 relevés), le *Gratiolo officinalis* – *Oenanthe fistulosae* (2 relevés), le *Oenanthe peucedanifoliae* – *Brometum*

racemosi (1 relevé), le *Pulicario dysentericae* – *Juncetum inflexi* (1 relevé) et le *Cirsio arvensis* – *Alopecuretum pratensis* (1 relevé).

Habitats identifiés sur le site d'étude

Les relevés identifiés aux échelles des associations végétales et des alliances ont été mis en correspondance avec les typologies d'habitats permettant de caractériser 4 habitats EUNIS dont 1 habitat d'intérêt communautaire (Tab. 3). Les deux habitats les mieux représentés sont l'habitat EUNIS A2.523 correspondant à l'habitat EUR28 1410 et l'habitat EUNIS E3.41 représentés respectivement par 417 et 275 relevés. Les autres habitats correspondent aux habitats EUNIS E3.44 et EUNIS A2.5319 représentés respectivement par 21 et 5 relevés.

Tableau 3. Tableau synoptique en pourcentage de fréquence des espèces diagnostiques des habitats des prairies humides identifiés sur le site d'étude. Les espèces diagnostiques (avec la valeur phi > 0,25) sont surlignées en gris et celles très diagnostiques en gris foncé (avec phi > 0,50)). La fidélité a été calculée en utilisant l'ensemble des 1 899 relevés, comprenant à la fois les prairies humides et les autres types de végétation de la zone d'étude. Les espèces dont la fréquence est inférieure à 10 % dans toutes les colonnes du tableau ne sont pas affichées

Habitats EUR28	1410	-	-	-
Habitats EUNIS	A2.523	E3.41	E3.44	A2.5319
Nombre de relevés identifiés	417	275	21	5
Espèces diagnostiques des habitats EUR28 1410 'Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)' et EUNIS A2.523 'Prés salés ras méditerranéens <i>Juncus</i>, <i>Carex</i>, <i>Hordeum</i> et <i>Trifolium</i>'				
<i>Carex divisa</i>	72	5	.	20
<i>Trifolium squamosum</i>	51	9	.	.
<i>Oenanthe silaifolia</i>	62	42	10	.
<i>Alopecurus bulbosus</i>	64	28	14	20
<i>Trifolium michelianum</i>	26	3	.	.
<i>Bromus racemosus</i>	45	33	.	.
<i>Gaudinia fragilis</i>	37	21	.	.
<i>Hordeum secalinum</i>	59	43	29	.
<i>Trifolium resupinatum</i>	14	1	.	.
<i>Jacobaea aquatica</i>	49	38	.	20
Espèces diagnostiques de l'habitat EUNIS E3.41 'Prairies atlantiques et subatlantiques humides'				
<i>Alopecurus pratensis</i>	35	54	5	.
<i>Poa trivialis</i>	51	74	43	.
<i>Ranunculus acris</i>	31	50	10	.
<i>Ranunculus repens</i>	14	45	14	.
<i>Juncus effusus</i>	2	21	.	.

<i>Trifolium repens</i>	10	36	19	.
<i>Carex disticha</i>	3	17	.	.
<i>Trifolium pratense</i>	21	28	.	.
<i>Ranunculus flammula</i>	7	23	5	.
<i>Persicaria amphibia</i>	6	19	.	.
Espèces diagnostiques de l'habitat EUNIS E3.44 'Gazons inondés et communautés apparentées'				
<i>Alopecurus geniculatus</i>	16	24	86	.
<i>Rumex crispus</i>	16	15	57	20
<i>Ranunculus sardous</i>	49	28	71	20
Espèces diagnostiques de l'habitat EUNIS A2.5319 'Prés salés atlantiques à <i>Eleocharis</i>'				
<i>Triglochin maritima</i>	2	.	.	80
<i>Juncus gerardi</i>	28	1	5	100
Autres espèces diagnostiques				
<i>Cynosurus cristatus</i>	42	41	10	.
<i>Holcus lanatus</i>	41	44	5	.
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	38	39	5	.
Autres espèces				
<i>Lolium perenne</i>	65	62	67	20
<i>Agrostis stolonifera</i>	62	76	90	100
<i>Elytrigia repens</i>	40	16	10	60
<i>Trifolium fragiferum</i>	29	29	5	60
<i>Oenanthe fistulosa</i>	28	21	.	40
<i>Carex otrubae</i>	20	25	33	40
<i>Scorzoneroides autumnalis</i>	18	19	10	.
<i>Bellis perennis</i>	17	13	.	.
<i>Lychnis flos-cuculi</i>	17	9	5	.
<i>Eleocharis palustris</i>	15	27	33	20
<i>Lotus glaber</i>	15	9	.	40
<i>Anacamptis laxiflora</i>	14	10	.	.
<i>Eleocharis uniglumis</i>	14	8	.	20
<i>Trifolium dubium</i>	13	8	.	.
<i>Glyceria fluitans</i>	11	19	19	.
<i>Hypochaeris radicata</i>	10	11	5	.
<i>Phragmites australis</i>	9	4	10	40
<i>Myosotis laxa s. cespitosa</i>	7	4	.	20
<i>Argentina anserina</i>	6	24	19	20
<i>Bolboschoenus maritimus</i>	6	1	10	60
<i>Cirsium arvense</i>	5	18	14	.
<i>Galium palustre</i>	5	15	.	.
<i>Phalaris arundinacea</i>	4	19	10	.
<i>Plantago lanceolata</i>	4	12	.	.
<i>Carex hirta</i>	4	11	10	.

<i>Rumex acetosa</i>	4	11	.	.
<i>Juncus inflexus</i>	4	5	29	.
<i>Schedonorus arundinaceus</i>	4	5	19	.
<i>Althaea officinalis</i>	4	2	10	20
<i>Carex riparia</i>	3	9	10	.
<i>Plantago coronopus</i>	3	.	.	40
<i>Trifolium species</i>	2	7	14	.
<i>Glyceria maxima</i>	2	6	14	.
<i>Plantago major</i>	2	2	19	20
<i>Hordeum marinum</i>	2	1	.	20
<i>Lotus corniculatus</i>	1	10	.	.
<i>Taraxacum species</i>	1	5	10	.
<i>Persicaria species</i>	1	5	10	.
<i>Carex species</i>	1	3	5	20
<i>Iris pseudacorus</i>	1	1	14	.
<i>Atriplex prostrata</i>	1	1	10	40
<i>Ranunculus sceleratus</i>	1	1	10	.
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	1	1	10	.
<i>Hydrocotyle vulgaris</i>	1	1	.	20
<i>Convolvulus arvensis</i>	1	1	.	20
<i>Tripolium pannonicum</i>	1	.	.	40
<i>Lysimachia maritima</i>	1	.	.	40
<i>Puccinellia maritima</i>	1	.	.	20
<i>Spergula marina</i>	1	.	.	20
<i>Polygonum aviculare</i>	.	1	10	.
<i>Plantago major s. pleiosperma</i>	.	.	.	20
<i>Salicornia appressa</i>	.	.	.	20
<i>Parapholis strigosa</i>	.	.	.	20

Les espèces diagnostiques, constantes et dominantes ont été caractérisées pour chaque habitat à partir du [tableau 3](#). Elles sont présentées et comparées avec les listes d'espèces des descriptions officielles des habitats EUNIS et EUR28 dans le [tableau 4](#).

Tableau 4. Présentation des habitats des prairies humides identifiés sur le site d'étude avec leurs espèces caractéristiques (espèces diagnostiques, constantes et dominantes) calculées à partir des relevés du site d'étude et comparaison avec les espèces mentionnées dans les descriptions officielles des habitats de l'Union Européenne (EUNIS et EUR28). Les espèces diagnostiques les plus fidèles ($\phi > 0,50$) sont marquées en gras et les espèces constantes les plus fréquentes (fréquence d'occurrence supérieure à 60 %) sont marquées en gras. Les espèces avec '*' et '°' indiquent les espèces mentionnées dans les descriptions des habitats, respectivement pour les habitats EUNIS et EUR28.

Habitat	Espèces caractéristiques déterminées sur le site d'étude	Espèces mentionnées dans les descriptions des habitats EUNIS (Davies et al. 2004; http://eunis.eea.europa.eu/habitats-code-browser.jsp)	Espèces mentionnées dans le Manuel d'interprétation des habitats de l'UE (EUR28) (European Commission 2013)
<p>EUNIS : A2.523 - Prés salés ras méditerranéens à <i>Juncus</i>, <i>Carex</i>, <i>Hordeum</i> et <i>Trifolium</i></p> <p>EUR28 : 1410 - Prés salés atlantiques (<i>Juncetalia maritimi</i>)</p> <p>Nombre de relevés identifiés sur le site d'étude: 417</p>	<p>Espèces diagnostiques : <i>Carex divisa</i>*, <i>Trifolium squamosum</i>*, <i>Oenanthe silaifolia</i>, <i>Alopecurus bulbosus</i>°, <i>Trifolium michelianum</i>°, <i>Bromus racemosus</i>, <i>Gaudinia fragilis</i>, <i>Hordeum secalinum</i>, <i>Trifolium resupinatum</i>, <i>Jacobaea aquatica</i>, <i>Cynosurus cristatus</i>, <i>Holcus lanatus</i>, <i>Anthoxanthum odoratum</i></p> <p>Espèces constantes : <i>Carex divisa</i>*, <i>Lolium perenne</i>, <i>Alopecurus bulbosus</i>*, <i>Oenanthe silaifolia</i>, <i>Agrostis stolonifera</i>, <i>Hordeum secalinum</i>, <i>Trifolium squamosum</i>°, <i>Poa trivialis</i>, <i>Ranunculus sardous</i>, <i>Jacobaea aquatica</i>, <i>Bromus racemosus</i>, <i>Cynosurus cristatus</i>, <i>Holcus lanatus</i>, <i>Elytrigia repens</i>, <i>Anthoxanthum odoratum</i>, <i>Gaudinia fragilis</i></p> <p>Espèces dominantes : <i>Agrostis stolonifera</i></p>	<p><i>Carex divisa</i>, <i>Carex extensa</i>, <i>Hordeum marinum</i>, <i>Juncus gerardi</i>, <i>Schoenus nigricans</i>, <i>Triglochin maritima</i></p>	<p><i>Juncus maritimus</i>, <i>J. acutus</i>, <i>Carex extensa</i>, <i>Tripolium pannonicum</i>, <i>Plantago cornuti</i>, <i>Scorzonera parviflora</i>, <i>Merendera sobolifera</i>, <i>Taraxacum bessarabicum</i>, <i>Samolus valerandi</i>, <i>Hordeum nodosum</i>, <i>H. marinum</i>, <i>Trifolium squamosum</i>, <i>T. michelianum</i>, <i>Alopecurus bulbosus</i>, <i>Carex divisa</i>, <i>Ranunculus ophioglossifolius</i>, <i>Linum maritimum</i>, <i>Plantago crassifolia</i>, <i>Blackstonia imperfoliata</i>, <i>Centaurium tenuiflorum</i>, <i>Orchis coriophora</i> ssp. <i>fragans</i>, <i>Puccinellia fasciculata</i>, <i>Aeluropus litoralis</i>, <i>Juncus gerardi</i>, <i>Puccinellia festuciformis</i>, <i>Artemisia coerulescens</i>, <i>Eleocharis palustris</i>, <i>Puccinellia gigantea</i>, <i>Arthrocnemum macrostachyum</i>, <i>Aeluropus litoralis</i>, <i>Centaurium spicatum</i>, <i>Cressa cretica</i>, <i>Crypsis factorofskyi</i>, <i>Crypsis schoenoides</i>, <i>Glinus lotoides</i>, <i>Limonium echinoides</i>, <i>Parapholis marginata</i>, <i>Schoenoplectus litoralis</i>, <i>Spergula marina</i>, <i>Sphenopus divaricatus</i>, <i>Suaeda vera</i>.</p>
<p>EUNIS : E3.44 - Prairies atlantiques et subatlantiques humides</p> <p>EUR28 : -</p> <p>Nombre de relevés identifiés sur le site d'étude: 275</p>	<p>Espèces diagnostiques : <i>Alopecurus pratensis</i>*, <i>Poa trivialis</i>, <i>Ranunculus acris</i>*, <i>Ranunculus repens</i>, <i>Juncus effusus</i>*, <i>Trifolium repens</i>, <i>Holcus lanatus</i>*, <i>Carex disticha</i>, <i>Anthoxanthum odoratum</i>, <i>Cynosurus cristatus</i>, <i>Trifolium pratense</i>, <i>Ranunculus flammula</i>, <i>Persicaria amphibia</i></p> <p>Espèces constantes : <i>Agrostis stolonifera</i>, <i>Poa trivialis</i>, <i>Lolium perenne</i>, <i>Alopecurus pratensis</i>*, <i>Ranunculus acris</i>*, <i>Ranunculus repens</i>, <i>Holcus lanatus</i>*, <i>Hordeum secalinum</i>, <i>Oenanthe silaifolia</i>*, <i>Cynosurus cristatus</i>, <i>Anthoxanthum odoratum</i>, <i>Jacobaea aquatica</i>*, <i>Trifolium repens</i></p> <p>Espèces dominantes : <i>Agrostis stolonifera</i></p>	<p><i>Alopecurus pratensis</i>, <i>Angelica sylvestris</i>, <i>Bromus racemosus</i>, <i>Caltha palustris</i>, <i>Carduus personata</i>, <i>Carex cespitosa</i>, <i>Cirsium oleraceum</i>, <i>Cirsium palustre</i>, <i>Cirsium rivulare</i>, <i>Crepis paludosa</i>, <i>Dactylorhiza majalis</i>, <i>Deschampsia cespitosa</i>, <i>Epilobium parviflorum</i>, <i>Equisetum palustre</i>, <i>Equisetum telmateia</i>, <i>Festuca gigantea</i>, <i>Festuca pratensis</i>, <i>Fritillaria meleagris</i>, <i>Geum rivale</i>, <i>Gratiola officinalis</i>, <i>Holcus lanatus</i>, <i>Inula salicina</i>, <i>Juncus effusus</i>, <i>Juncus filiformis</i>, <i>Lotus uliginosus</i>, <i>Lychnis flos-cuculi</i>, <i>Mentha aquatica</i>, <i>Myosotis palustris</i>, <i>Oenanthe silaifolia</i>, <i>Polygonum bistorta</i>, <i>Ranunculus acris</i>, <i>Rumex acetosa</i>, <i>Scirpus sylvaticus</i>, <i>Senecio aquaticus</i>, <i>Stachys palustris</i>, <i>Succisella inflexa</i>, <i>Telekia speciosa</i>, <i>Trifolium dubium</i>, <i>Trollius europaeus</i>.</p>	
<p>EUNIS : E3.44 - Gazons inondés et communautés apparentées</p> <p>EUR28 : -</p> <p>Nombre de relevés identifiés sur le site d'étude: 21</p>	<p>Espèces diagnostiques : <i>Alopecurus geniculatus</i>, <i>Rumex crispus</i>, <i>Ranunculus sardous</i></p> <p>Espèces constantes : <i>Agrostis stolonifera</i>, <i>Alopecurus geniculatus</i>, <i>Ranunculus sardous</i>, <i>Lolium perenne</i>, <i>Rumex crispus</i>, <i>Poa trivialis</i></p> <p>Espèces dominantes : <i>Agrostis stolonifera</i>, <i>Alopecurus geniculatus</i></p>	<p>Non disponible</p>	
<p>EUNIS : A2.5319 - Prés salés atlantiques à <i>Eleocharis</i></p> <p>EUR28 : -</p> <p>Nombre de relevés identifiés sur le site d'étude: 5</p>	<p>Espèces diagnostiques : <i>Triglochin maritima</i>, <i>Juncus gerardi</i></p> <p>Espèces constantes : <i>Juncus gerardi</i>, <i>Agrostis stolonifera</i>*, <i>Triglochin maritima</i>, <i>Trifolium fragiferum</i>, <i>Elytrigia repens</i>, <i>Bolboschoenus maritimus</i>, <i>Tripolium pannonicum</i>, <i>Plantago coronopus</i>, <i>Phragmites australis</i>, <i>Oenanthe fistulosa</i>, <i>Lysimachia maritima</i>, <i>Lotus glaber</i>, <i>Carex otrubae</i>, <i>Atriplex prostrata</i></p> <p>Espèces dominantes : <i>Elytrigia repens</i>, <i>Agrostis stolonifera</i>, <i>Phragmites australis</i>, <i>Juncus gerardi</i></p>	<p><i>Agrostis stolonifera</i>, <i>Carex paleacea</i>, <i>Eleocharis palustris</i>, <i>Eleocharis uniglumis</i>.</p>	

1.3.1.3 Bilan de l'expérimentation de la méthode 'système expert'

Nous avons expérimenté la démarche méthodologique SE sur les prairies humides des *Agrostietea stoloniferae* en établissant des définitions formelles des syntaxons sur la base des descriptions bibliographiques puis en testant notre outil sur des relevés phytosociologiques de référence. Cette phase d'évaluation, qui s'inspire des méthodes utilisées en télédétection, constitue une étape importante et originale dans notre processus méthodologique puisqu'elle a permis de tester les formules logiques et d'évaluer objectivement et statistiquement la précision des identifications produites par le système expert. Ce processus a été utilisé afin d'ajuster les formules logiques jusqu'à un niveau de satisfaction suffisant pour valider une version finale du système expert.

Cette phase d'évaluation nous a permis de montrer l'efficacité de la méthode 'système expert', avec des taux de classifications allant de 84 % de précision à l'échelle des associations végétales et jusqu'à 91% de précision à l'échelle des habitats. Les résultats les plus satisfaisants concernaient les communautés végétales avec des compositions floristiques très caractéristiques comme les prairies subhalophiles du *Trifolio maritimi – Oenanthetum silaifoliae* ou du *Carici divisae – Lolietum perennis* caractérisées par des espèces comme *Trifolium squamosum*, *Carex divisa* ou *Trifolium resupinatum*. De la même manière, les prairies longuement inondables telle que l'*Eleocharito palustris – Oenanthetum fistulosae* ou le *Gratiolo officinalis – Oenanthetum fistulosae* composées d'espèces comme *Eleocharis palustris*, *Oenanthe fistulosae* ou *Ranunculus flammula* ont été très bien identifiées par le SE.

En revanche, des confusions existaient entre certains types de prairies à l'échelle de l'association végétale. C'est le cas de prairies composées d'espèces peu fidèles, et relevant de plusieurs communautés prairiales comme le *Cirsio arvensis – Alopecuretum pratensis* ou le *Junco acutiflori – Cynosuretum cristati* décrites comme des prairies pâturées peu caractérisées (de Foucault & Catteau 2012). Ces syntaxons possèdent un pool d'espèces commun avec les autres types de prairies, entraînant de ce fait des confusions plus importantes (Kącki et al. 2021). De plus, comme il s'agit de communautés végétales définies à partir d'une classification traditionnelle basée sur des experts, il est possible que certaines associations végétales soient mal caractérisées sur le plan floristique, impliquant des chevauchements et des peuplements de transition fréquents entre les communautés végétales (Willner 2011). Pour clarifier ces approches traditionnelles de classification subjective, des classifications numériques telles que

TWINSpan ou K-means, actuellement utilisées en Europe (par exemple, [Rodríguez-Rojo et al. 2014](#); [Douda et al. 2016](#); [Marcenò et al. 2018](#); [Landucci et al. 2020](#)), devraient être envisagées pour mieux discriminer les végétations. Néanmoins, les confusions observées pour certaines associations végétales se neutralisaient le plus souvent à l'échelle de l'alliance et de l'habitat. Par conséquent, la précision du SE était supérieure en remontant dans les niveaux hiérarchiques des classifications pour obtenir 91% de réussite à l'échelle des habitats contre 84% à l'échelle des associations végétales. Les taux de précision satisfaisants obtenus à l'échelle des associations, des alliances et des habitats ont acté la validation du SE en vue de son utilisation pour l'identification des relevés de végétation du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'. Son application sur le jeu de données du site a permis d'identifier 718 relevés à l'échelle des associations végétales ou des alliances, aboutissant à leurs mises en correspondance vers les typologies d'habitats EUNIS et EUR28. Sur les 14 associations végétales pré-identifiées sur le site, 12 ont été reconnues par le SE. Les huit alliances et les quatre habitats EUNIS et l'habitat d'intérêt communautaire 1410 'Prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)' mentionnés dans les précédentes études ont été confirmés par notre approche.

Les listes d'espèces caractéristiques (espèces fidèles, constantes et dominantes) calculées pour chaque habitat à l'échelle du site Natura 2000 ont été comparées avec celles mentionnées dans les descriptions officielles des habitats présentées dans les référentiels de l'EEA. Ces comparaisons montrent que parmi ces espèces caractéristiques, plusieurs sont mentionnées dans les descriptions des habitats EUNIS ([Davies et al. 2004](#)) et EUR28 ([European Commission 2013](#)), confirmant la bonne adéquation de nos résultats avec les référentiels européens. Cependant, des différences entre ces listes ont également été mises en évidence. Au niveau Européen, le nombre d'espèces caractéristiques mentionnées varie considérablement d'un habitat à l'autre (différence visible pour les habitats EUNIS). De plus, ces listes ont une portée biogéographique large et intègre de nombreuses espèces qui ne cohabitent pas nécessairement à une échelle locale (par exemple, pour un site Natura 2000). Ainsi, notre analyse, réalisée à une échelle locale, permet de compléter et de préciser les listes d'espèces caractéristiques grâce à l'utilisation d'un important jeu de données intégrant de nombreux relevés pour les différentes unités de végétation du site d'étude. Les listes d'espèces diagnostiques mises en évidence pour chaque habitat sont ainsi plus représentatives des spécificités locales ([Ejrnæs et al. 2004](#); [Rodríguez-Rojo et al. 2020](#)) et assurent une meilleure cohérence et une plus grande précision dans le cadre de leur utilisation pour l'identification *in situ* des habitats.

Les résultats de ce test de la méthode ‘système expert’ nous ont permis d’envisager l’établissement d’un système expert détaillé en intégrant des définitions formelles pour la majorité des végétations du site Natura 2000.

1.3.2 Développement d'un système expert détaillé pour l'identification des végétations et des habitats de l'estuaire de la Loire

1.3.2.1 Méthode

1.3.2.1.1 Rédaction des définitions formelles

En raison du grand nombre de syntaxons recensés dans la pré-typologie ([Annexe 02](#)), nous avons dû procéder à une sélection des communautés végétales à intégrer dans le SE. Ainsi, nous avons priorisé les syntaxons à définir selon plusieurs critères :

- Leurs enjeux de conservation (les syntaxons caractérisant des HIC) ;
- Leur difficulté d'identification : les syntaxons jugés comme particulièrement difficiles à identifier et pouvant entraîner des risques de confusion et des erreurs d'identification ;
- Leur représentativité sur le site : les syntaxons régulièrement mentionnés dans la littérature et/ou considéré comme caractéristiques des marais estuariens.

Ensuite, chaque syntaxon retenu a fait l'objet d'une définition formelle à partir des commandes du système expert disponible avec le logiciel JUICE ([Tichý et al. 2019](#)), en suivant la méthodologie présentée dans la partie 1.3.1.1.1. Ces définitions sont basées sur des combinaisons de différents critères (présence d'espèces ou de groupes d'espèces, seuils de recouvrement...) afin de caractériser les syntaxons et permettre leur identification. Pour cela, nous nous sommes appuyés sur les descriptions contenues dans les diverses publications phytosociologiques (PVF2, Catalogues / Guides des végétations des CBNs, EuroVegChecklist). Cependant, contrairement au processus méthodologique présenté dans l'expérimentation sur les prairies humides, l'évaluation de la qualité de la classification n'a pas été réalisée à partir d'un jeu de données de référence. Pour cette étape, le système expert a directement été appliqué au jeu de données de l'estuaire de la Loire et la qualité des classifications a été évaluée à dire d'expert, à la manière de [Chytrý et al. \(2020\)](#). Plus précisément, nous avons vérifié la cohérence des identifications sur la base de la composition floristique des relevés en comparaison avec les descriptions présentées dans la littérature phytosociologique. Les définitions formelles ont été révisées de manière critique et largement modifiées sur la base de multiples essais de classification avec des versions successives du SE.

Cette procédure a été répétée plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'une version optimale permettant une identification satisfaisante des relevés phytosociologiques de l'estuaire de la Loire.

1.3.2.1.2 Définition des espèces caractéristiques des habitats

Après avoir appliqué le SE sur l'ensemble du jeu de données du site d'étude, nous avons regroupé en clusters les relevés appartenant aux mêmes habitats. Pour cette étape, les regroupements ont été effectués au niveau des habitats d'intérêt communautaire 'élémentaires' des Cahiers d'Habitats (Bensettiti et al. 2001-2005) pour les habitats relevant de la DHFF et au niveau hiérarchique 4 de la typologie EUNIS (ex : E3.41) pour les autres habitats. Dans un second temps, nous avons défini les espèces caractéristiques pour chaque habitat en suivant la méthode présentée dans la partie 1.3.1.1.2.

1.3.2.1.3 Cartographie de la répartition des habitats

Pour finir, nous avons utilisé les données géographiques des relevés pour cartographier leur distribution à l'échelle du site. Les relevés sans données de localisation n'ont pas pu être cartographiés.

1.3.2.2 Résultats

1.3.2.2.1 Présentation du système expert

La version finale du système expert contient 73 définitions formelles d'associations végétales, 37 définitions formelles d'alliances, 4 définitions formelles d'ordres, 19 définitions formelles de classes et 12 définitions de 'groupements' (par exemple, des végétations sans rattachement phytosociologique précis, des communautés végétales appauvries appelées 'communautés basales'...) (Tab. 5). Le script du système expert est stocké dans un fichier TXT exploitable avec le programme JUICE (disponible en téléchargement: <https://drive.google.com/file/d/1w5ngEW0H0lobqSHsWvjRcYd3Zlx6H25Q/view>).

Tableau 5. Nombre d'unités syntaxonomiques recensés dans la pré-typologie et nombre d'unités définies dans le système expert

Unités syntaxonomiques	Nombre total	Définition ES
Classe	38	19
Ordre	60	4
Alliance	91	37
Association végétale	118	73
Groupement	17	12
Total	324	145

1.3.2.2.2 Application du système expert : identification des relevés phytosociologiques

L'application du système expert sur la 'BD relevés du site d'étude' a permis d'identifier 1 843 relevés à une unité syntaxonomique ou à un groupement (soit 97% de l'ensemble des relevés recueillis sur le site d'étude). Les autres relevés répondaient à plusieurs définitions (11 relevés marqués d'un '+') ou restaient non identifiés (symbole '?'). Parmi les 1 843 relevés identifiés, 1 102 relevés sont rattachés à l'échelle de l'association végétale et 336 relevés à l'échelle de l'alliance permettant leur mise en correspondance avec les typologies d'habitats (ainsi, 1 438 relevés ont été rattachés à un habitat).

Afin de faciliter la mise en correspondances avec les typologies d'habitats, les communautés végétales ont été regroupées par grands types de milieux dans la présentation des résultats :

- Les **végétations littorales** comprennent les communautés d'estran jusqu'aux prairies subhalophiles. Elles correspondent à des végétations le plus souvent dominées par des espèces adaptées aux substrats salés à très peu salés. Ces communautés végétales appartiennent au groupe A 'Habitats marins' et au groupe B 'Habitats côtiers' dans le référentiel des habitats EUNIS (Davies et al. 2004). Les végétations littorales correspondant à des HIC sont intégrées dans le tome 2 'Habitats côtiers' des Cahiers d'Habitats (Bensettiti et al. 2004) ainsi qu'au sous-niveau 1 'habitats côtiers et végétations halophytiques' et sous-niveau 2 'dunes maritimes et intérieures' du Manuel d'interprétation des habitats de la DHFF (EUR28) (Commission européenne 2013) ;

- Les **végétations aquatiques**, qui se développent dans les milieux d'eau douce à saumâtre et qui sont dominées par des espèces appartenant à des genres adaptés à la vie aquatiques (*Potamogeton, Lemna, Nuphar, Ranunculus...*). Ces communautés végétales appartiennent au groupe C 'Eaux de surface continentales' dans le référentiel des habitats EUNIS (Davies et al. 2004). Les végétations aquatiques correspondant à des HIC sont intégrées dans le tome 3 'Habitats humides' des Cahiers d'Habitats (Bensettiti et al. 2002) et au sous-niveau 3 'Habitats d'eaux douces' du Manuel d'interprétation des habitats de la DHFF (EUR28) (Commission européenne 2013) ;

- Les **végétations des prairies**, qui correspondent aux formations végétales herbacées non littorales, c'est-à-dire se développant sur des substrats non salés (milieux doux), et qui sont marquées physionomiquement par la dominance des graminées. Ces communautés végétales appartiennent au groupe E 'Prairies ; terrains dominés par des herbacées non graminoides, des mousses ou des lichens' dans le référentiel des habitats EUNIS (Davies et al. 2004). Les végétations des prairies correspondant à des HIC sont intégrées dans le tome 4 'Habitats agropastoraux' des Cahiers d'Habitats (Bensettiti et al. 2005) et au sous-niveau 6 'Formations herbeuses naturelles et semi-naturelles' du Manuel d'interprétation des habitats de la DHFF (EUR28) (Commission européenne 2013) ;

- Les **végétations d'ourlets et de mégaphorbiaies** intègrent les végétations nitrophiles de hautes herbes, généralement à large feuilles, se développant le long des cours d'eau et en bordure des forêts. Ces communautés végétales appartiennent au groupe E 'Prairies ; terrains dominés par des herbacées non graminoides, des mousses ou des lichens' dans le référentiel des habitats EUNIS (Davies et al. 2004). Les végétations d'ourlets et de mégaphorbiaies correspondant à des HIC sont intégrées dans le tome 3 'Habitats humides' des Cahiers d'Habitats (Bensettiti et al. 2002) et au sous-niveau 6 'Formations herbeuses naturelles et semi-naturelles' du Manuel d'interprétation des habitats de la DHFF (EUR28) (Commission européenne 2013) ;

- Les **végétations de roselières** désignent les végétations de grands hélrophytes (1-2,5 m), généralement bistratifiées, à physionomie de roselières ou de cariçaies. Ces communautés végétales appartiennent au groupe C 'eaux de surface continentales' et au groupe D 'Tourbières hautes et bas-marais' dans le référentiel des habitats EUNIS (Davies et al. 2004). Les végétations de roselières correspondant à des HIC sont intégrées dans le tome

3 ‘Habitats humides’ des Cahiers d’Habitats (Bensettiti et al. 2002) et au sous-niveau 7 ‘Tourbières hautes, tourbières basses et bas-marais’ du Manuel d’interprétation des habitats de la DHFF (EUR28) (Commission européenne 2013) ;

- Les **végétations de fourrés et forêts** représentent les formations arbustives denses et les formations arborescentes dont les phanérophytes possèdent une densité suffisante pour que toute la végétation des strates sous-jacentes soit conditionnée par leur présence. Ces communautés végétales appartiennent au groupe F ‘Landes, fourrés et toundras’ et au groupe G ‘Boisements, forêts et autres habitats boisés’ dans le référentiel des habitats EUNIS (Davies et al. 2004). Les végétations de fourrés et forêts correspondant à des HIC sont intégrées dans le tome 1 ‘Habitats forestiers’ des Cahiers d’Habitats (Bensettiti et al. 2001) et au sous-niveau 9 ‘Forêts’ du Manuel d’interprétation des habitats de la DHFF (EUR28) (Commission européenne 2013).

Globalement, les prairies et les végétations littorales sont les mieux représentées à l’échelle de l’estuaire de la Loire avec respectivement 531 et 530 relevés, suivis des roselières avec 236 relevés. Les végétations d’ourlets et mégaphorbiaies et les végétations aquatiques sont caractérisée par peu de relevés (respectivement 72 et 50 relevés). Pour finir, les fourrés et forêts sont les unités végétales les moins bien représentées avec seulement 19 relevés identifiés (Fig. 7).

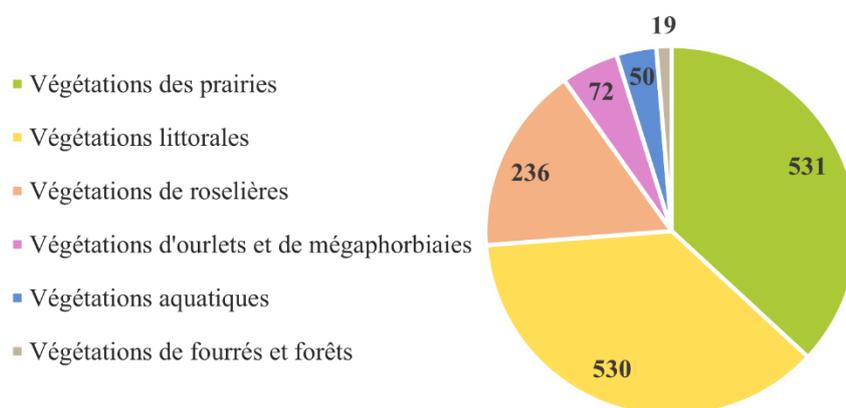


Figure 7. Nombre de relevés assignés à un syntaxon (association végétale ou alliance) par le SE, en fonction du type de milieu

A noter que les végétations littorales, les roselières, les végétations d'ourlets et mégaphorbiaies et les végétations aquatiques sont largement identifiées à l'échelle de l'association végétale. En revanche, les prairies et les végétations de fourrés et forêts sont autant identifiées à l'échelle de l'association végétale qu'à celle de l'alliance (Fig. 8).

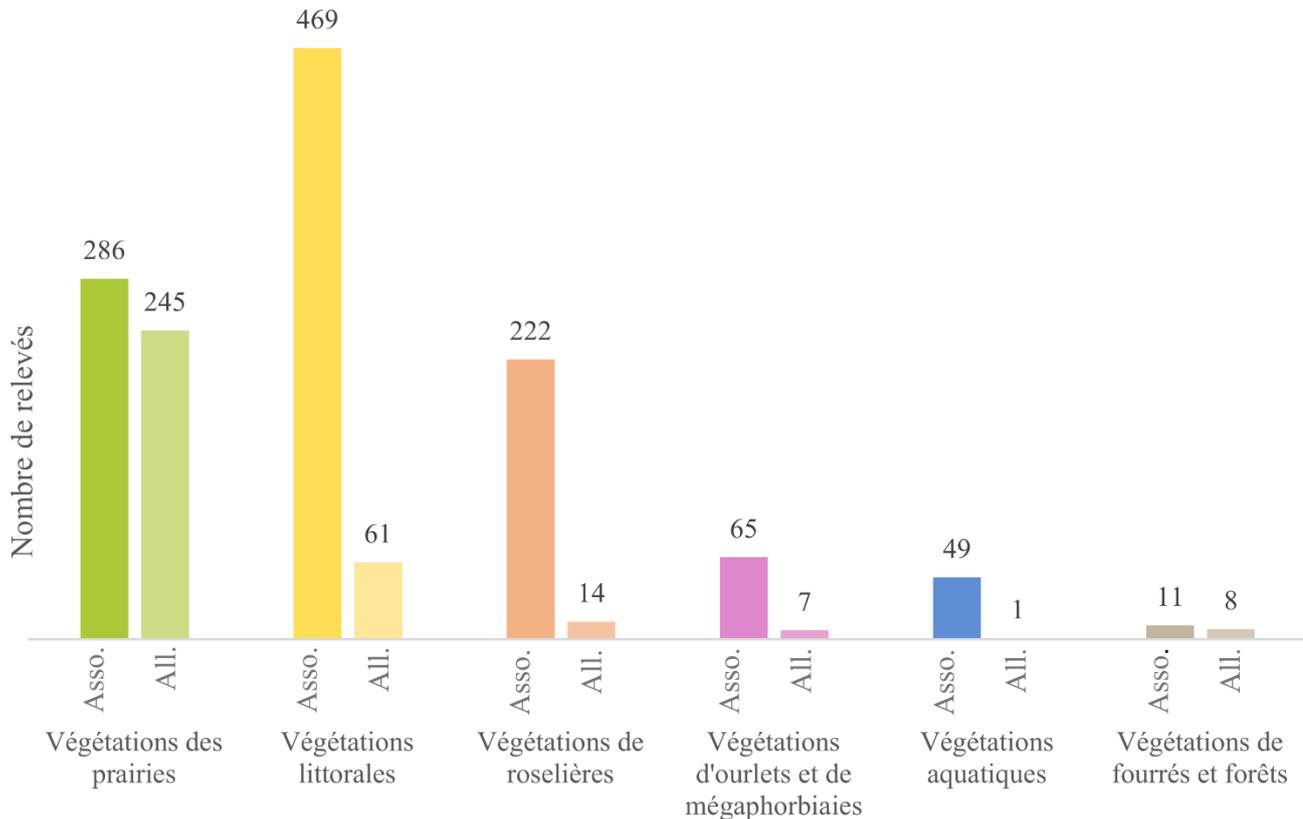


Figure 8. Répartition du nombre de relevés identifiés à l'échelle de l'association végétale (Asso.) et à l'échelle de l'alliance (All.) en fonction du type de milieu

Les tableaux synoptiques correspondant aux associations végétales et alliances identifiées par le système expert sont présentés ci-après selon les grandes catégories de milieux auxquels ils appartiennent.

Végétations littorales

Au total, 530 relevés ont été identifiés par le système expert comme appartenant aux végétations littorales (Tab. 6). 469 relevés ont été assignés à une association végétale dont les mieux représentées sont le *Trifolio maritimi – Oenanthetum silaifoliae* (214 relevés), le *Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthetum fistulosae* (104 relevés) et le *Carici divisae – Lolietum perennis* (70 relevés). A contrario, les communautés végétales les moins représentées, c'est-à-dire comprenant un faible nombre de relevés, sont le groupement à *Plantago maritima* et l'*Halimionetum portulacoidis* avec seulement 1 relevé chacune. Sur les 530 relevés, 61 ont été assignés à une alliance. L'*Agropyron pungentis* est l'alliance la plus reconnue sur le site avec 28 relevés. De manière globale, l'*Alopecurion utriculati* est l'alliance littorale comprenant le plus de relevés sur l'estuaire de la Loire (284 relevés).

À l'échelle des habitats, l'HIC 1410-3 'Prairies subhalophiles thermo-atlantiques', correspondant à l'habitat EUNIS A2.52 'Partie supérieure des marais salés', est caractérisé par le plus grand nombre de relevés (388 relevés) (Tab. 7). Les espèces diagnostiques de cet habitat sont *Carex divisa*, *Oenanthe silaifolia* ou *Alopecurus bulbosus*. Les relevés rattachés à ces types de prairies montrent une répartition essentiellement localisée sur la partie nord de l'estuaire de la Loire et une distribution régulière de l'aval vers l'amont (Fig. 9).

À l'inverse, certains habitats littoraux sont caractérisés par très peu de relevés, comme par exemple ceux relevant des milieux dunaires : 2110-1 'Dunes mobiles embryonnaires atlantiques' (1 relevés) ; 2120-1 'Dunes mobiles à *Ammophila arenaria* subsp. *arenaria* des côtes atlantiques' (3 relevés) ; 2130-2 "Dunes grises des côtes atlantiques" (2 relevés). Les relevés caractérisant ces habitats sont uniquement localisés sur quelques secteurs réduits du site Natura 2000 (Fig. 9).

Tableau 6. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations littorales. Les espèces diagnostiques (avec la valeur phi > 0,25) sont surlignées en gris et celles très diagnostiques en gris foncé (avec phi > 0,50). La fidélité a été calculée en utilisant l'ensemble des 1 414 relevés rattachés à un habitat. Seules les espèces diagnostiques et les espèces les plus fréquentes sont présentées dans ce tableau.

Les communautés végétales ont été regroupées par types d'habitats à partir des relevés classés à l'échelle de l'association végétale et de l'alliance phytosociologique. Les codes des alliances et des associations correspondent aux niveaux d'identification obtenus par le système expert : AS : *Astero tripolii* – *Suaedetum maritimae* subsp. *maritimae* ; SaR : *Salicornion europaeo* – *ramosissimae* ; PH : *Parapholido strigosae* – *Hordeetum marini* ; PM : *Puccinellietum maritimae* ; Puc : *Puccinellion maritimae* ; HA : *Halimionetum portulacoidis* ; JG : *Juncetum gerardi* ; PL : *Groupement à Plantago maritima* ; FL : *Festucetum littoralis* ; Arm : *Armerion maritimae* ; OJ : *Oenanthe lachenalii* – *Juncetum maritimi* ; JO : *Junco gerardi* – *Oenanthetum fistulosae* ; LoT : *Loto tenuis* – *Trifolion fragiferi* ; Agr : *Agropyron pungentis* ; Atr : *Atriplicion littoralis* ; CL : *Carici divisae* – *Lolietum perennis* ; TO : *Trifolio maritimi* – *Oenanthetum silaifoliae* ; RO : *Ranunculo ophioglossifolii* – *Oenanthetum fistulosae* ; HoE : *Honckenyo peploidis* – *Elymion arenarii* ; Amm : *Ammophilion arenariae* ; EuH : *Euphorbio portlandicae* - *Helichryson stoechadis*. * : groupes de relevés sans rattachement à l'échelle de l'association végétale mais identifiés à l'échelle de l'alliance. Strate 'h' : herbacée

Habitats EUR28	1310-1	1310-2	1310-4	1330-1	1330-2	1330-3					-	1330-5			1410-3	2110-1	2120-1	2130-2			
Habitats EUNIS	A2.55	A2.55	A2.55	A2.54	A2.52	A2.53					A2.53	A2.51	A2.52			B1.31	B1.32	B1.42			
Alliances		SaR			Puc				Arm		LoT	Agr	Atr			HoE	Amm	EuH			
Associations végétales	AS	*	PH	PM	*	HA	JG	PL	FL	*	OJ	JO	*	*	*	CL	TO	RO	*	*	*
Nombre de relevés identifiés	7	9	20	25	6	1	5	1	2	6	1	19	5	28	1	70	214	104	1	3	2
Strate																					
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 1310-1 "Salicorniaies des bas niveaux (haute slikke atlantique)"																					
<i>Suaeda maritima</i>	h	100	33	10	12	.	.	.	.	.	.	.	.	11	.	.	.	.	.	.	.
<i>Tripolium pannonicum</i>	h	86	78	35	72	50	.	33	100	50	50	.	.	40	14	.	1	.	.	100	.
<i>Salicornia</i> sp.	h	43	.	5	4	17	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 1310-2 "Salicorniaies des hauts niveaux (schorre atlantique)"																					
<i>Salicornia appressa</i>	h	57	100	5	16	.	.	33	100	.	.	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.
<i>Salicornia obscura</i> var. <i>rubescens</i>	h	.	44	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Atriplex x gustafssoniana</i>	h	14	33	.	8	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 1310-4 "Pelouses rases à petites annuelles subhalophiles"																					
<i>Parapholis strigosa</i>	h	.	.	85	4	17	.	.	.	33	.	.	.	20	7	.	.	.	.	.	.
<i>Hordeum marinum</i>	h	14	11	85	24	33	.	67	.	.	.	.	.	20	14	.	6	.	1	.	.
<i>Polygonum aviculare</i>	h	.	.	40	16	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Polypogon monspeliensis</i>	h	.	.	55	32	33	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 1330-1 "Prés salés du bas schorre"																					
<i>Puccinellia maritima</i>	h	86	78	65	100	100	.	100	100	.	50	.	.	20	4	.	3	.	.	.	.
<i>Juncus hybridus</i>	h	.	.	5	12	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 1330-2 "Prés salés du schorre moyen"																					
<i>Halimione portulacoides</i>	h	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 1330-2 "Prés salés du schorre moyen"																					
<i>Pseudosclerochloa rupestris</i>	h	.	.	20	.	.	.	67	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.
<i>Plantago maritima</i>	h	.	.	.	4	.	.	33	100	.	33	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Festuca rubra</i> s. <i>litoralis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	100	.	33	.	.	11	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lysimachia maritima</i>	h	.	.	5	8	.	.	33	.	50	67	67	5	40	4	.	1	.	.	.	.
<i>Triglochin maritima</i>	h	.	.	5	4	.	.	67	.	50	67	67	26	80	.	3	1	1	.	.	.
<i>Oenanthe lachenalii</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	67	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.
<i>Apium graveolens</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	17	67	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Juncus maritimus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	67	.	.	16	.	4	.	1	2	1	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS A2.53 - Roselières, jonchaies et cariçaias salines et saumâtres de la partie moyenne à supérieure des marais salés																					
<i>Sonchus maritimus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	16	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Eleocharis uniglumis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	68	20	.	.	2	36	.	.	.
<i>Oenanthe fistulosa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	89	40	.	13	12	64	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 1330-5 "Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée"																					
<i>Elytrigia acuta</i>	h	.	.	5	.	100	.	100	.	75	.	.	.	100	.	.	.	.	.	33	50
<i>Beta vulgaris</i> s. <i>maritima</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	18	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sonchus arvensis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	11	.	.	.	.	.	.	.
<i>Atriplex littoralis</i>	h	.	.	.	4	.	.	.	.	.	25	.	.	4	100	.	.	.	.	.	.
<i>Salsola soda</i>	h	14	11	.	4	.	.	.	.	.	25	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.

Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 1410-3 "Prairies subhalophiles thermo-atlantiques"

<i>Carex divisa</i>	h	.	.	5	4	.	.	.	.	17	.	26	20	7	.	81	84	54	.	.	.
<i>Alopecurus bulbosus</i>	h	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	32	20	7	.	77	73	46	.	.	.
<i>Trifolium squamosum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	60	71	12	.	.	.
<i>Hordeum secalinum</i>	h	.	.	10	8	.	.	.	.	17	.	.	.	.	.	77	78	23	.	.	.
<i>Lolium perenne</i>	h	.	.	30	.	.	.	.	.	17	.	.	20	14	.	90	77	40	.	.	.
<i>Oenanthe silaifolia</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5	.	7	.	49	83	43	.	.	.
<i>Bromus racemosus</i>	h	.	.	5	.	.	.	.	.	.	.	5	.	.	.	44	66	14	.	.	.
<i>Bromus commutatus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	16	4	5	.	.	.
<i>Jacobaea aquatica</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	11	20	4	.	34	66	32	.	.	.
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	26	59	10	.	.	.
<i>Trifolium pratense</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	6	39	2	.	.	.
<i>Gaudinia fragilis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	21	63	3	.	.	.
<i>Cynosurus cristatus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	33	70	3	.	.	.
<i>Alopecurus pratensis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	11	.	.	.	66	6	.	.	.
<i>Lychnis flos-cuculi</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	31	3	.	.	.
<i>Anacamptis laxiflora</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	4	.	.	.
<i>Bellis perennis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	9	29	2	.	.	.
<i>Trifolium michelianum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5	.	.	.	19	61	.	.	.	.
<i>Ranunculus sardous</i>	h	.	.	10	4	.	.	33	.	.	.	26	20	.	.	51	40	71	.	.	.
<i>Galium debile</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	15	.	.	.
<i>Glyceria declinata</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	8	.	.	.
<i>Myosotis laxa s. cespitosa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	20	.	.	.	.	3	21	.	.	.

Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 2110-1 "Dunes mobiles embryonnaires atlantiques"

<i>Leymus arenarius</i>	h	17	100	.	.
-------------------------	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	---	---

Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 2120-1 "Dunes mobiles à *Ammophila arenaria* subsp. *Arenaria* des côtes atlantiques"

<i>Ammophila arenaria</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	67	50	.
<i>Honckenya peploides</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	67	50	.
<i>Senecio inaequidens</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	7	.	.	.	.	.	.	67	.	.
<i>Convolvulus soldanella</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	100	.

Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 2130-2 "Dunes grises des côtes atlantiques"

<i>Cynodon dactylon</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	.	2	.	.	67	100	.
<i>Silene portensis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Corynephorus canescens</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Herniaria hirsuta</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Senecio vulgaris s. denticulatus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Coincya monensis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Eryngium campestre</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Jasione montana</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Lagurus ovatus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Chondrilla juncea</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Jacobaea vulgaris</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Anisantha diandra</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	33	100	.
<i>Myosotis ramosissima</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.
<i>Rumex acetosella</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.

Autres espèces

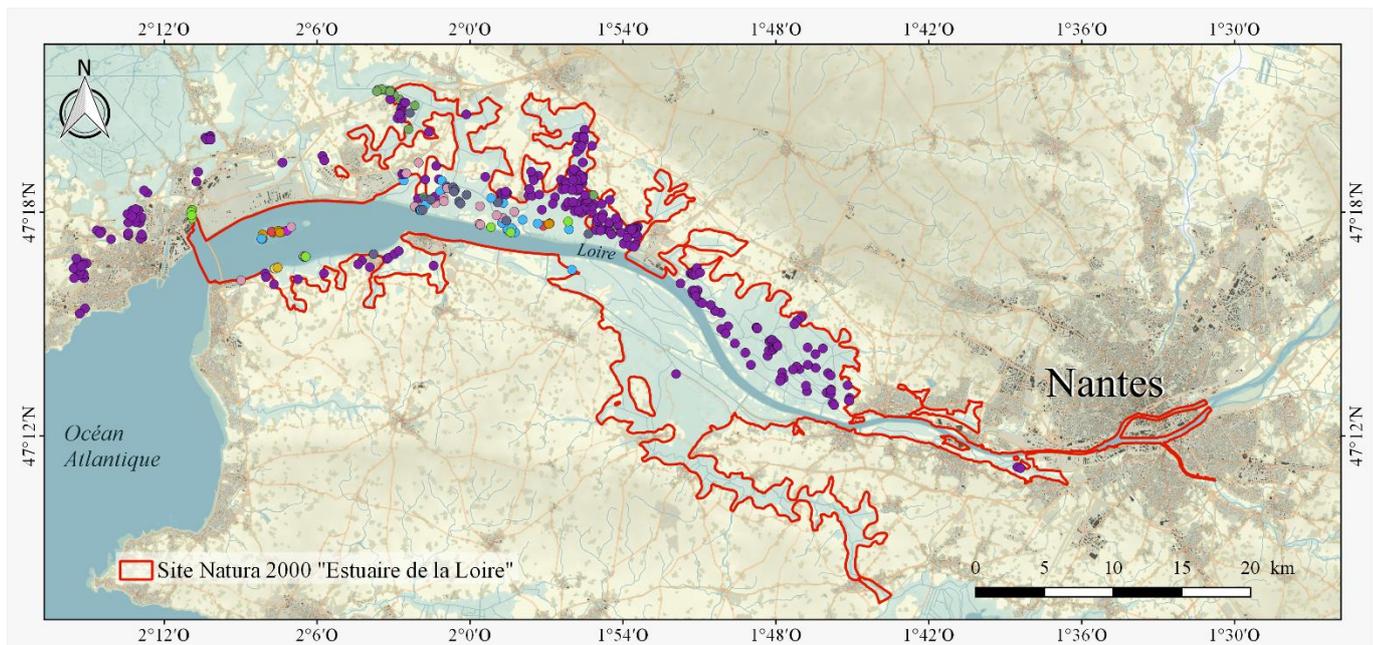
<i>Spergula marina</i>	h	57	22	75	64	50	.	67	.	50	.	20	4	.	3	.	.	.	.	.	.
<i>Juncus gerardi</i>	h	14	11	15	24	.	100	.	33	50	84	100	11	.	49	18	23	100	.	.	.
<i>Agrostis stolonifera</i>	h	14	.	65	52	50	.	33	.	50	50	25	89	100	25	.	71	52	70	.	.
<i>Atriplex prostrata</i>	h	71	33	70	80	83	.	100	.	83	25	11	40	39	.	3	.	2	.	.	.
<i>Phragmites australis</i>	h	14	22	.	8	.	.	.	50	17	25	42	40	29	.	9	6	10	.	.	.
<i>Bolboschoenus maritimus</i>	h	14	.	25	48	50	.	.	.	50	50	74	60	18	.	3	1	7	.	.	.
<i>Cotula coronopifolia</i>	h	14	.	40	32	33	.	.	.	33	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
<i>Plantago coronopus</i>	h	.	.	20	.	.	.	.	50	.	.	40	4	.	10	2	.	.	.	.	50
<i>Alopecurus geniculatus</i>	h	.	.	25	8	.	.	.	.	17	.	32	.	.	16	1	45	.	.	.	.
<i>Lotus glaber</i>	h	.	.	10	.	.	.	.	.	.	25	16	40	.	13	21	5	.	.	.	.
<i>Elytrigia repens</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	37	60	4	.	47	45	26	100	.	.
<i>Rumex crispus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	16	20	4	.	9	16	23	.	.	.
<i>Plantago major</i>	h	.	.	15	12	.	.	.	50	.	.	20	.	.	10	1	.	.	.	.	.
<i>Althaea officinalis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5	20	25	.	11	2	2	.	.	.
<i>Carex otrubae</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	21	40	7	.	27	15	24	.	.	.
<i>Eleocharis palustris</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	53	20	.	.	1	1	47	.	.	.
<i>Rumex conglomeratus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	50	.	.	.	7	.	3	1	5	.	.	.	.
<i>Chenopodium album</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25	.	4	100	.	.	.	100	.	.	.
<i>Trifolium fragiferum</i>	h	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.	60	.	.	20	34	32	.	.	.
<i>Argentina anserina</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	32	20	.	.	11	3	5	.	.	.
<i>Juncus bufonius</i>	h	.	.	5	12	17	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.
<i>Hypochaeris radicata</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	18	1	.	.	50
<i>Festuca rubra</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	4	8	.	.	.	.	50
<i>Ranunculus flammula</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	16	.	.	.	1	1	23	.	.	.
<i>Ranunculus repens</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	7	10	28	.	.	.	.

etc.

Tableau 7. Espèces caractéristiques des habitats littoraux de l'estuaire de la Loire. Les espèces diagnostiques, constantes et dominantes ont été calculées à partir des relevés identifiés par le système expert. Les relevés des syntaxons caractérisant un même habitat ont été regroupés avant le calcul des espèces caractéristiques. Les espèces diagnostiques les plus fidèles ($\phi > 0,50$) et les espèces constantes les plus fréquentes (fréquence d'occurrence supérieure à 60 %) sont marquées en gras. Le symbole '*' indique les HIC prioritaires

Habitats	Espèces caractéristiques
1310-1 "Salicorniaies des bas niveaux (haute slikke atlantique)" Nombre de relevés: 7	Espèces diagnostiques: <i>Suaeda maritima</i> , <i>Salicornia</i> sp., <i>Salicornia appressa</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> , <i>Spergula marina</i> Espèces constantes: <i>Suaeda maritima</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Spergula marina</i> , <i>Salicornia appressa</i> , <i>Salicornia</i> sp. Espèces dominantes: <i>Suaeda maritima</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Tripolium pannonicum</i>
1310-2 "Salicorniaies des hauts niveaux (schorre atlantique)" Nombre de relevés: 9	Espèces diagnostiques: <i>Salicornia appressa</i> , <i>Salicornia obscura</i> var. <i>rubescens</i> , <i>Atriplex x gustafssoniana</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> Espèces constantes: <i>Salicornia appressa</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Salicornia obscura</i> var. <i>rubescens</i> Espèces dominantes: <i>Salicornia appressa</i> , <i>Salicornia obscura</i> var. <i>rubescens</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Atriplex prostrata</i>
1310-4 "Pelouses rases à petites annuelles subhalophiles" Nombre de relevés: 20	Espèces diagnostiques: <i>Parapholis strigosa</i> , <i>Hordeum marinum</i> , <i>Spergula marina</i> , <i>Polypogon monspeliensis</i> , <i>Polygonum aviculare</i> , <i>Puccinellia maritima</i> Espèces constantes: <i>Parapholis strigosa</i> , <i>Hordeum marinum</i> , <i>Spergula marina</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Polypogon monspeliensis</i> , <i>Polygonum aviculare</i> , <i>Cotula coronopifolia</i> Espèces dominantes: <i>Hordeum marinum</i> , <i>Parapholis strigosa</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Pseudosclerochloa rupestris</i> , <i>Agrostis stolonifera</i>
1330-1 "Prés salés du bas schorre" Nombre de relevés: 31	Espèces diagnostiques: <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Spergula marina</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> Espèces constantes: <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> , <i>Spergula marina</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Bolboschoenus maritimus</i> Dominant species: <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Atriplex prostrata</i>
1330-2 "Prés salés du schorre moyen" Number of relevés: 1	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Halimione portulacoides</i> , <i>Elytrigia acuta</i> Espèces dominantes: <i>Halimione portulacoides</i>
1330-3 "Prés salés du haut schorre" Nombre de relevés: 15	Espèces diagnostiques: <i>Lysimachia maritima</i> , <i>Triglochin maritima</i> , <i>Plantago maritima</i> , <i>Apium graveolens</i> , <i>Festuca rubra</i> s. <i>litoralis</i> Espèces constantes: <i>Triglochin maritima</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> , <i>Lysimachia maritima</i> , <i>Puccinellia maritima</i> , <i>Juncus gerardi</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> Espèces dominantes: <i>Lysimachia maritima</i> , <i>Juncus gerardi</i> , <i>Triglochin maritima</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Pseudosclerochloa rupestris</i> , <i>Oenanthe lachenalii</i> , <i>Festuca rubra</i> s. <i>litoralis</i> , <i>Elytrigia acuta</i>
A2.53 - Roselières, jonchaies et cariçaies salines et saumâtres de la partie moyenne à supérieure des marais salés Number of relevés: 24	Espèces diagnostiques: <i>Oenanthe fistulosa</i> , <i>Eleocharis uniglumis</i> , <i>Juncus gerardi</i> , <i>Sonchus maritimus</i> , <i>Triglochin maritima</i> , <i>Hydrocotyle vulgaris</i> Espèces constantes: <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Juncus gerardi</i> , <i>Oenanthe fistulosa</i> , <i>Bolboschoenus maritimus</i> , <i>Eleocharis uniglumis</i> , <i>Eleocharis palustris</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Elytrigia repens</i> , <i>Triglochin maritima</i> Espèces dominantes: <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Juncus gerardi</i> , <i>Eleocharis uniglumis</i>
1330-5 "Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée" Nombre de relevés: 29	Espèces diagnostiques: <i>Elytrigia acuta</i> , <i>Beta vulgaris</i> s. <i>maritima</i> , <i>Sonchus arvensis</i> , <i>Lactuca serriola</i> Espèces constantes: <i>Elytrigia acuta</i> , <i>Atriplex prostrata</i> Dominant species: <i>Elytrigia acuta</i>
1410-3 "Prairies subhalophiles thermo-atlantiques" Nombre de relevés: 388	Espèces diagnostiques: <i>Carex divisa</i> , <i>Oenanthe silaifolia</i> , <i>Alopecurus bulbosus</i> , <i>Hordeum secalinum</i> , <i>Trifolium squamosum</i> , <i>Bromus racemosus</i> , <i>Trifolium michelianum</i> , <i>Gaudinia fragilis</i> , <i>Cynosurus cristatus</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Ranunculus sardous</i> , <i>Trifolium fragiferum</i> , <i>Bellis perennis</i> Espèces constantes: <i>Carex divisa</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Oenanthe silaifolia</i> , <i>Alopecurus bulbosus</i> , <i>Hordeum secalinum</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Poa trivialis</i> , <i>Trifolium squamosum</i> , <i>Ranunculus sardous</i> , <i>Jacobaea aquatica</i> , <i>Bromus racemosus</i> , <i>Cynosurus cristatus</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Elytrigia repens</i> , <i>Anthoxanthum odoratum</i> , <i>Gaudinia fragilis</i> , <i>Alopecurus pratensis</i> Dominant species: <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Carex divisa</i>

2110-1 "Dunes mobiles embryonnaires atlantiques"	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Tripolium pannonicum</i> , <i>Leymus arenarius</i> , <i>Juncus gerardi</i> , <i>Elytrigia repens</i> , <i>Chenopodium album</i>
Nombre de relevés: 1	Espèces dominantes: -
2120-1 "Dunes mobiles à <i>Ammophila arenaria</i> subsp. <i>Arenaria</i> des côtes atlantiques"	Espèces diagnostiques: <i>Senecio inaequidens</i> , <i>Convolvulus soldanella</i> , <i>Honckenya peploides</i> , <i>Ammophila arenaria</i> , <i>Cynodon dactylon</i> Espèces constantes: <i>Convolvulus soldanella</i> , <i>Senecio inaequidens</i> , <i>Honckenya peploides</i> , <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Ammophila arenaria</i>
Nombre de relevés: 3	Espèces dominantes: <i>Festuca juncifolia</i> , <i>Convolvulus soldanella</i> , <i>Ammophila arenaria</i>
2130-2 "Dunes grises des côtes atlantiques" *	Espèces diagnostiques: <i>Silene portensis</i> , <i>Senecio vulgaris s. denticulatus</i> , <i>Lagurus ovatus</i> , <i>Jasione montana</i> , <i>Herniaria hirsuta</i> , <i>Corynephorus canescens</i> , <i>Coincya monensis</i> , <i>Chondrilla juncea</i> , <i>Rumex acetosella</i> , <i>Jacobaea vulgaris</i> , <i>Myosotis ramosissima</i> , <i>Anisantha diandra</i> , <i>Eryngium campestre</i> , <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Convolvulus soldanella</i> Espèces constantes: <i>Silene portensis</i> , <i>Senecio vulgaris s. denticulatus</i> , <i>Rumex acetosella</i> , <i>Myosotis ramosissima</i> , <i>Lagurus ovatus</i> , <i>Jasione montana</i> , <i>Jacobaea vulgaris</i> , <i>Herniaria hirsuta</i> , <i>Eryngium campestre</i> , <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Corynephorus canescens</i> , <i>Convolvulus soldanella</i> , <i>Coincya monensis</i> , <i>Chondrilla juncea</i> , <i>Anisantha diandra</i> , <i>Vicia sativa</i> , <i>Trifolium incarnatum v. molinerii</i> , <i>Trifolium campestre</i> , <i>Tragopogon species</i> , <i>Plantago coronopus</i> , <i>Lathyrus angulatus</i> , <i>Hypochaeris radicata</i> , <i>Hypochaeris glabra</i> , <i>Honckenya peploides</i> , <i>Herniaria ciliolata</i> , <i>Festuca rubra</i> , <i>Festuca juncifolia</i> , <i>Ervilia hirsuta</i> , <i>Elytrigia acuta</i> , <i>Convolvulus arvensis</i> , <i>Bromus hordeaceus</i> , <i>Avena barbata</i> , <i>Ammophila arenaria</i> , <i>Allium sp.</i>
Nombre de relevés: 2	Espèces dominantes: -



Habitats EUR28 / EUNIS

- 1310-1 "Salicorniaies des bas niveaux (haute slikke atlantique)" / A2.55 - Marais salés pionniers
- 1310-2 "Salicorniaies des hauts niveaux (schorre atlantique)" / A2.55 - Marais salés pionniers
- 1310-4 "Pelouses rases à petites annuelles subhalophiles" / A2.55 - Marais salés pionniers
- 1330-1 "Prés salés du bas schorre" / A2.54 - Partie inférieure à moyenne des marais salés
- 1330-2 "Prés salés du schorre moyen" / A2.52 - Partie supérieure des marais salés
- 1330-3 "Prés salés du haut schorre" / A2.53 - Roselières, jonchaies et cariçaias salines et saumâtres de la partie moyenne à supérieure des marais salés
- 1330-5 "Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée" / A2.51 - Laises des marais salés
- 1410-3 "Prairies subhalophiles thermo-atlantiques" / A2.52 - Partie supérieure des marais salés
- 2120-1 "Dunes mobiles à *Ammophila arenaria* subsp. *Arenaria* des côtes atlantiques" / B1.32 - Dunes blanches
- 2130-2 "Dunes grises des côtes atlantiques" / B1.42 Dunes grises fixées gasconnes
- NA / A2.53 - Roselières, jonchaies et cariçaias salines et saumâtres de la partie moyenne à supérieure des marais salés

Figure 9. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats littoraux

Végétations aquatiques

Au total, 50 relevés ont été identifiés par le système expert comme appartenant aux végétations aquatiques (Tab. 8). Parmi les unités aquatiques identifiées, les associations végétales les mieux représentées sont le *Chenopodio chenopodioidis* - *Crypsietum aculeatae* (16 relevés), et le *Ranunculetum baudotii* (8 relevés). Les associations restantes sont représentées par très peu de relevés (en moyenne 2 relevés) comme par exemple le *Lythro portulae* - *Damasonietum alismatis* ou le *Spirodelo* - *Lemnetum minoris*. Un seul relevé n'a été identifié qu'au niveau de l'alliance, pour le *Radiolion linoidis*.

À l'échelle des habitats, le HIC 3170-3 'Gazons méditerranéens amphibies halonitrophiles (*Heleochloion*)', correspondant à l'habitat EUNIS C3.42 'Communautés amphibies méditerranéo-atlantiques', est caractérisé par le plus grand nombre de relevés (16 relevés) (Tab. 9). Les espèces diagnostiques de cet habitat sont *Crypsis aculeata*, *Oxybasis chenopodioides* ou *Oxybasis glauca*. Ces gazons amphibies sont uniquement localisés dans les secteurs les plus aval de l'estuaire de la Loire, en rive nord (Fig. 10). 8 relevés se rattachent à l'habitat C1.54 'Macrophytes submergés des eaux salées et saumâtres' caractérisé par *Ranunculus peltatus* subsp. *baudotii*. Ces végétations sont potentiellement associées à l'HIC 1150-1 'Lagunes en mer à marées (façade atlantique)' lorsque les plans d'eau dans lesquels elles se développent ont un fonctionnement lagunaire (habitat à logique biotope). L'habitat 3150-3 'Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres flottant à la surface de l'eau' (7 relevés) est caractérisé par les lemnacées *Lemna gibba*, *Lemna minuta* et *Spirodela polyrhiza*. Il se rencontre régulièrement sur l'ensemble du site au niveau des canaux, douves et mares d'abreuvement (Fig. 10). A l'inverse, l'habitat 3150-4 'Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, de bas-niveau topographique, planitiaires, d'affinités atlantiques, des *Isoeto-Juncetea*' caractérisé sur le site par la présence du *Damasonium alisma* n'apparaît que ponctuellement. Seuls deux relevés situés sur la rive nord de l'estuaire se rattachent à cet habitat (Fig. 10).

Tableau 8. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations aquatiques. Les espèces diagnostiques (avec la valeur phi > 0,25) sont surlignées en gris et celles très diagnostiques en gris foncé (avec phi > 0,50). La fidélité a été calculée en utilisant l'ensemble des 1 414 relevés rattachés à un habitat. Seules les espèces diagnostiques et les espèces les plus fréquentes sont présentées dans ce tableau.

Les communautés végétales ont été regroupées par types d'habitats à partir des relevés classés à l'échelle de l'association végétale et de l'alliance phytosociologique (le symbole ^b indique les communautés basales (CB)). Les codes des alliances et des associations correspondent aux niveaux d'identification obtenus par le système expert : LD : *Lythrum portulae* – *Damasonietum alismatis* ; RM : *Ranunculo sardoii* – *Myosuretum minimi* ; RaD : *Radiolion linoidis* ; PTr : *Potametum trichoidis* ; RE : *Ranunculo circinati* – *Elodeetum nuttallii* ; Pza^b : CB du *Parvopotamo* – *Zannichellietum palustris* ; PP : *Potametum pectinati* ; LT : *Lemnetum trisulcae* ; LG : *Lemnetum gibbae* ; SL : *Spirodela* – *Lemnetum minoris* ; CC : *Chenopodio chenopodioidis* – *Crypsietum aculeatae* ; TN : *Trapetum natantis* ; NL : Groupement à *Nuphar lutea* (*Nupharetum luteae* ou *Nymphaeetum albo-luteae*) ; PZ : *Parvopotamo* – *Zannichellietum pedicellatae* ; ZO : *Zannichellietum obtusifoliae* ; PR : *Potamo crispis* – *Ranunculetum trichophylli* ; RB : *Ranunculetum baudotii* ; LW : Groupement à *Ludwigia grandiflora* et groupement à *Ludwigia peploides*. * : groupes de relevés sans rattachement à l'échelle de l'association végétale mais identifiés à l'échelle de l'alliance. Strate 'h' : herbacée. '?' : végétations potentiellement associées à un HIC (habitats à logique biotope / mixte)

Habitats EUR28	3130-4	3130-5	3150-1				3150-2	3150-3	3170-3	-	1150-1?	-	1150-1?	-				
Habitats EUNIS	C1.51		C1.23	C1.33		C1.22		C3.42	C1.24		C1.33		C1.34	C1.54	-			
Alliances			Rad															
Associations végétales	LD	RM	*	PTr	RE	Pza ^b	PP	LT	LG	SL	CC	TN	NL	PZ	ZO	PR	RB	LW
Nombre de relevés identifiés	2	1	1	1	1	2	4	1	5	2	16	1	1	1	1	1	8	1
Strate																		
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 3130-4 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, de bas-niveau topographique, planitiaires, d'affinités atlantiques, des <i>Isoeto-Juncetea</i> "																		
<i>Damasonium alisma</i>	h	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus ophioglossifolius</i>	h	100	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 3130-5 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, acidiphiles, de niveau topographique moyen, planitiaires à montagnardes, des <i>Isoeto-Juncetea</i> "																		
<i>Myosurus minimus</i>	h	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Alopecurus geniculatus</i>	h	50	100	.	.	.	.	.	.	.	69	.	.	.	.	.	.	.
<i>Polygonum aviculare</i>	h	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Juncus bufonius</i>	h	.	100	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Poa annua</i>	h	.	100	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lythrum hyssopifolia</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Laphangium luteoalbum</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus sardous</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 3150-1 "Plans d'eau eutrophes avec végétation enracinée avec ou sans feuilles flottantes"																		
<i>Potamogeton trichoides</i>	h	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Potamogeton crispus</i>	h	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Elodea nuttallii</i>	h	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Zannichellia palustris</i>	h	.	.	.	100	.	100	25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Stuckenia pectinata</i>	h	.	.	.	.	.	.	50	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 3150-2 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres submergés"																		
<i>Lemna trisulca</i>	h	.	.	.	100	.	50	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 3150-3 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres flottant à la surface de l'eau"																		
<i>Lemna minuta</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	60	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lemna gibba</i>	h	.	.	.	.	100	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Wolffia arrhiza</i>	h	.	.	.	100	.	25	.	40	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Spirodela polyrhiza</i>	h	.	.	.	.	.	25	.	60	100	.	.	.	.	.	.	.	100
<i>Lemna minor</i>	h	.	.	.	100	.	50	.	60	100	.	.	.	100	.	.	.	100
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 3170-3 "Gazons méditerranéens amphibies halonitrophiles (<i>Heleochoilon</i>)"																		
<i>Crypsis aculeata</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.
<i>Oxybasis chenopodioides</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	94	.	.	.	.	.	.	.

<i>Oxybasis glauca</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	38	.	.	.	.	.	.	.
<i>Atriplex prostrata</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.
<i>Polygonum aviculare s. depressum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	19	.	.	.	.	.	.	.
<i>Plantago major s. pleiosperma</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	19	.	.	.	.	.	.	.
<i>Polygonum aviculare s. depressum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	19	.	.	.	.	.	.	.
<i>Amaranthus blitum s. emarginatus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	13	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C1.24 - Végétations flottantes enracinées des plans d'eau mésotrophes																			
<i>Trapa natans</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.
<i>Nuphar lutea</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C1.33 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes																			
<i>Zannichellia palustris s. pedicellata</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	100	.	.	.	.	.
<i>Zannichellia obtusifolia</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C1.34 - Végétations enracinées flottantes des plans d'eau eutrophes																			
<i>Ranunculus trichophyllus s. trichophyllus</i>	h	.	.	.	100	.	25	.	.	.	.	100	.	100	.	.	.	.	38
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C1.54 - Macrophytes submergés des eaux salées et saumâtres																			
<i>Ranunculus peltatus s. baudotii</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	100	.	100	.	.	.
Espèces diagnostiques du groupement à <i>Ludwigia grandiflora</i> et groupement à <i>Ludwigia peploides</i>																			
<i>Ludwigia grandiflora</i>	h	.	.	.	100	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100
Autres espèces																			
<i>Callitriche sp.</i>	h	50	.	.	.	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ceratophyllum demersum</i>	h	.	.	.	100	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Potamogeton trichoides</i>	h	.	.	.	.	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Chara globularis</i>	h	.	.	.	100	.	25	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Callitriche obtusangula</i>	h	.	.	.	100	.	25	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.
<i>Callitriche brutia</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	13
<i>Azolla filiculoides</i>	h	.	.	.	100	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Hydrocharis morsus-ranae</i>	h	.	.	.	.	.	25	.	50	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Potamogeton pusillus</i>	h	.	.	.	.	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus aquatilis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	13
<i>Rumex maritimus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.
<i>Sagina procumbens</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Alisma lanceolatum</i>	h	.	.	.	.	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Bolboschoenus maritimus</i>	h	.	.	.	.	.	25	.	69	.	.	.	100	.	.	.	.	.	38
<i>Myosotis sicula</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Carex hirta</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lycopus europaeus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	13
<i>Cyperus eragrostis</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Glyceria fluitans</i>	h	100	.	.	.	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25
<i>Epilobium tetragonum</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Plantago major</i>	h	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus repens</i>	h	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Eleocharis palustris</i>	h	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	25
<i>Cotula coronopifolia</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	13	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Poa trivialis</i>	h	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Juncus effusus</i>	h	.	.	.	.	.	25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Spergula marina</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	19	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Oenanthe fistulosa</i>	h	50	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Juncus gerardi</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	13
<i>Holcus lanatus</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Trifolium repens</i>	h	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Hypochaeris radicata</i>	h	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Alopecurus bulbosus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	13
<i>Trifolium squamosum</i>	h	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lolium perenne</i>	h	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Carex divisa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	13
<i>Agrostis stolonifera</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	38	.	.	.	.	100	.	.	.	.	13
etc.																			

Tableau 9. Tableau des espèces caractéristiques des habitats aquatiques de l'estuaire de la Loire. Les espèces diagnostiques, constantes et dominantes ont été calculées à partir des relevés identifiés par le système expert. Les espèces diagnostiques les plus fidèles ($\phi > 0,50$) sont marquées en gras et les espèces constantes les plus fréquentes (fréquence d'occurrence supérieure à 60 %) sont marquées en gras. Le symbole ‘*’ indique les HIC prioritaires

Habitats	Espèces caractéristiques
3130-4 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, de bas-niveau topographique, planitiaires, d'affinités atlantiques, des Isoeto-Juncetea" Nombre de relevés: 2	Espèces diagnostiques: <i>Damasonium alisma</i> Espèces constantes: <i>Ranunculus ophioglossifolius</i> , <i>Glyceria fluitans</i> , <i>Eleocharis palustris</i> , <i>Damasonium alisma</i> Espèces dominantes: <i>Damasonium alisma</i>
3130-5 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, acidiphiles, de niveau topographique moyen, planitiaires à montagnardes, des Isoeto-Juncetea" Nombre de relevés: 2	Espèces diagnostiques: <i>Juncus bufonius</i> , <i>Poa annua</i> Espèces constantes: <i>Poa annua</i> , <i>Juncus bufonius</i> , <i>Trifolium squamosum</i> , <i>Trifolium resupinatum</i> , <i>Trifolium repens</i> , <i>Trifolium ornithopodioides</i> , <i>Sagina procumbens</i> , <i>Ranunculus sardous</i> , <i>Ranunculus repens</i> , <i>Ranunculus ophioglossifolius</i> , <i>Polygonum aviculare</i> , <i>Poa trivialis</i> , <i>Plantago major</i> , <i>Myosurus minimus</i> , <i>Myosotis sicula</i> , <i>Lythrum hyssopifolia</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Leontodon hispidus</i> , <i>Laphangium luteoalbum</i> , <i>Hypochaeris radicata</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Erigeron floribundus</i> , <i>Epilobium tetragonum</i> , <i>Digitaria sanguinalis</i> , <i>Cyperus eragrostis</i> , <i>Chamaemelum nobile</i> , <i>Carex hirta</i> , <i>Alopecurus geniculatus</i> Espèces dominantes: <i>Myosurus minimus</i> , <i>Juncus bufonius</i> , <i>Cyperus eragrostis</i>
3150-1 "Plans d'eau eutrophes avec végétation enracinée avec ou sans feuilles flottantes" Nombre de relevés: 8	Espèces diagnostiques: <i>Zannichellia palustris</i> , <i>Stuckenia pectinata</i> Espèces constantes: <i>Zannichellia palustris</i> Espèces dominantes: <i>Zannichellia palustris</i> , <i>Stuckenia pectinata</i> , <i>Potamogeton trichoides</i> , <i>Elodea nuttallii</i> , <i>Chara globularis</i>
3150-2 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres submergés" Nombre de relevés: 1	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Lemna trisulca</i> Espèces dominantes: <i>Lemna trisulca</i>
3150-3 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres flottant à la surface de l'eau" Nombre de relevés: 7	Espèces diagnostiques: <i>Lemna gibba</i> , <i>Lemna minuta</i> , <i>Spirodela polyrhiza</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Wolffia arrhiza</i> Espèces constantes: <i>Spirodela polyrhiza</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Lemna gibba</i> , <i>Lemna minuta</i> Espèces dominantes: <i>Lemna gibba</i> , <i>Lemna minuta</i> , <i>Wolffia arrhiza</i> , <i>Spirodela polyrhiza</i> , <i>Lemna minor</i>
3170-3 "Gazons méditerranéens amphibies halonitrophiles (Heleochoilon)" * Nombre de relevés: 16	Espèces diagnostiques: <i>Crypsis aculeata</i> , <i>Oxybasis chenopodioides</i> , <i>Oxybasis glauca</i> , <i>Polygonum aviculare s. depressum</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Alopecurus geniculatus</i> , <i>Plantago major s. pleiosperma</i> , <i>Tripleurospermum maritimum</i> , <i>Amaranthus blitum s. emarginatus</i> Espèces constantes: <i>Crypsis aculeata</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Oxybasis chenopodioides</i> , <i>Bolboschoenus maritimus</i> , <i>Alopecurus geniculatus</i> , <i>Oxybasis glauca</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> Espèces dominantes: <i>Oxybasis chenopodioides</i> , <i>Crypsis aculeata</i> , <i>Atriplex prostrata</i>
C1.24 - Végétations flottantes enracinées des plans d'eau mésotrophes Nombre de relevés: 2	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Trapa natans</i> , <i>Nuphar lutea</i> Espèces dominantes: <i>Trapa natans</i> , <i>Nuphar lutea</i>
C1.33 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes Nombre de relevés: 2	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Zannichellia palustris s. pedicellata</i> , <i>Zannichellia obtusifolia</i> , <i>Stuckenia pectinata</i> , <i>Ranunculus trichophyllus s. trichophyllus</i> , <i>Ranunculus peltatus s. baudotii</i> , <i>Lemna minor</i> , <i>Chara globularis</i> Espèces dominantes: <i>Zannichellia palustris s. pedicellata</i> , <i>Stuckenia pectinata</i> , <i>Chara globularis</i>
C1.34 - Végétations enracinées flottantes des plans d'eau eutrophes Nombre de relevés: 1	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Zannichellia palustris s. pedicellata</i> , <i>Rumex maritimus</i> , <i>Ranunculus trichophyllus s. trichophyllus</i> , <i>Ranunculus peltatus s. baudotii</i> , <i>Plantago major</i> , <i>Callitriche obtusangula</i> , <i>Bolboschoenus maritimus</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> Espèces dominantes: <i>Ranunculus trichophyllus s. trichophyllus</i>

C1.54 - Macrophytes submergés des eaux salées et saumâtres	Espèces diagnostiques: <i>Ranunculus peltatus s. baudotii</i> , <i>Ranunculus trichophyllus s. trichophyllus</i>
Nombre de relevés: 8	Espèces constantes: <i>Ranunculus peltatus s. baudotii</i> , <i>Ranunculus trichophyllus s. trichophyllus</i>
Grpt à <i>Ludwigia grandiflora</i> et Grpt à <i>Ludwigia peploides</i>	Espèces diagnostiques: -
Nombre de relevés: 1	Espèces constantes: <i>Spirodela polyrhiza</i> , <i>Paspalum distichum</i> , <i>Ludwigia grandiflora</i> , <i>Lemna minor</i>
	Espèces dominantes: <i>Spirodela polyrhiza</i> , <i>Ludwigia grandiflora</i>



Habitats EUR28 / EUNIS

- 3130-4 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, de bas-niveau topographique, planitiaires, d'affinités atlantiques, des Isoeto-Juncetea" / C3.51 - Gazons ras eurosibériens à espèces annuelles amphibies
- 3130-5 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, acidiphiles, de niveau topographique moyen, planitiaires à montagnardes, des Isoeto-Juncetea" / C3.51 - Gazons ras eurosibériens à espèces annuelles amphibies
- 3150-1 "Plans d'eau eutrophes avec végétation enracinée avec ou sans feuilles flottantes" / C1.23 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau mésotrophes
- 3150-1 "Plans d'eau eutrophes avec végétation enracinée avec ou sans feuilles flottantes" / C1.33 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes
- 3150-2 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres submergés" / C1.22 - Végétations flottant librement des plans d'eau mésotrophes
- 3150-3 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres flottant à la surface de l'eau" / C1.22 - Végétations flottant librement des plans d'eau mésotrophes
- 3170-3 "Gazons méditerranéens amphibies halonitrophiles (Heleochoilon)" / C3.42 - Communautés amphibies méditerranéo-atlantiques
- NA ou I150-1 "Lagunes en mer à marées (façade atlantique)" / C1.33 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes ou X03 - Lagunes littorales saumâtres
- NA ou I150-1 "Lagunes en mer à marées (façade atlantique)" / C1.54 - Macrophytes submergés des eaux salées et saumâtres ou X03 - Lagunes littorales saumâtres
- NA / C1.24 - Végétations flottantes enracinées des plans d'eau mésotrophes
- NA / C1.34 - Végétations enracinées flottantes des plans d'eau eutrophes

Figure 10. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats aquatiques

Végétations de prairies

Au total, 531 relevés ont été identifiés par le système expert comme appartenant aux végétations de prairies (Tab. 10). 286 relevés ont été rattachés à une association végétale, dont les plus représentées sur le site sont le *Senecioni aquatici – Oenanthetum mediae* (96 relevés), l'*Eleocharito palustris – Oenanthetum fistulosae* (82 relevés) et l'*Hordeo secalini – Lolietum perennis* (69 relevés). En revanche, les associations rencontrées plus rarement sont le *Cirsio arvensis – Alopecuretum pratensis*, le *Caro verticillati – Juncetum acutiflori*, le *Pulicario dysentericae – Juncetum inflexi* et l'*Oenantho peucedanifoliae – Brometum racemosi* avec seulement 1 relevé. 245 relevés ne sont identifiés qu'au niveau de l'alliance et se répartissent au sein de 10 alliances dont 4 sont caractérisées par des communautés basales (CB de l'*Oenanthion fistulosae*, CB du *Bromion racemosi*, CB du *Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthion fistulosae* et CB de l'*Alopecurion utriculati*).

Les pelouses et prairies mésophiles (habitat EUNIS E1.91, E2.1 et E2.8) sont peu représentées à l'échelle du site (seulement 20 relevés) par rapport aux prairies humides (511 relevés). Ces dernières sont majoritairement représentées par deux habitats : (1) EUNIS E3.44 'Gazons inondés et communautés apparentées' (221 relevés) qui est essentiellement situé en bordure du fleuve (Fig. 11) et caractérisé par une faible diversité floristique (dominance d'*Agrostis stolonifera* et *Alopecurus geniculatus* (Tab. 11)) ; (2) EUNIS E3.41 'Prairies atlantiques et subatlantiques humides' (278 relevés) qui est localisé plus en retrait de la Loire, et dont les espèces diagnostiques sont *Poa trivialis*, *Alopecurus pratensis* ou *Oenanthe silaifolia*.

Parmi les habitats prairiaux, un seul relève de la DHFF : 6410-6 'Prés humides et bas-marais acidiphiles atlantiques' caractérisé par 12 relevés situés principalement sur les marges du site Natura 2000. Les espèces diagnostiques de cet habitat sont *Cirsium dissectum*, *Trocdaris verticillatum*, *Agrostis canina* ou *Scorzonera humilis* (Tab. 11).

Tableau 10. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations de prairies. Les espèces diagnostiques (avec la valeur phi > 0,25) sont surlignées en gris et celles très diagnostiques en gris foncé (avec phi > 0,50). La fidélité a été calculée en utilisant l'ensemble des 1 414 relevés rattachés à un habitat. Seules les espèces diagnostiques et les espèces les plus fréquentes sont présentées dans ce tableau.

Les communautés végétales ont été regroupées par types d'habitats à partir des relevés classés à l'échelle de l'association végétale et de l'alliance phytosociologique (le symbole 'b' indique les communautés basales (CB)). Les codes des alliances et des associations correspondent aux niveaux d'identification obtenus par le système expert : ThA : *Thero – Airion* ; Cyn : *Cynosurion cristati* ; LoP : *Lolio perennis – Plantaginion majoris* ; Bro : *Bromion racemosi* ; OB : *Oenanthe peucedanifoliae – Brometum racemosi* ; SO : *Senecioni aquatici – Oenanthetum mediae* ; HL : *Hordeo secalini – Lolietum perennis* ; EO : *Eleocharito palustris – Oenanthetum fistulosae* ; GO : *Gratiolo officinalis – Oenanthetum fistulosae* ; Oen : *Oenanthion fistulosae* ; JC : *Junco acutiflori – Cynosuretum cristati* ; CA : *Cirsio arvensis – Alopecuretum pratensis* ; Oen^b : CB de l'*Oenanthion fistulosae* ; Bro^b : CB du *Bromion racemosi* ; PJ : *Pulicario dysentericae – Juncetum inflexi* ; PA : *Potentillo anserinae – Alopecuretum geniculati* ; Pot : *Potentillion anserinae* ; RaO^b : CB du *Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthion fistulosae* ; Alo^b : CB de l'*Alopecurion utriculati* ; CS : *Cirsio dissecti – Scorzoneretum humilis* ; CJ : *Caro verticillati – Juncetum acutiflori*. * : groupes de relevés sans rattachement à l'échelle de l'association végétale mais identifiés à l'échelle de l'alliance. Strate 'h' : herbacée.

Habitats EUR28	-	-	-	-									-						6410-6		
Habitats EUNIS	E1.91	E2.1	E2.8	E3.41									E3.44						E3.51		
Alliances	ThA	Cyn	LoP	Bro						Oen			Oen ^b	Bro ^b			Pot	RaO ^b	Alo ^b		
Associations végétales	*	*	*	*	OB	SO	HL	EO	GO	*	JC	CA	*	*	PJ	PA	*	*	*	CS	CJ
Nombre de relevés identifiés	2	9	9	4	1	96	69	82	2	18	5	1	65	26	1	17	9	68	35	11	1
Strate																					
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS E1.91 - Pelouses siliceuses d'espèces annuelles naines																					
<i>Vulpia bromoides</i>	h	100	22			7	6														9
<i>Aira caryophylla</i>	h	50	11																		
<i>Draba verna</i>	h	50																			
<i>Crassula tillaea</i>	h	50																			
<i>Trifolium subterraneum</i>	h	50					1														
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS E2.1 - Pâturages permanents mésotrophes et prairies de post-pâturage																					
<i>Phleum pratense</i>	h		33			3	7	1		11				8					1		
<i>Agrostis capillaris</i>	h		67			11	6	1													9
<i>Centaurea decipiens s. thuilieri</i>	h		33			10	4														
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS E2.8 - Pelouses mésophiles piétinées à espèces annuelles																					
<i>Eryngium campestre</i>	h		11	56			1														
<i>Achillea millefolium</i>	h		33	33		1	6														
<i>Rumex pulcher</i>	h			33																	
<i>Hordeum murinum</i>	h			33																	
<i>Bromus hordeaceus</i>	h		33	67			12														3
<i>Galium verum</i>	h		11	22																	
<i>Plantago coronopus</i>	h	50		22															6	3	
<i>Poa annua</i>	h	50		56			1	1		6							11				
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS E3.41 Prairies atlantiques et subatlantiques humides																					
<i>Oenanthe silaifolia</i>	h		22			84	16	13	50	67				100	6		1				
<i>Argentina anserina</i>	h					3	13	60		11	80	100	6	8		24			3		
<i>Juncus effusus</i>	h				50	10	10	45		6	80		9	4							9
<i>Myosotis laxa s. cespitosa</i>	h					2	1	5	100	11			5								
<i>Oenanthe fistulosa</i>	h					11		38	100	72	20										
<i>Lotus pedunculatus</i>	h					3	6	1		11	60										73
<i>Eleocharis palustris</i>	h					6		73	100	56			43		35	11	4				
<i>Alopecurus geniculatus</i>	h					6	7	61		33	20		58	23		94	67	44	17		
<i>Carex disticha</i>	h					16	4	30		6		100									
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS E3.44 - Gazon inondés et communautés apparentées																					
<i>Juncus inflexus</i>	h					1	10	6					40	35	100	29	33		7	3	
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS E3.4 - Prairies eutrophes et mésotrophes humides ou mouilleuses																					
<i>Rumex crispus</i>	h		67		25	100	16	17	12		20		3	19		59	11	3			
<i>Glyceria fluitans</i>	h						1	63	50	17			62	4		18	22				

<i>Carex otrubae</i>	h	.	.	.	.	21	19	27	.	50	.	.	31	8	100	35	11	24	9	.	.	
<i>Pericaria amphibia</i>	h	.	.	.	.	11	10	40	50	28	.	.	9	4	.	.	.	.	.	.	.
Espèce diagnostique des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 6410-6 "Prés humides et bas-marais acidiphiles atlantiques"																							
<i>Danthonia decumbens</i>	h	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	36	.
<i>Cirsium dissectum</i>	h	.	.	.	.	3	.	2	.	6	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	82	100
<i>Scorzonera humilis</i>	h	.	.	.	.	100	2	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	73	.
<i>Trocdaris verticillatum</i>	h	.	.	.	.	1	3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	64	100
<i>Centaurea nigra</i>	h	.	.	.	.	100	7	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	55	.
<i>Stellaria graminea</i>	h	.	.	.	.	2	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	18	.
<i>Rumex acetosa</i>	h	50	33	.	50	.	20	14	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	82	.
<i>Carex leporina</i>	h	.	.	.	.	100	2	.	2	.	40	.	.	.	.	.	.	.	.	.	55	100
<i>Festuca rubra</i>	h	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	36	.
<i>Agrostis canina</i>	h	.	.	.	25	.	4	4	5	.	60	.	.	.	.	.	.	.	.	.	82	100
<i>Juncus acutiflorus</i>	h	.	.	.	.	100	4	3	17	.	60	.	3	.	.	.	.	.	.	.	73	100
<i>Anthoxanthum odoratum</i>	h	.	44	.	50	100	66	45	10	.	6	80	.	.	100	.	.	.	.	.	100	100
Autres espèces																							
<i>Lolium multiflorum</i>	h	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	15	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lolium perenne</i>	h	.	22	89	75	100	82	84	24	.	61	.	100	11	85	100	65	78	9	60	27	.	
<i>Agrostis stolonifera</i>	h	.	.	22	75	100	57	80	96	100	67	60	100	92	100	.	100	100	100	100	100	18	.
<i>Poa trivialis</i>	h	.	11	22	75	.	80	90	51	50	83	80	.	23	73	100	41	44	1	.	36	.	
<i>Ranunculus acris</i>	h	.	56	22	50	100	71	83	4	.	17	80	100	5	69	100	6	.	.	.	82	100	
<i>Trifolium repens</i>	h	.	22	33	25	100	35	46	26	.	33	20	.	2	8	100	18	11	.	3	55	.	
<i>Holcus lanatus</i>	h	50	67	22	100	100	68	62	6	.	6	60	.	.	100	.	.	.	.	3	91	100
<i>Ranunculus sardous</i>	h	.	11	.	25	.	18	30	35	.	50	.	.	20	12	100	76	44	12	26	9	.	
<i>Cirsium arvense</i>	h	.	33	.	25	.	13	46	4	.	6	40	.	3	35	100	12	.	4	29	.	.	
<i>Trifolium fragiferum</i>	h	.	11	.	.	.	32	22	30	.	44	20	100	8	12	.	6	11	10	17	.	.	
<i>Ranunculus repens</i>	h	.	11	.	50	100	43	35	45	50	83	80	.	15	8	.	18	.	.	.	27	.	
<i>Elytrigia repens</i>	h	.	33	.	25	.	17	23	12	.	6	.	.	2	12	.	12	22	1	20	.	.	
<i>Alopecurus pratensis</i>	h	.	33	33	75	.	75	67	17	50	61	20	100	.	19	100	.	.	.	.	36	.
<i>Rumex conglomeratus</i>	h	.	.	.	25	.	4	3	5	50	11	20	.	8	8	100	.	.	4	6	.	.	
<i>Hordeum secalinum</i>	h	.	.	.	.	.	65	64	5	.	44	.	.	9	38	100	29	67	7	63	.	.
<i>Cynosurus cristatus</i>	h	.	33	.	75	100	72	52	2	.	11	40	.	.	.	100	6	.	.	.	64	.	
<i>Plantago lanceolata</i>	h	.	22	56	25	100	20	13	2	50	11	.	.	.	.	.	.	.	.	.	27	100
<i>Carex riparia</i>	h	.	11	.	.	.	3	4	21	50	17	20	.	31	.	.	12	22	1	.	.	.	
<i>Lotus corniculatus</i>	h	.	33	11	50	.	17	12	1	.	6	20	.	.	.	.	.	.	1	.	36	100
<i>Potentilla reptans</i>	h	.	11	33	.	.	10	19	1	.	.	.	100	2	.	.	6	.	.	.	18	100	
<i>Gaudinia fragilis</i>	h	.	11	.	.	100	39	26	.	.	6	3	45	.
<i>Bromus racemosus</i>	h	.	22	.	.	100	59	29	7	.	39	.	.	.	.	.	.	.	.	.	18	.
<i>Phalaris arundinacea</i>	h	.	11	.	.	.	6	6	44	100	44	.	.	8	19	.	12	11	.	.	.	.
<i>Hypochaeris radicata</i>	h	.	11	22	25	100	16	20	1	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	45	100
<i>Trifolium pratense</i>	h	.	22	11	25	100	51	36	.	.	6	.	.	4	.	.	.	.	.	.	45	100
<i>Scorzoneroïdes autumnalis</i>	h	.	.	11	50	.	26	12	15	50	22	20	.	.	.	.	12	.	.	.	9	.
<i>Carex hirta</i>	h	50	11	.	.	.	9	16	7	.	.	40	100	.	.	100	6	.	.	.	27	.	
<i>Phragmites australis</i>	h	.	.	11	.	.	1	3	2	.	39	.	.	12	4	.	12	.	34	.	.	.	
<i>Alopecurus bulbosus</i>	h	.	11	.	.	.	47	14	16	.	56	.	.	.	.	.	18	22	4	9	.	.
<i>Ranunculus flammula</i>	h	.	.	.	.	.	6	.	59	100	22	60	.	5	.	.	6	.	.	.	36	100
<i>Trifolium sp.</i>	h	.	.	.	.	.	7	4	6	.	17	.	.	2	4	.	18	11	.	.	.	.
<i>Lychnis flos-cuculi</i>	h	.	11	.	25	.	21	4	1	50	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	36	100
<i>Atriplex prostrata</i>	h	.	.	11	.	.	1	5	.	.	.	.	.	8	4	.	12	.	60	63	.	.
<i>Jacobaea aquatica</i>	h	.	11	.	.	.	69	10	18	50	78	20	.	.	.	.	.	11	.	.	.	.
<i>Cardamine pratensis</i>	h	.	.	.	25	.	6	3	9	.	6	20	.	.	.	.	.	.	.	.	36	100
<i>Pericaria species</i>	h	.	.	11	.	.	7	3	5	.	.	.	.	2	8	.	12	11	.	.	.	.
<i>Cerastium fontanum s. vulgare</i>	h	.	.	11	25	100	4	10	.	.	6	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	100
<i>Deschampsia cespitosa</i>	h	.	11	.	25	.	.	12	6	.	.	40	.	.	8	.	6	.	.	.	27	.	
<i>Althaea officinalis</i>	h	.	.	.	.	.	4	2	.	.	.	.	.	2	12	.	12	22	7	20	.	.
<i>Polygonum aviculare</i>	h	.	.	.	.	.	1	1	.	.	.	.	.	2	.	.	6	22	18	11	.	.
<i>Taraxacum officinale</i>	h	.	.	11	25	.	4	9	4	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	9	100
<i>Schedonorus arundinaceus</i>	h	.	.	.	.	.	5	13	.	.	.	.	.	.	27	.	24	.	7	3	9	.
<i>Carex divisa</i>	h	.	11	.	.	.	7	7	1	.	.	.	.	.	.	.	.	22	.	17	9	.
<i>Plantago major</i>	h	.	.	.	.	.	1	6	1	.	.	.	.	2	.	.	18	.	16	20	.	.
<i>Juncus conglomeratus</i>	h	.	.	.	.	100	5	1	.	.	.	.	.	2	.	.	6	.	.	.	27	100
etc.																							

Tableau 11. Tableau des espèces caractéristiques des habitats prairiaux de l'estuaire de la Loire. Les espèces diagnostiques, constantes et dominantes ont été calculées à partir des relevés identifiés par le système expert. Les espèces diagnostiques les plus fidèles ($\phi > 0,50$) sont marquées en gras et les espèces constantes les plus fréquentes (fréquence d'occurrence supérieure à 60 %) sont marquées en gras.

Habitats	Espèces caractéristiques
E1.91 Pelouses siliceuses d'espèces annuelles naines Nombre de relevés: 2	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Vulpia bromoides</i> , <i>Trifolium suffocatum</i> , <i>Trifolium subterraneum</i> , <i>Trifolium campestre</i> , <i>Trifolium arvense</i> , <i>Spergula rubra</i> , <i>Rumex acetosa</i> , <i>Poa annua</i> , <i>Plantago coronopus</i> , <i>Lotus angustissimus</i> , <i>Logfia minima</i> , <i>Hypochaeris glabra</i> , <i>Hypericum perforatum</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Hedera helix s. helix</i> , <i>Draba verna</i> , <i>Crassula tillaea</i> , <i>Carex hirta</i> , <i>Aira caryophylla</i> Espèces dominantes: <i>Vulpia bromoides</i> , <i>Trifolium subterraneum</i> , <i>Rumex acetosa</i>
E2.1 - Pâturages permanents mésotrophes et prairies de post-pâturage Nombre de relevés: 9	Espèces diagnostiques: <i>Agrostis capillaris</i> , <i>Phleum pratense</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Rumex crispus</i> , <i>Dactylis glomerata</i> , <i>Bromus hordeaceus</i> Espèces constantes: <i>Rumex crispus</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Agrostis capillaris</i> , <i>Ranunculus acris</i> , <i>Dactylis glomerata</i> , <i>Bromus hordeaceus</i> , <i>Anthoxanthum odoratum</i> Espèces dominantes: <i>Agrostis capillaris</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Rubus ulmifolius</i> , <i>Poa trivialis</i> , <i>Elytrigia repens</i> , <i>Dactylis glomerata</i>
E2.8 - Pelouses mésophiles piétinées à espèces annuelles Nombre de relevés: 9	Espèces diagnostiques: <i>Rumex pulcher</i> , <i>Hordeum murinum</i> , <i>Ranunculus bulbosus</i> , <i>Bromus hordeaceus</i> , <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Eryngium campestre</i> , <i>Achillea millefolium</i> , <i>Galium verum</i> , <i>Convolvulus arvensis</i> , <i>Poa annua</i> , <i>Dactylis glomerata</i> Espèces constantes: <i>Lolium perenne</i> , <i>Bromus hordeaceus</i> , <i>Poa annua</i> , <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Eryngium campestre</i> , <i>Dactylis glomerata</i> , <i>Convolvulus arvensis</i> Espèces dominantes: <i>Dactylis glomerata</i> , <i>Vulpia bromoides</i> , <i>Poa trivialis</i> , <i>Plantago lanceolata</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Hordeum murinum</i> , <i>Convolvulus arvensis</i>
E3.41 Prairies atlantiques et subatlantiques humides Nombre de relevés: 278	Espèces diagnostiques: <i>Poa trivialis</i> , <i>Alopecurus pratensis</i> , <i>Oenanthe silaifolia</i> , <i>Hordeum secalinum</i> , <i>Cynosurus cristatus</i> , <i>Ranunculus acris</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Trifolium fragiferum</i> , <i>Bromus racemosus</i> , <i>Carex disticha</i> Espèces constantes: <i>Poa trivialis</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Lolium perenne</i> , <i>Alopecurus pratensis</i> , <i>Ranunculus acris</i> , <i>Ranunculus repens</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Oenanthe silaifolia</i> , <i>Hordeum secalinum</i> , <i>Cynosurus cristatus</i> , <i>Anthoxanthum odoratum</i> , <i>Jacobaea aquatica</i> Espèces dominantes: <i>Agrostis stolonifera</i>
E3.44 Gazons inondés et communautés apparentées Nombre de relevés: 221	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Alopecurus geniculatus</i> Espèces dominantes: <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Alopecurus geniculatus</i>
6410-6 "Prés humides et bas-marais acidiphiles atlantiques" Nombre de relevés: 12	Espèces diagnostiques: <i>Cirsium dissectum</i> , <i>Trocdaris verticillatum</i> , <i>Agrostis canina</i> , <i>Scorzonera humilis</i> , <i>Juncus acutiflorus</i> , <i>Lotus pedunculatus</i> , <i>Carex leporina</i> , <i>Anthoxanthum odoratum</i> , <i>Centaurea nigra</i> , <i>Danthonia decumbens</i> , <i>Juncus conglomeratus</i> , <i>Rumex acetosa</i> , <i>Ranunculus acris</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Lotus corniculatus</i> , <i>Cardamine pratensis</i> , <i>Stellaria graminea</i> , <i>Festuca rubra</i> , <i>Hypochaeris radicata</i> , <i>Deschampsia cespitosa</i> Espèces constantes: <i>Anthoxanthum odoratum</i> , <i>Holcus lanatus</i> , <i>Ranunculus acris</i> , <i>Cirsium dissectum</i> , <i>Agrostis canina</i> , <i>Rumex acetosa</i> , <i>Juncus acutiflorus</i> , <i>Trocdaris verticillatum</i> , <i>Scorzonera humilis</i> , <i>Lotus pedunculatus</i> , <i>Cynosurus cristatus</i> , <i>Carex leporina</i> , <i>Trifolium repens</i> , <i>Trifolium pratense</i> , <i>Hypochaeris radicata</i> , <i>Centaurea nigra</i> , <i>Ranunculus flammula</i> , <i>Lychnis flos-cuculi</i> , <i>Lotus corniculatus</i> , <i>Gaudinia fragilis</i> , <i>Cardamine pratensis</i> Espèces dominantes: <i>Agrostis canina</i> , <i>Anthoxanthum odoratum</i> , <i>Juncus acutiflorus</i>

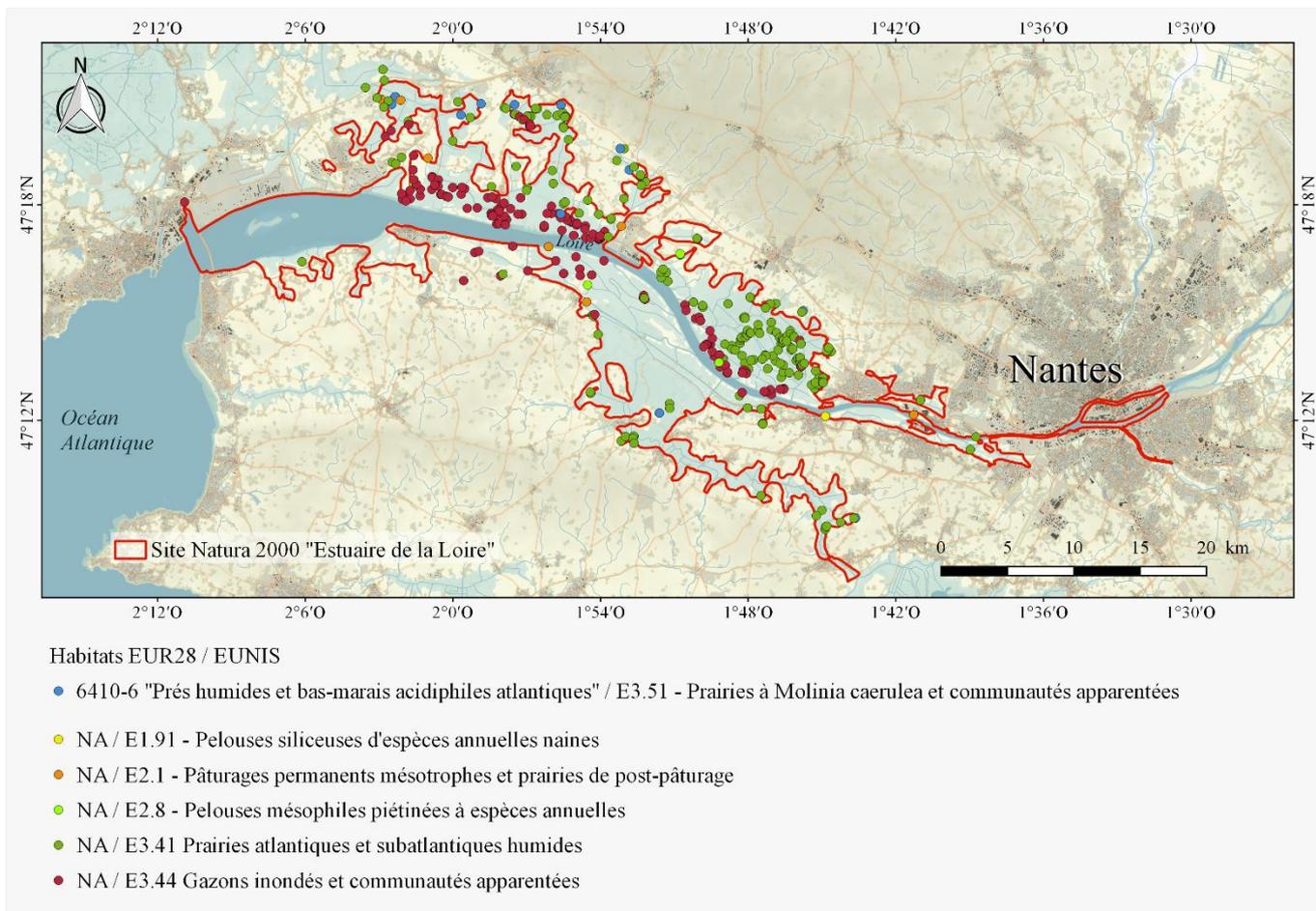


Figure 11. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats prairiaux

Végétations d'ourlets et mégaphorbiaies

72 relevés phytosociologiques ont été rattachés à un syntaxon de type 'ourlet' ou 'mégaphorbiaie', dont 65 à une association végétale et 7 à une alliance (Tab. 12).

Le *Calystegio sepium – Angelicetum heterocarpae* est l'association la plus reconnue avec 54 relevés. A l'inverse, l'*Urtico dioicae – Convolvuletum sepium* et l'*Anthriscetum sylvestris* correspondent aux communautés végétales comprenant le moins de relevés (un seul relevé chacune). Au total, le *Calystegio sepium – Althaeion officinalis* est l'alliance la mieux reconnue à l'échelle du site avec 56 relevés. Elle correspond à l'habitat HIC 6430-5 'Mégaphorbiaies oligohalines' qui se caractérise notamment par les espèces diagnostiques suivantes : *Angelica heterocarpa*, *Oenanthe crocata*, *Jacobaea aquatica* et *Mentha aquatica* (Tab. 13). Les relevés effectués pour cette mégaphorbiaie se localisent en bordure de Loire sur la moitié amont du site Natura 2000 (Fig. 12).

Les relevés du *Convolvulion sepium* caractérisent potentiellement l'habitat d'intérêt communautaire 6430-4 'Mégaphorbiaies eutrophes des eaux douces', pour lequel des informations complémentaires sur le contexte stationnel sont nécessaires (habitat à logique mixte). Les autres syntaxons d'ourlets et mégaphorbiaies relèvent des HIC 6430-1 'Mégaphorbiaies mésotrophes collinéennes', et 6430-6 'Végétations des lisières forestières nitrophiles, hygroclines, héliophiles à semi-héliophiles'.

Selon la typologie EUNIS, les ourlets et mégaphorbiaies sont intégrées dans les E5.41 'Écrans ou rideaux rivulaires de grandes herbacées vivaces' et E5.43 'Lisières forestières ombragées'.

Tableau 12. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations d'ourlets et de mégaphorbiaies. Les espèces diagnostiques (avec la valeur phi > 0,25) sont surlignées en gris et celles très diagnostiques en gris foncé (avec phi > 0,50). La fidélité a été calculée en utilisant l'ensemble des 1 414 relevés rattachés à un habitat.

Les communautés végétales ont été regroupées par types d'habitats à partir des relevés classés à l'échelle de l'association végétale et de l'alliance phytosociologique. Les codes des alliances et des associations correspondent aux niveaux d'identification obtenus par le système expert : TA : *Thalictrum flavi* – *Althaeetum officinalis* ; UC : *Urtico dioicae* – *Convolvuletum sepium* ; UP : *Urtico dioicae* – *Phalaridetum arundinaceae* ; Con : *Convolvulion sepium* ; Can : *Calystegio sepium* – *Angelicetum heterocarphae* ; CaA : *Calystegio sepium* – *Althaeion officinalis* ; AN : *Anthriscetum sylvestris*. * : groupes de relevés sans rattachement à l'échelle de l'association végétale mais identifiés à l'échelle de l'alliance. Strate 'h' : herbacée ; Strate 'a' : arbustive ; Strate 'A' : Arborée. '?' : végétations potentiellement associées à un HIC (habitats à logique biotope / mixte)

Habitats EUR28	6430-1	6430-4?			6430-5		6430-6	
Habitats EUNIS	E3.41							E5.43
Alliances				Con		CaA		
Associations végétales	TA	UC	UP	*	Can	*	AN	
Nombre de relevés identifiés	2	1	7	5	54	2	1	
Strate								
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 6430-1 "Mégaphorbiaies mésotrophes collinéennes"								
<i>Thalictrum flavum</i>	h	100	.	14	.	.	.	
<i>Lythrum salicaria</i>	h	100	.	57	.	65	.	
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 6430-4 "Mégaphorbiaies eutrophes des eaux douces"								
<i>Epilobium hirsutum</i>	h	.	43	.	.	.	.
<i>Urtica dioica</i>	h	100	71	80	28	50	100	
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 6430-5 "Mégaphorbiaies oligohalines"								
<i>Angelica heterocarpa</i>	h	.	.	.	89	50	.	
<i>Oenanthe crocata</i>	h	.	43	20	94	50	.	
<i>Scrophularia auriculata</i>	h	.	.	.	28	.	.	
<i>Symphytichum lanceolatum</i>	h	.	.	.	33	.	.	
<i>Rumex obtusifolius</i>	h	.	.	.	20	.	.	
<i>Epipactis helleborine</i>	h	.	.	.	15	.	.	
<i>Jacobaea aquatica</i>	h	.	.	.	94	50	.	
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 6430-6 "Végétations des lisières forestières nitrophiles, hydroclines, héliophiles à semi-héliophiles"								
<i>Anthriscus sylvestris</i>	h	.	.	.	.	.	100
Autres espèces								
<i>Phalaris arundinacea</i>	h	100	.	71	100	78	50	
<i>Convolvulus sepium</i>	h	100	100	86	80	65	100	
<i>Rubus caesius</i>	h	.	100	29	20	13	50	
<i>Galium aparine</i>	h	.	100	43	40	2	100	
<i>Cirsium arvense</i>	h	.	100	43	20	13	50	
<i>Althaea officinalis</i>	h	50	.	14	.	4	50	
<i>Solanum dulcamara</i>	h	50	.	14	40	.	50	
<i>Elytrigia repens</i>	h	.	.	14	20	2	.	
<i>Poa trivialis</i>	h	.	.	14	20	2	.	
<i>Symphytum officinale</i>	h	.	.	14	.	2	100	
<i>Ranunculus repens</i>	h	50	.	.	.	81	50	
<i>Iris pseudacorus</i>	h	100	.	14	.	13	.	
<i>Rumex acetosa</i>	h	.	.	14	.	4	.	
<i>Lycopus europaeus</i>	h	.	.	14	.	9	.	
<i>Carex riparia</i>	h	.	.	14	.	2	.	
<i>Humulus lupulus</i>	h	.	.	14	.	2	.	
<i>Arrhenatherum elatius</i>	h	.	.	.	.	4	100
<i>Argentina anserina</i>	h	.	.	14	.	2	.	
<i>Glyceria maxima</i>	h	50	.	29	.	.	.	
<i>Ranunculus sceleratus</i>	h	.	.	14	.	2	.	
<i>Phragmites australis</i>	h	.	.	.	.	6	50
<i>Pulicaria dysenterica</i>	h	.	.	14	.	2	.	
<i>Carex hirta</i>	h	.	.	14	.	2	.	
<i>Mentha aquatica</i>	h	.	.	.	.	22	50

Tableau 13. Tableau des espèces caractéristiques des habitats d'ourlets et de mégaphorbiaies de l'estuaire de la Loire. Les espèces diagnostiques, constantes et dominantes ont été calculées à partir des relevés identifiés par le système expert. Les espèces diagnostiques les plus fidèles ($\phi > 0,50$) sont marquées en gras et les espèces constantes les plus fréquentes (fréquence d'occurrence supérieure à 60 %) sont marquées en gras

Habitats	Espèces caractéristiques
6430-1 "Mégaphorbiaies mésotrophes collinéennes" Nombre de relevés: 2	Espèces diagnostiques: <i>Thalictrum flavum</i> , <i>Iris pseudacorus</i> Espèces constantes: <i>Thalictrum flavum</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Lythrum salicaria</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Convolvulus sepium</i> , <i>Solanum dulcamara</i> , <i>Ranunculus repens</i> , <i>Potentilla reptans</i> , <i>Glyceria maxima</i> , <i>Fraxinus angustifolia s. oxycarpa</i> , <i>Althaea officinalis</i> Espèces dominantes: <i>Phalaris arundinacea</i>
6430-4 "Mégaphorbiaies eutrophes des eaux douces" Nombre de relevés: 13	Espèces diagnostiques: <i>Epilobium hirsutum</i> , <i>Rubus caesius</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Convolvulus sepium</i> , <i>Galium aparine</i> Espèces constantes: <i>Convolvulus sepium</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Galium aparine</i> , <i>Cirsium arvense</i> Espèces dominantes: <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Convolvulus sepium</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Elytrigia repens</i>
6430-5 "Mégaphorbiaies oligohalines" Nombre de relevés: 56	Espèces diagnostiques: <i>Angelica heterocarpa</i> , <i>Oenanthe crocata</i> , <i>Jacobaea aquatica</i> , <i>Mentha aquatica</i> , <i>Trigonella altissima</i> , <i>Ranunculus repens</i> , <i>Rumex obtusifolius</i> , <i>Scrophularia auriculata</i> , <i>Schedonorus arundinaceus</i> , <i>Lythrum salicaria</i> , <i>Stachys palustris</i> , <i>Symphotrichum lanceolatum</i> Espèces constantes: <i>Oenanthe crocata</i> , <i>Jacobaea aquatica</i> , <i>Angelica heterocarpa</i> , <i>Ranunculus repens</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Lythrum salicaria</i> , <i>Convolvulus sepium</i> , <i>Schedonorus arundinaceus</i> Espèces dominantes: <i>Oenanthe crocata</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Angelica heterocarpa</i>
6430-6 "Végétations des lisières forestières nitrophiles, hydroclines, héliophiles à semi-héliophiles" Nombre de relevés: 1	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Urtica dioica</i> , <i>Symphytum officinale</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Heracleum sphondylium</i> , <i>Galium aparine</i> , <i>Dactylis glomerata</i> , <i>Arrhenatherum elatius</i> , <i>Anthriscus sylvestris</i> , <i>Anisantha sterilis</i> Espèces dominantes: <i>Galium aparine</i> , <i>Anthriscus sylvestris</i>

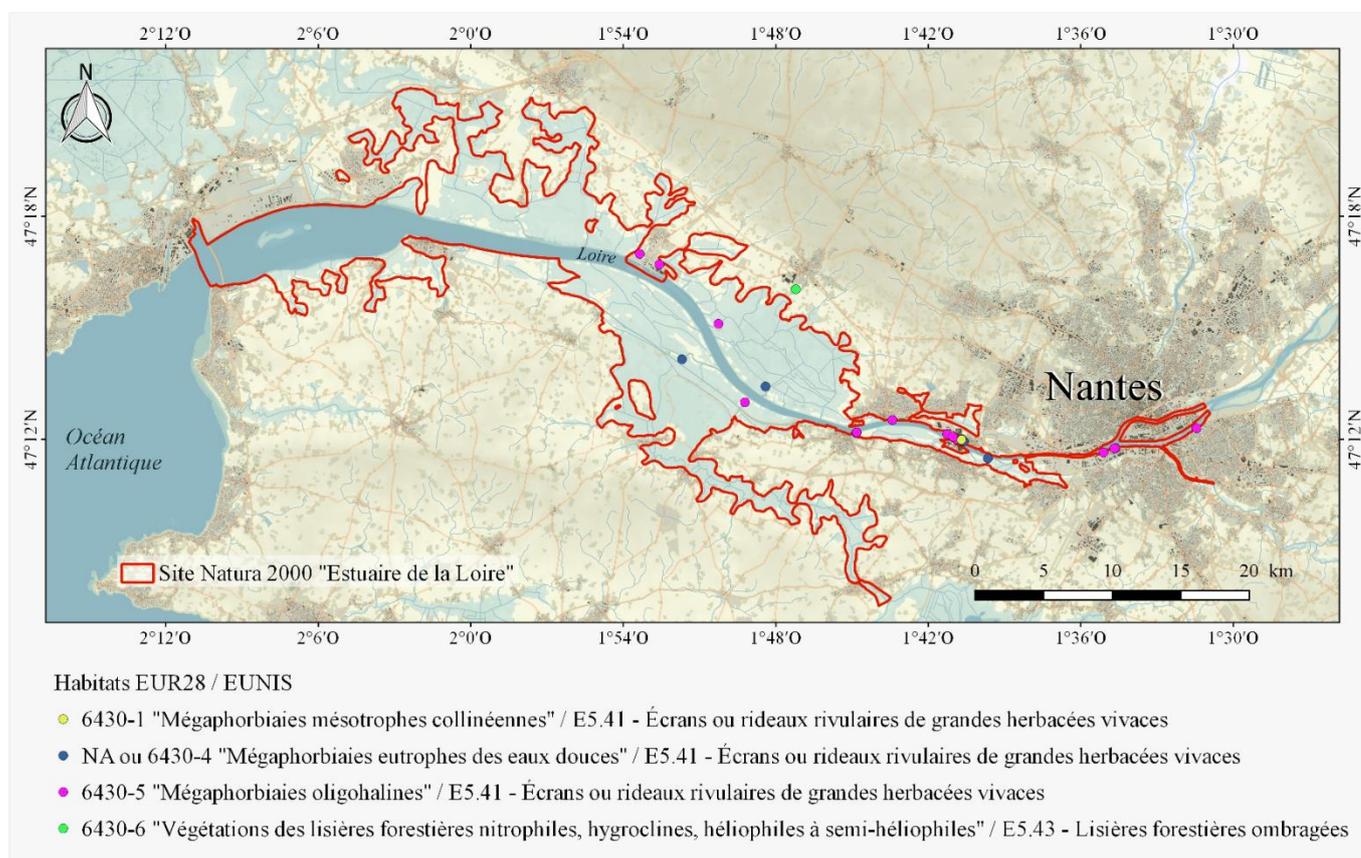


Figure 12. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats d'ourlets et de mégaphorbiaies

Végétations de roselières

236 relevés ont permis de dresser la typologie des roselières de l'estuaire de la Loire, dont 222 ont été identifiés à l'échelle de l'association végétale et 14 relevés à l'échelle de l'alliance phytosociologique (Tab. 14).

Les deux associations végétales les mieux identifiées sont l'*Apio nodiflori – Eleocharitetum amphibiae* (38 relevés) et le *Scirpetum maritimi* (40 relevés), dont 23 relevés constituent une communauté basale. Ces roselières correspondent à l'habitat EUNIS C3.27 'Formations halophiles à *Scirpus*, *Bolboschoenus* et *Schoenoplectus*' qui se caractérise sur l'estuaire de la Loire par la présence très régulière de *Bolboschoenus maritimus* et les espèces diagnostiques suivantes : *Schoenoplectus triqueter*, *Eleocharis bonariensis* ou *Helosciadium nodiflorum* (Tab. 15). Cet habitat se localise principalement sur les bords de Loire (Fig. 13).

Les phragmitaies à *Phragmites australis* (EUNIS C3.21) sont également largement représentées sur le site et sont caractérisées notamment par une communauté à *Phragmites australis* et *Oenanthe crocata* ('Phragmitaie oligohaline') qui a été régulièrement observée (25 relevés) et nécessiterait une description phytosociologique précise. L'*Astero tripolii – Phragmitetum communis* et le *Phragmitetum communis* sont les deux autres associations qui se rattachent à cet habitat, marqué essentiellement par la très grande dominance du *Phragmites australis*.

Les habitats les moins bien représentés sont l'EUNIS C3.23 'Typhaies' et l'EUNIS C3.22 'Scirpaies à *Scirpus lacustris*' avec seulement deux relevés chacun.

Aucun habitat d'intérêt communautaire n'a été identifié pour les végétations de roselières.

Tableau 14. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations de roselières. Les espèces diagnostiques (avec la valeur phi > 0,25) sont surlignées en gris et celles très diagnostiques en gris foncé (avec phi > 0,50). La fidélité a été calculée en utilisant l'ensemble des 1 414 relevés rattachés à un habitat. Seules les espèces diagnostiques et les espèces les plus fréquentes sont présentées dans ce tableau.

Les communautés végétales ont été regroupées par types d'habitats à partir des relevés classés à l'échelle de l'association végétale et de l'alliance phytosociologique (le symbole 'b' indique les communautés basales (CB)). Les codes des alliances et des associations correspondent aux niveaux d'identification obtenus par le système expert : GF : *Glycerietum fluitantis* ; AP : *Asterotripolii – Phragmitetum communis* ; PHr : *Phragmitetum communis* ; PO : Phragmitaie oligohaline ; SLa : *Scirpetum lacustris* ; TL : *Typhetum latifoliae* ; TAn : *Typhetum angustifoliae* ; EP : *Eleocharitetum palustris* ; GA : *Glycerietum aquaticae* ; Phl : *Phalaridion arundinaceae* ; AE : *Apio nodiflori – Eleocharitetum amphibiae* ; STr : *Scirpetum triquetri* ; SC : *Scirpetum maritimi* ; SC^b : CB du *Scirpetum maritimi* ; EB : *Eleocharito palustris – Bolboschoenetum maritimi* ; Cat : *Chenopodio – Atriplicetum salinae* ; GC : *Galio palustris – Caricetum ripariae* ; CG : *Caricetum gracilis*. * : groupes de relevés sans rattachement à l'échelle de l'association végétale mais identifiés à l'échelle de l'alliance. Strate 'h' : herbacée ; Strate 'a' : arbustive

Habitats EUR28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Habitats EUNIS	C3.1	C3.21			C3.22	C3.23		C3.24	C3.25	C3.26	C3.27				C3.5	D5.21		
Alliances										Phl								
Associations végétales	GF	AP	PHr	PO	SLa	TL	TAn	EP	GA	*	AE	STr	SC	SC ^b	EB	Cat	GC	CG
Nombre de relevés identifiés	5	11	3	25	2	1	1	16	15	14	38	17	17	23	16	10	19	3
Strate																		
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.1 - Formations à hélrophytes riches en espèces																		
<i>Glyceria fluitans</i>	h	100	.	.	.	.	.	50	53	7	.	.	12	4	.	.	11	33
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.21 - Phragmitaies à <i>Phragmites australis</i>																		
<i>Phragmites australis</i>	h	100	100	100	50	100	100	25	7	29	26	12	29	26	6	30	.	.
<i>Lycopus europaeus</i>	h	.	67	.	.	.	.	.	7	7	.	6	.	.	.	.	11	.
<i>Oenanthe crocata</i>	h	.	.	88	.	.	.	6	.	7	32	6	6	4	.	.	11	.
<i>Caltha palustris</i>	h	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.22 - Scirpaies à <i>Scirpus lacustris</i>																		
<i>Schoenoplectus lacustris</i>	h	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.23 - Typhaies																		
<i>Typha latifolia</i>	h	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Typha angustifolia</i>	h	.	.	.	.	.	100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.24 - Communautés non-graminoïdes de moyenne-haute taille bordant l'eau																		
<i>Eleocharis palustris</i>	h	80	.	.	.	.	.	100	47	.	11	6	24	.	6	.	11	33
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.25 - Formations à graminoides de moyenne-haute taille des bords des eaux																		
<i>Glyceria maxima</i>	h	100	.	100	.	.	.	38	100	29	5	.	.	.	.	.	16	33
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.26 - Formations à <i>Phalaris arundinacea</i>																		
<i>Phalaris arundinacea</i>	h	.	.	100	16	50	.	.	47	100	13	18	.	4	6	.	37	67
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.27 - Formations halophiles à <i>Scirpus</i>, <i>Bolboschoenus</i> et <i>Schoenoplectus</i>																		
<i>Eleocharis bonariensis</i>	h	.	.	.	28	.	.	.	.	.	100	41	12	17	.	.	.	.
<i>Helosciadium nodiflorum</i>	h	.	.	.	28	.	.	13	.	.	61	47	18	4	.	.	.	.
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	h	.	.	33	24	.	100	.	7	.	58	53	6	4	.	.	.	.
<i>Jacobaea aquatica</i>	h	.	.	.	40	.	100	.	.	.	76	35	12	9	.	.	.	33
<i>Schoenoplectus triquetri</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	37	100	6	4	.	.	.	.
<i>Callitriche stagnalis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	12	.	.	.	.	.	.
<i>Persicaria hydropiper</i>	h	.	.	.	8	.	100	.	7	.	29	59	.	.	.	.	5	.
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	18	.	4	.	.	.	.
<i>Bolboschoenus maritimus</i>	h	.	36	.	8	50	.	38	7	.	21	.	100	100	100	50	16	.
<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	7	.	.	.	24	.	.	.	.	.
<i>Ranunculus sceleratus</i>	h	.	36	33	12	.	.	.	27	7	8	.	41	52	19	30	5	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS C3.5 - Berges périodiquement inondées à végétation pionnière et éphémère																		
<i>Cotula coronopifolia</i>	h	.	9	.	4	.	.	13	.	.	.	.	35	39	44	100	.	.
<i>Polypogon monspeliensis</i>	h	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.	18	26	25	80	5	.
<i>Pseudosclerochloa rupestris</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	30	.	.
<i>Oxybasis chenopodioides</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	30	.	.

Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS D5.21 - Communautés de grands Carex (magnocariçaiques)

<i>Carex riparia</i>	h	40	.	67	4	.	.	.	13	20	29	3	6	12	.	.	.	100	.	
<i>Carex acuta</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	6	13	7	.	.	.	.	.	.	.	100
<i>Myosotis sp.</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	67
Autres espèces																				
<i>Lysimachia vulgaris</i>	h	.	.	33	.	50	.	.	.	.	14	.	.	.	.	.	.	.	11
<i>Agrostis stolonifera</i>	h	20	18	.	8	.	.	.	56	67	43	16	6	76	48	25	80	47	33	
<i>Lythrum salicaria</i>	h	20	.	.	8	.	100	.	.	7	7	42	29	6	.	.	.	21	33	
<i>Convolvulus sepium</i>	h	20	55	67	56	.	100	.	.	13	29	5	.	.	.	.	.	42	33
<i>Atriplex prostrata</i>	h	.	82	.	8	.	.	.	6	13	.	3	.	29	17	50	70	32	.	
<i>Rumex crispus</i>	h	20	.	33	36	.	.	.	19	27	7	21	.	29	.	6	.	21	.	
<i>Ranunculus repens</i>	h	.	.	.	28	.	.	.	.	13	14	42	6	6	4	.	.	.	33
<i>Angelica heterocarpa</i>	h	.	.	.	36	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Alopecurus geniculatus</i>	h	20	.	.	.	.	.	.	38	33	.	8	.	12	13	.	20	11	.
<i>Juncus effusus</i>	h	20	.	.	.	.	.	.	.	13	7	.	.	12	4	.	.	16	33
<i>Puccinellia maritima</i>	h	.	9	.	.	.	.	.	6	.	.	3	.	12	17	56	40	.	.
<i>Carex otrubae</i>	h	.	.	.	12	.	.	.	6	7	14	3	.	41	.	.	.	11	33	
<i>Galium palustre</i>	h	.	.	33	4	.	.	.	.	20	14	11	.	.	.	.	.	16	33
<i>Persicaria species</i>	h	20	.	33	12	.	.	.	.	7	14	8	.	6	.	.	.	5	.
<i>Iris pseudacorus</i>	h	40	.	.	.	50	.	.	6	27	29	.	.	.	.	.	.	16	.
<i>Callitriche sp.</i>	h	40	.	.	44	.	.	.	.	7	.	3	6	12	4	.	.	.	.
<i>Poa trivialis</i>	h	40	.	33	.	.	.	.	.	27	14	5	.	.	.	.	.	5	.
<i>Juncus inflexus</i>	h	20	.	.	.	.	.	.	19	7	.	.	.	29	9	.	.	21	.
<i>Tripolium pannonicum</i>	h	.	27	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	12	35	75	40	.	.
<i>Ranunculus sardous</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	13	7	.	.	.	12	.	.	10	11	.
<i>Spergula marina</i>	h	.	18	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	18	4	6	40	.	.
<i>Oenanthe fistulosa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	19	.	7	3	.	12	.	.	.	16	.
<i>Alopecurus bulbosus</i>	h	.	9	.	.	.	.	.	6	.	.	.	.	12	9	.	.	.	33
<i>Cirsium arvense</i>	h	.	.	33	.	.	.	.	.	.	7	3	.	.	.	.	10	16	.
<i>Persicaria amphibia</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	25	27	.	11	.	.	.	.	.	26	33
<i>Ranunculus flammula</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	19	20	7	.	.	.	.	.	.	11	67
<i>Plantago major</i>	h	.	9	.	.	.	.	.	.	.	.	13	.	6	.	6	20	.	.
<i>Solanum dulcamara</i>	h	.	.	33	4	.	100	.	.	7	.	.	.	.	.	.	.	11	.
<i>Carex disticha</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	13	7	.	.	.	.	.	.	5	33
<i>Juncus articulatus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	7	.	8	12	6	.	.	.	.	.
<i>Veronica beccabunga</i>	h	20	.	.	.	.	.	.	.	7	.	5	18	.	.	.	.	.	.
<i>Althaea officinalis</i>	h	.	18	.	.	.	.	.	.	.	7	.	.	.	.	.	10	5	.
<i>Triglochin maritima</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	3	.	.	17	13	.	.	.
<i>Elytrigia acuta</i>	h	.	27	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	6	.	13	.	.	.
<i>Eleocharis uniglumis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	6	7	.	.	.	12	.	.	.	.	.
<i>Juncus gerardi</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	12	9	6	.	.	.
<i>Hordeum secalinum</i>	h	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.	.	6	4	.	20	.	.
<i>Alopecurus pratensis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	14	.	.	6	.	.	.	.	33
<i>Urtica dioica</i>	h	.	.	33	.	.	.	.	.	20	.	.	.	.	.	.	.	16	.
<i>Ludwigia sp.</i>	h	20	.	.	.	.	.	.	.	13	.	.	6	.	.	.	.	.	.
<i>Argentina anserina</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	6	20	.	.	.	.	.	.	.	16	.
<i>Equisetum palustre</i>	h	20	.	.	.	.	.	.	.	13	7	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Elytrigia repens</i>	h	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	.	33
<i>Rumex conglomeratus</i>	h	.	.	.	8	.	.	.	.	7	.	.	.	6	.	.	.	16	.
<i>Ranunculus peltatus s. baudotii</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	9	.	20	.	.
<i>Parapholis strigosa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	6	10	.	.
<i>Trifolium michelianum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	7	.	.	.	.	.	.	.	.	67
<i>Schedonorus arundinaceus</i>	h	.	.	.	16	.	.	.	.	.	.	29	.	6	.	.	.	.	.
<i>Fraxinus angustifolia s. oxycarpa</i>	a	11	33
<i>Lolium perenne</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	10	.	.
<i>Oenanthe silaifolia</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	13	.	.	.	.	.	.	.	5	.
<i>Juncus acutiflorus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	13	7	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cyperus eragrostis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	8	24	.	.	.	.	.	.
<i>Trifolium fragiferum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	6	.	.	.	.	33
<i>Carex sp.</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	5	33
<i>Paspalum distichum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	13	.	.	.	.	6	.	.	.	.	.
<i>Ludwigia grandiflora</i>	h	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	6	.	.	.	.	.	.
<i>Salsola soda</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	4	.	20	.	.
<i>Persicaria maculosa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	13	.	.	5	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lemna trisulca</i>	h	20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Plantago major s. pleiosperma</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	.	.
<i>Amaranthus blitum s. emarginatus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	.	.
<i>Hordeum marinum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	10	.	.
<i>Dipsacus fullonum</i>	h	.	.	.	4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	11	.
<i>Cardamine pratensis</i>	h	.	.	.	12	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Galium aparine</i>	h	.	.	33	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

etc.

Tableau 15. Tableau des espèces caractéristiques des habitats de roselières de l'estuaire de la Loire. Les espèces diagnostiques, constantes et dominantes ont été calculées à partir des relevés identifiés par le système expert. Les espèces diagnostiques les plus fidèles ($\phi > 0,50$) sont marquées en gras et les espèces constantes les plus fréquentes (fréquence d'occurrence supérieure à 60 %) sont marquées en gras

Habitats	Espèces caractéristiques
C3.1 - Formations à hélophytes riches en espèces Nombre de relevés: 5	Espèces diagnostiques: <i>Glyceria maxima</i> , <i>Glyceria fluitans</i> Espèces constantes: <i>Glyceria maxima</i> , <i>Glyceria fluitans</i> , <i>Eleocharis palustris</i> , <i>Poa trivialis</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Carex riparia</i> , <i>Callitriche sp.</i> Espèces dominantes: <i>Glyceria fluitans</i>
C3.21 - Phragmitaies à <i>Phragmites australis</i> Nombre de relevés: 39	Espèces diagnostiques: <i>Phragmites australis</i> , <i>Caltha palustris</i> , <i>Oenanthe crocata</i> , <i>Callitriche species</i> Espèces constantes: <i>Phragmites australis</i> , <i>Oenanthe crocata</i> , <i>Convolvulus sepium</i> Espèces dominantes: <i>Phragmites australis</i>
C3.22 - Scirpaies à <i>Scirpus lacustris</i> Nombre de relevés: 2	Espèces diagnostiques: <i>Schoenoplectus lacustris</i> Espèces constantes: <i>Schoenoplectus lacustris</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Lysimachia vulgaris</i> , <i>Iris pseudacorus</i> , <i>Bolboschoenus maritimus</i> Espèces dominantes: <i>Schoenoplectus lacustris</i>
C3.23 - Typhaies Nombre de relevés: 2	Espèces diagnostiques: - Espèces constantes: <i>Phragmites australis</i> , <i>Veronica anagallis-aquatica</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Typha angustifolia</i> , <i>Solanum dulcamara</i> , <i>Persicaria hydropiper</i> , <i>Lythrum salicaria</i> , <i>Jacobaea aquatica</i> , <i>Dysphania ambrosioides</i> , <i>Convolvulus sepium</i> Espèces dominantes: <i>Veronica anagallis-aquatica</i> , <i>Typha latifolia</i> , <i>Typha angustifolia</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Persicaria hydropiper</i>
C3.24 - Communautés non-graminoïdes de moyenne-haute taille bordant l'eau Nombre de relevés: 16	Espèces diagnostiques: <i>Eleocharis palustris</i> Espèces constantes: <i>Eleocharis palustris</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Glyceria maxima</i> , <i>Glyceria fluitans</i> , <i>Bolboschoenus maritimus</i> , <i>Alopecurus geniculatus</i> Espèces dominantes: <i>Eleocharis palustris</i>
C3.25 - Formations à graminoïdes de moyenne-haute taille des bords des eaux Nombre de relevés: 15	Espèces diagnostiques: <i>Glyceria maxima</i> Espèces constantes: <i>Glyceria maxima</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Glyceria fluitans</i> , <i>Eleocharis palustris</i> Espèces dominantes: <i>Glyceria maxima</i> , <i>Agrostis stolonifera</i>
C3.26 - Formations à <i>Phalaris arundinacea</i> Nombre de relevés: 14	Espèces diagnostiques: <i>Phalaris arundinacea</i> Espèces constantes: <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> Espèces dominantes: <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Glyceria maxima</i>
C3.27 - Formations halophiles à <i>Scirpus</i> , <i>Bolboschoenus</i> et <i>Schoenoplectus</i> Nombre de relevés: 111	Espèces diagnostiques: <i>Schoenoplectus triqueter</i> , <i>Eleocharis bonariensis</i> , <i>Helosciadium nodiflorum</i> , <i>Veronica anagallis-aquatica</i> Espèces constantes: <i>Bolboschoenus maritimus</i> , <i>Eleocharis bonariensis</i> Espèces dominantes: <i>Bolboschoenus maritimus</i> , <i>Eleocharis bonariensis</i> , <i>Schoenoplectus triqueter</i>
C3.5 - Berges périodiquement inondées à végétation pionnière et éphémère Nombre de relevés: 10	Espèces diagnostiques: <i>Cotula coronopifolia</i> , <i>Polypogon monspeliensis</i> , <i>Pseudosclerochloa rupestris</i> , <i>Oxybasis chenopodioides</i> Espèces constantes: <i>Cotula coronopifolia</i> , <i>Polypogon monspeliensis</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Bolboschoenus maritimus</i> , <i>Tripolium pannonicum</i> , <i>Spergula marina</i> , <i>Puccinellia maritima</i> Espèces dominantes: <i>Atriplex prostrata</i> , <i>Polypogon monspeliensis</i> , <i>Cotula coronopifolia</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Persicaria lapathifolia</i> , <i>Echinochloa crus-galli</i> , <i>Amaranthus blitum s. emarginatus</i>
D5.21 - Communautés de grands <i>Carex</i> (magnocariçaies) Nombre de relevés: 22	Espèces diagnostiques: <i>Carex riparia</i> Espèces constantes: <i>Carex riparia</i> , <i>Agrostis stolonifera</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Convolvulus sepium</i> Espèces dominantes: <i>Carex riparia</i> , <i>Carex acuta</i> , <i>Agrostis stolonifera</i>



Figure 13. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats de roselières

Végétations des fourrés et forêts

19 relevés ont été assignés à un syntaxon appartenant aux fourrés et forêts, dont 11 à une association végétale et 8 à une alliance (Tab. 16).

Parmi les unités identifiées, l'*Ulmo laevis* – *Fraxinetum angustifoliae* est l'association végétale la mieux représentée avec 7 relevés. Elle se rattache à l'HIC 91F0-3 'Chênaies-ormaies à Frêne oxyphylle' qui se caractérise sur l'estuaire de la Loire par les espèces diagnostiques : *Quercus robur*, *Fraxinus angustifolia* subsp. *oxycarpa* ou *Glechoma hederacea* (Tab. 17).

L'HIC 91E0-1 'Saulaies arborescentes à Saule blanc' est également bien reconnu (7 relevés). Il s'identifie grâce aux végétations de l'alliance du *Salicion albae*, dont les deux principales espèces diagnostiques sont *Salix alba* et *Salix fragilis*.

Les fourrés dominés par *Tamarix gallica* (*Solano dulcamarae* – *Tamaricetum gallicae*) correspondent à l'habitat d'intérêt communautaire 92D0-3 'Galeries riveraines à Tamaris' dont les relevés se situent exclusivement à l'aval de l'estuaire (Fig. 14).

Pour finir, les fourrés à *Salix viminalis* et *Salix triandra* (EUNIS F9.12) et les aulnaies des ruisseaux et sources (EUNIS G1.21 / EUR28 91E0-8) restent minoritairement identifiés avec uniquement un seul relevé chacun.

Tableau 16. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations de fourrés et forêts. Les espèces diagnostiques (avec la valeur phi > 0,25) sont surlignées en gris et celles très diagnostiques en gris foncé (avec phi > 0,50). La fidélité a été calculée en utilisant l'ensemble des 1 414 relevés rattachés à un habitat. Seules les espèces diagnostiques et les espèces les plus fréquentes sont présentées dans ce tableau.

Les communautés végétales ont été regroupées par types d'habitats à partir des relevés classés à l'échelle de l'association végétale et de l'alliance phytosociologique. Les codes des alliances et des associations correspondent aux niveaux d'identification obtenus par le système expert : ST : *Solano dulcamarae – Tamaricetum gallicae* ; SV : *Salicetum triandro – viminalis* ; SaA : *Salicion albae* ; Aln : *Alnion glutinoso – incanae* ; UF : *Ulmo laevis – Fraxinetum angustifoliae*. * : groupes de relevés sans rattachement à l'échelle de l'association végétale mais identifiés à l'échelle de l'alliance. Strate 'h' : herbacée ; Strate 'a' : arbustive ; Strate 'A' : Arborée.

Habitats EUR28	92D0-3	-	91E0-1	91E0-8	91F0-3
Habitats EUNIS	F9.31	F9.12	G1.11	G1.21	
Alliances			SaA	Aln	
Associations végétales	ST	SV	*	*	UF
Nombre de relevés identifiés	3	1	7	1	7
Strate					
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 92D0-3 "Galeries riveraines à Tamaris"					
<i>Tamarix gallica</i>	a	100	.	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUNIS F9.12 - Fourrés ripicoles planitiaires et collinéennes à Salix					
<i>Salix triandra</i>	a	.	100	14	.
<i>Salix viminalis</i>	a	.	100	.	.
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 91E0-1 "Saulaies arborescentes à Saule blanc"					
<i>Salix alba</i>	A	.	.	86	14
<i>Salix fragilis</i>	A	.	.	43	.
<i>Humulus lupulus</i>	h	.	.	29	14
<i>Sambucus nigra</i>	h	.	.	14	100
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 91E0-8 "Aulnaies-frênaies à Laïche espacée des petits ruisseaux"					
<i>Alnus glutinosa</i>	A	.	.	14	100
<i>Athyrium filix-femina</i>	h	.	.	.	100
Espèces diagnostiques des syntaxons caractérisant l'habitat EUR28 91F0-3 "Chênaies-ormaises à Frêne oxyphylle"					
<i>Fraxinus angustifolia s. oxycarpa</i>	A	.	.	29	71
<i>Glechoma hederacea</i>	h	.	.	.	43
<i>Geum urbanum</i>	h	.	.	.	29
<i>Carex remota</i>	h	.	.	14	29
<i>Rumex sanguineus</i>	h	.	.	.	43
<i>Fraxinus excelsior</i>	A	.	.	.	29
<i>Crataegus monogyna</i>	a	.	.	14	29
<i>Fraxinus angustifolia s. oxycarpa</i>	a	.	.	14	43
<i>Quercus robur</i>	A	.	.	14	57
Autres espèces					
<i>Urtica dioica</i>	h	33	.	86	86
<i>Hedera helix</i>	h	.	.	14	100
<i>Iris pseudacorus</i>	h	.	.	14	100
<i>Phalaris arundinacea</i>	h	.	.	43	100
<i>Solanum dulcamara</i>	h	.	.	14	100
<i>Rubus sp.</i>	h	.	.	.	100
<i>Oenanthe crocata</i>	h	33	.	29	.
<i>Galium aparine</i>	h	33	.	14	.
<i>Agrostis stolonifera</i>	h	33	.	14	.
<i>Symphytichum lanceolatum</i>	h	.	.	14	.
<i>Arrhenatherum elatius</i>	h	33	.	14	.
<i>Dactylis glomerata</i>	h	.	.	14	.

<i>Cardamine pratensis</i>	h	.	.	14	.	14
<i>Taraxacum officinale</i>	h	.	.	14	.	29
<i>Convolvulus sepium</i>	h	33	.	43	.	.
<i>Phragmites australis</i>	h	.	.	29	.	14
<i>Equisetum arvense</i>	h	.	.	14	.	14
<i>Salix fragilis</i>	a	.	.	14	.	14
<i>Rubus caesius</i>	h	.	.	14	.	14
<i>Stellaria media</i>	h	.	.	14	.	14
<i>Scrophularia auriculata</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Epipactis helleborine</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Jacobaea aquatica</i>	h	.	100	.	.	.
<i>Juncus effusus</i>	h	.	.	.	100	.
<i>Rumex acetosa</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Lycopus europaeus</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Persicaria hydropiper</i>	h	.	.	29	.	.
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Carex riparia</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Atriplex prostrata</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Schedonorus arundinaceus</i>	h	67	.	.	.	.
<i>Carduus tenuiflorus</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Anthriscus caucalis</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Prunus spinosa</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Dipsacus fullonum</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Salix atrocinerea</i>	a	.	.	.	.	14
<i>Salix atrocinerea</i>	A	.	.	.	.	14
<i>Fraxinus angustifolia s. oxycarpa</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Salix atrocinerea</i>	h	.	.	.	100	.
<i>Thalictrum flavum</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Angelica heterocarpa</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Glyceria maxima</i>	h	.	.	.	100	.
<i>Bolboschoenus maritimus</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Lythrum salicaria</i>	h	.	.	29	.	.
<i>Aristolochia clematitis</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Chenopodium album</i>	h	33	.	.	.	.
<i>Prunus spinosa</i>	a	.	.	.	.	29
<i>Prunus spinosa</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Cirsium arvense</i>	h	33	.	.	.	.
<i>Rumex conglomeratus</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Bryonia dioica</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Epilobium tetragonum</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Bidens tripartita</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Iris foetidissima</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Ranunculus repens</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Cornus sanguinea</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Rubus fruticosus</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Lonicera periclymenum</i>	h	.	.	.	100	.
<i>Polypodium vulgare</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Anisantha sterilis</i>	h	33	.	.	.	.
<i>Claytonia perfoliata</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Cardamine flexuosa</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Crataegus monogyna</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Populus nigra</i>	A	.	.	14	.	.
<i>Rosa canina</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Impatiens capensis</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Sonchus oleraceus</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Hedera helix</i>	a	.	.	.	.	14
<i>Prunus laurocerasus</i>	h	.	.	.	100	.
<i>Geranium lucidum</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Acer negundo</i>	a	.	.	14	.	.
<i>Anthriscus sylvestris</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Melissa officinalis</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Reynoutria japonica</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Valeriana officinalis</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Ulmus minor</i>	A	.	.	.	.	14
<i>Elytrigia sp.</i>	h	33	.	.	.	.
<i>Deschampsia cespitosa</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Alopecurus pratensis</i>	h	.	.	.	.	14
<i>Myosotis discolor</i>	h	.	.	14	.	.
<i>Holcus lanatus</i>	h	.	.	.	.	14

etc.

Tableau 17. Tableau des espèces caractéristiques des habitats des fourrés et forêts de l'estuaire de la Loire. Les espèces diagnostiques, constantes et dominantes ont été calculées à partir des relevés identifiés par le système expert. Les espèces diagnostiques les plus fidèles ($\phi > 0,50$) sont marquées en gras et les espèces constantes les plus fréquentes (fréquence d'occurrence supérieure à 60 %) sont marquées en gras. Le symbole ‘*’ indique les HIC prioritaires

Habitats	Espèces caractéristiques
92D0-3 "Galeries riveraines à Tamaris" Nombre de relevés: 3	Espèces diagnostiques: <i>Tamarix gallica</i> Espèces constantes: <i>Tamarix gallica</i>, <i>Schedonorus arundinaceus</i> Espèces dominantes: <i>Tamarix gallica</i> , <i>Schedonorus arundinaceus</i> , <i>Elytrigia repens</i> , <i>Arrhenatherum elatius</i>
F9.12 - Fourrés ripicoles planitiaies et collinéennes à <i>Salix</i> Nombre de relevés: 1	Espèces diagnostiques: <i>Salix viminalis</i>, <i>Salix triandra</i> Espèces constantes: <i>Salix viminalis</i>, <i>Salix triandra</i>, <i>Jacobaea aquatica</i> Espèces dominantes: <i>Salix triandra</i>
91E0-1 "Saulaies arborescentes à Saule blanc" * Nombre de relevés: 7	Espèces diagnostiques: <i>Salix alba</i>, <i>Salix fragilis</i>, <i>Scutellaria galericulata</i>, <i>Epipactis helleborine</i>, <i>Symphotrichum lanceolatum</i>, <i>Sambucus nigra</i>, <i>Urtica dioica</i>, <i>Humulus lupulus</i> Espèces constantes: <i>Urtica dioica</i>, <i>Salix alba</i>, <i>Phalaris arundinacea</i>, <i>Convolvulus sepium</i>, <i>Salix fragilis</i>, <i>Oenanthe crocata</i>, <i>Lythrum salicaria</i> Espèces dominantes: <i>Salix alba</i> , <i>Salix fragilis</i> , <i>Phalaris arundinacea</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Symphotrichum lanceolatum</i> , <i>Salix alba</i> , <i>Populus sp.</i> , <i>Phragmites australis</i> , <i>Lycopus europaeus</i> , <i>Juncus inflexus</i> , <i>Anthriscus caucalis</i> , <i>Angelica heterocarpa</i>
91E0-8 "Aulnaies-frênaies à Laîche espacée des petits ruisseaux" * Nombre de relevés: 1	Diagnostic species: <i>Prunus laurocerasus</i>, <i>Lonicera periclymenum</i>, <i>Corylus avellana</i>, <i>Athyrium filix-femina</i> Espèces constantes: <i>Solanum dulcamara</i>, <i>Sambucus nigra</i>, <i>Salix atrocinerea</i>, <i>Rubus species</i>, <i>Prunus laurocerasus</i>, <i>Phalaris arundinacea</i>, <i>Lonicera periclymenum</i>, <i>Juncus effusus</i>, <i>Iris pseudacorus</i>, <i>Hedera helix</i>, <i>Glyceria maxima</i>, <i>Corylus avellana</i>, <i>Athyrium filix-femina</i>, <i>Alnus glutinosa</i> Espèces dominantes: <i>Rubus species</i> , <i>Alnus glutinosa</i>
91F0-3 "Chênaies-ormaies à Frêne oxyphylle" Nombre de relevés: 7	Espèces diagnostiques: <i>Quercus robur</i>, <i>Fraxinus angustifolia s. oxycarpa</i>, <i>Glechoma hederacea</i>, <i>Rumex sanguineus</i>, <i>Geum urbanum</i>, <i>Fraxinus excelsior</i>, <i>Crataegus monogyna</i>, <i>Carex remota</i>, <i>Prunus spinosa</i>, <i>Urtica dioica</i>, <i>Hedera helix</i>, <i>Rubus species</i> Espèces constantes: <i>Urtica dioica</i>, <i>Fraxinus angustifolia s. oxycarpa</i>, <i>Quercus robur</i>, <i>Rumex sanguineus</i>, <i>Rubus species</i>, <i>Hedera helix</i>, <i>Glechoma hederacea</i> Espèces dominantes: <i>Fraxinus angustifolia s. oxycarpa</i> , <i>Urtica dioica</i> , <i>Glechoma hederacea</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Ulmus minor</i> , <i>Salix alba</i> , <i>Rubus fruticosus</i> , <i>Quercus robur</i> , <i>Galium aparine</i> , <i>Carex remota</i> , <i>Agrostis stolonifera</i>



Habitats EUR28 / EUNIS

- 92D0-3 "Galeries riveraines à Tamaris" / F9.31 - Galeries à *Nerium oleander*, *Vitex agnus-castus* et *Tamarix*
- 91E0-1 "Saulaies arborescentes à Saule blanc" / G1.11 - Saulaies riveraines
- 91E0-8 "Aulnaies-frênaies à Laïche espacée des petits ruisseaux" / G1.21 - Forêts riveraines à *Fraxinus* et *Alnus*, sur sols inondés par les crues mais drainés aux basses eaux
- 91F0-3 "Chênaies-ormaises à Frêne oxyphylle" / G1.21 - Forêts riveraines à *Fraxinus* et *Alnus*, sur sols inondés par les crues mais drainés aux basses eaux
- NA / F9.12 - Fourrés ripicoles planitiaies et collinéennes à *Salix*

Figure 14. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats des fourrés et forêts

1.4 Compléments pour l'obtention d'une typologie complète des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'

Le développement et l'application d'un SE détaillé pour l'identification des relevés phytosociologiques de l'estuaire de la Loire a permis d'établir une typologie quasi-complète des végétations et des habitats du site Natura 2000. Cependant, le SE que nous avons développé n'intègre pas l'ensemble des syntaxons recensés dans la pré-typologie, ce qui ne garantissait pas une identification certaine de la totalité des végétations potentiellement présentes sur l'estuaire de la Loire. De plus, comme présenté en introduction, certains habitats ne sont pas identifiables à partir de la végétation (habitats à logique 'biotope') tandis que d'autres nécessitent des informations complémentaires sur le contexte stationnel (habitats à logique 'mixte'). Afin d'obtenir une typologie complète des habitats du site Natura 2000, des compléments aux résultats obtenus par le SE ont été apportés par des expertises supplémentaires, sur la base de 1) l'analyse manuelle des relevés phytosociologiques non-identifiés aux niveaux de l'association végétale et de l'alliance par le SE ; 2) l'identification de certains syntaxons très caractéristiques uniquement à partir d'observations de terrain (par exemple, les végétations annuelles à *Honckenia peploides* (*Honckenyetum latifoliae*) ; et 3) la caractérisation des composantes abiotiques définissant les habitats à logique 'biotope' et 'mixte' qui nécessitent l'utilisation d'autres données que la végétation pour être identifiés.

La typologie complète des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire' obtenue à l'issue de ces analyses complémentaires, est présentée dans le **tableau 18**. Au total, 145 unités élémentaires (syntaxons ou composantes abiotiques) ont été recensées sur le site, permettant l'identification de 89 habitats EUNIS, 29 habitats d'intérêt communautaire 'élémentaires' des Cahiers d'Habitats et 17 habitats du Manuel d'interprétation des habitats de la DHFF (EUR28).

Avec 32 unités élémentaires répertoriées, les habitats littoraux sont les plus diversifiés à l'échelle du site. La mise en correspondance avec la typologie EUNIS a conduit à l'identification de 21 habitats. Ils intègrent les milieux à marées telles que les vasières intertidales (EUNIS A2.2 et A2.3) ; les prés salés allant de la haute slikke (EUNIS A2.5512) jusqu'au très haut schorre (A2.511) ; les habitats dunaires (par exemple, EUNIS B1.12 ou B1.3211) ainsi que les prairies subhalophiles typiques des milieux estuariens (EUNIS A2.523). La quasi-totalité de ces habitats est considéré d'intérêt communautaire avec un total de 13 HIC

des Cahiers d'Habitats et 8 habitats EUR28 recensés, dont 2 sont considérés comme prioritaires selon la DHFF (1150(-1) et 2130(-2)).

Les habitats prairiaux sont également très variés, avec 30 unités élémentaires et 15 habitats EUNIS répertoriés. Ils se distinguent principalement selon le facteur d'humidité édaphique, allant des prairies longuement inondables (par exemple, EUNIS E3.44 ou E3.41) jusqu'aux pelouses sèches d'espèces annuelles (E1.91). À noter la présence de deux habitats en mosaïque (EUNIS E2.1xE2.5 & E3.44xA2.5) liés à la présence de relevés de végétation avec une composition floristique intermédiaire entre plusieurs communautés végétales (végétations de transition). Les prairies humides oligotrophes (EUNIS E3.512) sont les seules correspondant à un HIC (6410(-6)).

Les habitats aquatiques et les habitats de roselières sont légèrement moins diversifiés avec respectivement 22 et 24 unités élémentaires recensées, correspondant à 13 habitats EUNIS pour la première catégorie et 15 habitats EUNIS pour la seconde. 7 habitats des Cahiers d'Habitats et 4 habitats EUR28 sont liés aux milieux aquatiques (dont le 3170(-3) qui est un HIC prioritaire), tandis qu'aucun habitat des roselières ne relève de la DHFF.

Les habitats des fourrés et forêts contiennent 15 unités élémentaires caractérisant chacune un habitat EUNIS différent, ainsi que 4 HIC des Cahiers d'Habitats et 3 habitats EUR28. Parmi ces derniers, l'habitat EUR28 91E0 est considéré comme prioritaire selon la DHFF, et correspond sur le site aux saulaies arborescentes à Saule blanc (91E0-1) et aux aulnaies-frênaies à Laîche espacée des petits ruisseaux (91E0-8).

Pour finir, deux grands types de milieux complètent la typologie. Le premier intègre les habitats rudéraux et friches nitrophiles, et comporte 9 unités élémentaires toutes rattachées à l'habitat EUNIS 5.1 'Végétations herbacées anthropiques' qui n'est pas considéré comme HIC. Le second correspond aux habitats agricoles cultivés et habitats anthropiques, avec 5 unités élémentaires caractérisant chacune un habitat EUNIS différent, et aucun HIC.

Tableau 18. Typologie complète des habitats du site Natura 2000 ‘Estuaire de la Loire’ (typologies EUNIS, Cahiers d’Habitats et EUR28) et unités élémentaires d’identification (syntaxons ou composantes abiotiques). Les habitats d’intérêt communautaire prioritaires sont marqués en gras.

Le symbole ‘*’ indique les unités élémentaires qui caractérisent des habitats à logique ‘biotope’ et ‘mixte’ pour lesquels l’identification implique d’autres données que la végétation; le symbole ‘**’ indique soit 1) des végétations identifiées manuellement à partir de relevés phytosociologiques non reconnus au niveau de l’association ou l’alliance par le SE ; soit 2) des végétations identifiées uniquement à parti d’observations de terrain ; le symbole ‘?’ indique les habitats à logique mixte pour lesquels des données complémentaires à la végétation sont nécessaires pour différencier les habitats (utilisation de critères abiotiques)

Unités élémentaires (syntaxons ou composantes abiotiques)	Habitats EUNIS	Habitats des Cahiers d'habitats	Habitats EUR28
Habitats littoraux			
*Rivage sablonneux comprenant des sables propres (à grains grossiers, moyens ou fins) et des sables vaseux	A2.2 - Sable et sable vaseux intertidaux	1130-1 "slikke en mer à marée"	1130 "Estuaires"
*Débris coquilliers			
*Rivages boueux de sédiments à fines particules, principalement dans la fraction limon et argile	A2.3 - Vase intertidale		
*Plans d’eau caractérisés par des apports périodiques d’eau de mer et par le passage par une phase d’hypersalinisation (fonctionnement lagunaire). Végétations potentiellement associées: <i>Ranunculetum baudotii</i> Hocquette 1927; <i>Parvopotamo – Zannichellietum pedicellatae</i> Soó (1934) 1947 ; <i>Zannichellietum obtusifoliae</i> Brullo & Spampinato 1990; <i>Ruppium maritima</i> Hocquette 1927; <i>Potametum pectinati</i> Carstensen ex Hilbig 1971	X03 - Lagunes littorales saumâtres	1150-1 "Lagunes en mer à marées (façade atlantique)"	1150 "Lagunes côtières"
<i>Astero tripolii – Suaedetum maritima subsp. maritima</i> Géhu & Géhu-Franck 1984	A2.5512 Marais salés pionniers à <i>Suaeda maritima</i>	1310-1 "Salicorniaies des bas niveaux (haute slikke atlantique)"	1310 "Végétations pionnières à <i>Salicornia</i> et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses"
<i>Salicornion europaeo – ramosissima</i> Géhu & Géhu-Franck ex Rivas-Martínez 1990	A2.5513 Marais salés pionniers à <i>Salicornia spp.</i>	1310-2 "Salicorniaies des hauts niveaux (schorre atlantique)"	
<i>Parapholido strigosae – Hordeetum marini</i> (Géhu et al. 1975) Géhu & de Foucault 1978	A2.552 - Communautés halo-nitrophiles pionnières du littoral méditerranéen	1310-4 "Pelouses rases à petites annuelles subhalophiles"	
<i>Puccinellietum maritima</i> Christiansen 1927	A2.542 - Communautés de la partie inférieure des rivages atlantiques	1330-1 "Prés salés du bas schorre"	1330 "Prés salés atlantiques (<i>Glaucopuccinellietalia maritima</i>)"
<i>Puccinellion maritima</i> W.F. Christiansen 1927 nom. corr. in Bardat et al. 2004			
<i>Halimionetum portulacoidis</i> Kuhnholz-Lordat 1927	A2.5271- Fourrés argentés	1330-2 "Prés salés du schorre moyen"	
<i>Juncetum gerardii</i> Warming 1906	A2.5311 Prés salés atlantiques à <i>Juncus gerardii</i>	1330-3 "Prés salés du haut schorre"	
Groupement à <i>Plantago maritima</i>	A2.5312 - Prés salés atlantiques à <i>Plantago maritima</i>		
<i>Festucetum littoralis</i> Corillion 1953 nom. em. Géhu 1976	A2.5313 Gazons atlantiques à <i>Festuca rubra</i> et <i>Agrostis stolonifera</i>		
<i>Armerion maritima</i> Braun-Blanquet & De Leeuw 1936	A2.531 - Communautés atlantiques de la partie supérieure du rivage		
<i>Oenanthe lachenalii – Juncetum maritimi</i> Tüxen 1937	A2.531A - Jonchaies atlantiques à <i>Juncus maritimus</i>		

<i>Junco gerardi</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault ass. nov. hoc loco	A2.5319 - Prés salés atlantiques à <i>Eleocharis</i>		
<i>Loto tenuis</i> – <i>Trifolium fragiferum</i> (Westhoff, van Leeuwen & Adriani 1962) de Foucault 2008			
<i>Carici divisae</i> – <i>Lolium perennis</i> de Foucault 2008			
<i>Trifolium maritimi</i> – <i>Oenanthe silaifoliae</i> (Dupont 1954) de Foucault 2008			
** <i>Alopecurion utriculati</i> Zeidler 1954	A2.523 - Prés salés ras méditerranéens à <i>Juncus</i> , <i>Carex</i> , <i>Hordeum</i> et <i>Trifolium</i>	1410-3 "Prairies subhalophiles thermo-atlantiques"	1410 "Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)"
<i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault (1984) 2008			
** <i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault in de Foucault & Catteau 2012			
** <i>Atriplici laciniatae</i> – <i>Salsolion kali</i> Géhu 1975	B1.12 - Communautés annuelles des plages sableuses médio-européennes		
** <i>Honckenyetum latifoliae</i> Géhu 1996		2110-1 "Dunes mobiles embryonnaires atlantiques"	2110 "Dunes mobiles embryonnaires"
<i>Honckenyo peploidis</i> – <i>Elymion arenarii</i> Tüxen 1966			
**Groupement des dunes embryonnaires à <i>Elymus</i> × <i>acutus</i> et <i>Elymus farctus</i> in Delassus 2018	B1.311 - Dunes embryonnaires atlantiques		
** <i>Euphorbio paraliae</i> - <i>Ammophiletum arenariae</i> Tüxen in Braun-Blanquet & Tüxen 1952	B1.3211 - Dunes côtières : dunes blanches (au sens strict)	2120-1 "Dunes mobiles à <i>Ammophila arenaria</i> subsp. <i>Arenaria</i> des côtes atlantiques"	2120 "Dunes mobiles du cordon littoral à <i>Ammophila arenaria</i> ("dunes blanches")"
<i>Ammophilon arenariae</i> (Tüxen in Braun-Blanquet & Tüxen 1952) Géhu 1988			
<i>Euphorbio portlandicae</i> - <i>Helichryson stoechadis</i> Géhu & Tüxen ex Sissingh 1974	B1.42 - Dunes grises fixées gasconnes	2130-2 "Dunes grises des côtes atlantiques"	2130 "Dunes côtières fixées à végétation herbacée ("dunes grises")"

Habitats aquatiques

<i>Lythro portulae</i> – <i>Damasonietum alismatis</i> (Gadeceau 1909) de Foucault 1988	C3.51 - Gazons ras eurosibériens à espèces annuelles amphibies	3130-4 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, de bas-niveau topographique, planitiaires, d'affinités atlantiques, des <i>Isoeto-Juncetea</i> "	3130 "Eaux stagnantes, oligotrophes à mésotrophes avec végétation des <i>Littorelletea uniflorae</i> et/ou des <i>Isoeto-Nanojuncetea</i> "
<i>Ranunculo sardoii</i> – <i>Myosuretum minimi</i> Diémont et al. ex Oesau 1973		3130-5 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, acidiphiles, de niveau topographique moyen, planitiaires à montagnardes, des <i>Isoeto-Juncetea</i> "	
<i>Radiolion linoidis</i> W. Pietsch 1971			
*Plan d'eau oligomésotrophe à mésotrophe avec des communautés végétales du <i>Nitelletalia flexilis</i> W. Krause 1969, des <i>Charetalia hispidae</i> Krausch ex W. Krause 1997 ou du <i>Charetum conniventis</i> Ionescu-Teculescu 1972	C1.25 Tapis immergés de Charophytes des plans d'eau mésotrophes	3140-1 "Communautés à characées des eaux oligo-mésotrophes basiques"	3140 "Eaux oligo-mésotrophes calcaires avec végétation benthique à <i>Chara</i> spp. "

<i>Potametum trichoidis</i> Freitag, Markus & Schwiapl 1958 ex Tüxen 1974	C1.23 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau mésotrophes		
<i>Ranunculo circinati – Elodeetum nuttallii</i> Lange in H. Passarge 1994		3150-1 "Plans d'eau eutrophes avec végétation enracinée avec ou sans feuilles flottantes"	
CB du <i>Parvopotamo – Zannichellietum palustris</i> (W. Koch 1926) Passarge 1964 em. Görs 1977	C1.33 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes		
<i>Potametum pectinati</i> Carstensen ex Hilbig 1971			
<i>Lemnetum trisulcae</i> Hartog 1963		3150-2 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres submergés"	3150 "Lacs eutrophes naturels avec végétation du Magnopotamion ou de l'Hydrocharition"
** <i>Lemnion minoris</i> Tüxen ex O. Bolòs & Masclans 1955	C1.221 - Couvertures de lentilles d'eau	3150-3 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres flottant à la surface de l'eau"	
<i>Lemnetum gibbae</i> W. Koch ex Miyawaki & J. Tüxen 1960			
<i>Spirodelo – Lemnetum minoris</i> Th. Müller & Görs 1960			
<i>Chenopodio chenopodioidis - Crypsietum aculeatae</i> Paradis & Lorenzoni 1994	C3.423 Gazons méditerranéens amphibies à <i>Crypsis</i>	3170-3 "Gazons méditerranéens amphibies halonitrophiles (<i>Heleochloion</i>)"	3170 "Mares temporaires méditerranéennes"
<i>Trapetum natantis</i> V. Kárpáti 1963	C1.2412 - Tapis de Châtaigne d'eau		
Grpt à <i>Nuphar lutea</i> (<i>Nupharetum luteae</i> Pohjala 1933 ou <i>Nymphaeetum albo – luteae</i> nowinski 1928)	C1.2411 - Tapis de Nénuphar		
<i>Parvopotamo – Zannichellietum pedicellatae</i> Soó (1934) 1947	?C1.33 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes / ?X03 - Lagunes littorales saumâtres		
<i>Zannichellietum obtusifoliae</i> Brullo & Spampinato 1990	C1.3411 - Communautés des eaux peu profondes à <i>Ranunculus</i>		
<i>Potamo crispus – Ranunculetum trichophylli</i> imchenetzky 1926	?C1.54 - Macrophytes submergés des eaux salées et saumâtres / ?X03 - Lagunes littorales saumâtres		
<i>Ranunculetum baudotii</i> Hocquette 1927			
Grpt à <i>Ludwigia grandiflora</i> et Grpt à <i>Ludwigia peploides</i>			
*Plans d'eau douce ou saumâtre superficielle et réseau de canaux	C - Eaux de surface continentales		
*La Loire soumise à la marée	X01 - Estuaire		

Habitats prairiaux

** <i>Anthrisko caucalidis - Cochlearion danicae</i> B. Foucault 2009	E1.6 - Pelouses à annuelles subnitrophiles		
<i>Thero – Airion</i> Tüxen ex Oberdorfer 1957	E1.91 - Pelouses siliceuses d'espèces annuelles naines		
** <i>Polygono arenastris – Coronopodion squamati</i> Sissingh 1969	E1.E - Pelouses xériques piétinées à espèces annuelles		
<i>Cynosurion cristati</i> Tüxen 1947 X <i>Sisymbrietea officinalis</i> Korneck 1974	E2.1 - Pâturages permanents mésotrophes et prairies de post-pâturage X E5.1 Végétations herbacées anthropiques		
<i>Cynosurion cristati</i> Tüxen 1947	E2.1 - Pâturages permanents mésotrophes et prairies de post-pâturage		

**Prairies permanentes fortement fertilisées ou réensemencées	E2.6 - Prairies améliorées, réensemencées et fortement fertilisées, y compris les terrains de sport et les pelouses ornementales		
<i>Lolium perennis</i> – <i>Plantaginion majoris</i> G. Sissingh 1969	E2.8 - Pelouses mésophiles piétinées à espèces annuelles		
<i>Bromion racemosi</i> Tüxen ex de Foucault 2008	E3.41 - Prairies atlantiques et subatlantiques humides		
<i>Oenanthe peucedanifoliae</i> – <i>Brometum racemosi</i> de Foucault 1981			
<i>Senecioni aquatici</i> – <i>Oenanthe mediae</i> Bournérias et al. 1978			
<i>Hordeo secalini</i> – <i>Lolietum perennis</i> (Allorge 1922) de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006			
<i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault 2008			
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault 2008			
<i>Gratiolo officinalis</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006			
<i>Junco acutiflori</i> – <i>Cynosuretum cristati</i> Sougnez 1957			
** <i>Ranunculo repentis</i> – <i>Cynosurion cristati</i> Passarge 1969	E3.417 - Prairies à Jonc épars		
**Prairies humides dominées par <i>Juncus effusus</i>	E3.42 - Prairies à <i>Juncus acutiflorus</i>		
**Prairies humides dominées par <i>Juncus acutiflorus</i>	E3.441 - Pâtures à grands Juncus		
**Prairies humides dominées par <i>Juncus inflexus</i>	E3.44 - Gazons inondés et communautés apparentées		
Pâturages hygrophiles régulièrement inondés par les eaux oligohalines de la Loire et dominés par <i>Agrostis stolonifera</i> (=CB de l' <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault 2008)			
Pâturages méso-hygrophiles régulièrement inondés par les eaux oligohalines de la Loire et dominés par <i>Agrostis stolonifera</i> (=CB du <i>Bromion racemosi</i> Tüxen ex de Foucault 2008)			
Groupelement hygronitrophile à <i>Festuca arundinacea</i>			
<i>Pulicario dysentericae</i> – <i>Juncetum inflexi</i> de Foucault 2006			
<i>Potentillo anserinae</i> – <i>Alopecuretum geniculati</i> Tüxen 1947			
<i>Potentillion anserinae</i> Tüxen 1947	E3.44 - Gazons inondés et communautés apparentées X A2.5 - Marais salés côtiers et roselières salines		
Pâturages hygrophiles régulièrement inondés par les eaux saumâtres de la Loire et dominés par <i>Agrostis stolonifera</i> (=CB du <i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault in de Foucault & Catteau 2012)			
Pâturages méso-hygrophiles régulièrement inondés par les eaux saumâtres de la Loire et dominés par <i>Agrostis stolonifera</i> (=CB de l' <i>Alopecurion utriculati</i> Zeidler 1954)			
<i>Cirsio dissecti</i> – <i>Scorzoneretum humilis</i> de Foucault 1981	E3.512 - Prairies acidoclines à Molinie bleue	6410-6 "Prés humides et bas-marais acidiphiles atlantiques"	6410 "Prairies à <i>Molinia</i> sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (<i>Molinion caeruleae</i>)"
<i>Caro verticillati</i> – <i>Juncetum acutiflori</i> Oberdorfer in Oberdorfer 1979			

Habitats d'ourlets et mégaphorbiaies

<i>Thalictro flavi</i> – <i>Althaeetum officinalis</i> (Molinier & Tallon 1950) de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006		? 6430-1 "Mégaphorbiaies mésotrophes collinéennes" / ? non HIC	6430 "Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin"
** <i>Achilleo ptarmicae</i> – <i>Cirsion palustris</i> Julve & Gillet ex de Foucault 2011	?E5.412 - Mégaphorbiaies occidentales némorales rivulaires dominées par <i>Filipendula</i> / ?E5.42 - Communautés à grandes herbacées des prairies humide		
<i>Convolvulion sepium</i> Tüxen in Oberdorfer 1957		? 6430-4 "Mégaphorbiaies eutrophes des eaux douces" / ? non HIC	
<i>Urtico dioicae</i> – <i>Convolvuletum sepium</i> Görs & Müller 1969			
<i>Urtico dioicae</i> – <i>Phalaridetum arundinaceae</i> Schmidt 1981			
<i>Calystegio sepium</i> – <i>Angelicetum heterocarphae</i> Géhu & Géhu-Franck 1978	E5.4112 - Communautés fluviales à <i>Angelica heterocarpa</i>	6430-5 "Mégaphorbiaies oligohalines"	
<i>Anthriscetum sylvestris</i> Hadač 1978	E5.43 - Lisières forestières ombragées	6430-6 "Végétations des lisières forestières nitrophiles, hydroclines, héliophiles à semi-héliophiles"	
<i>Holco mollis</i> – <i>Pteridion aquilini</i> Passarge (1994) 2002	E5.3 - Formations à <i>Pteridium aquilinum</i>		

Habitats de roselières

<i>Glycerietum fluitantis</i> Nowiński 1930	C3.1 - Formations à hélophytes riches en espèces		
<i>Astero tripolii</i> – <i>Phragmitetum communis</i> Jeschke ex Krisch 1974			
<i>Phragmitetum communis</i> Savič 1926			
Phragmitaie oligohaline ("Roselière saumâtre" in Géhu & Géhu-Franck 1978?)	C3.21 - Phragmitaies à <i>Phragmites australis</i>		
**Groupements dominés par <i>Phragmites australis</i>			
<i>Scirpetum lacustris</i> Chouard 1924	C3.22 - Scirpaies à <i>Scirpus lacustris</i>		
<i>Typhetum latifoliae</i> Nowiński 1930	C3.231 - Typhaies à <i>Typha latifolia</i>		
<i>Typhetum angustifoliae</i> P.Allorge ex Pignatti 1953	C3.232 - Typhaies à <i>Typha angustifolia</i>		
** <i>Sagittario sagittifoliae</i> – <i>Sparganietum simplicis</i> Tüxen 1953	C3.241 - Communautés à Sagittaire		
<i>Eleocharitetum palustris</i> Savič 1926	C3.24A - Tapis de Scirpe des marais		
<i>Iridetum pseudacori</i> Egger ex Brzeg & M.Wojterska 2001	C3.24B - Formations à Iris faux acore		
** <i>Equisetum eleocharitis</i> Nowiński 1930	C3.247 - Communautés à Prêle des eaux		
<i>Glycerietum aquaticae</i> Nowiński 1930	C3.251 - Glycériaies		
<i>Phalaridion arundinaceae</i> Kopecký 1961	C3.26 - Formations à <i>Phalaris arundinacea</i>		
<i>Apio nodiflori</i> – <i>Eleocharitetum amphibiae</i> Géhu & Géhu-Franck 1972			
<i>Scirpetum triquetri</i> Zonneveld 1955 corr. et em. Géhu & Biondi 1988	C3.27 - Formations halophiles à <i>Scirpus</i> , <i>Bolboschoenus</i> et <i>Schoenoplectus</i>		
<i>Scirpetum maritimi</i> Langendonck 1932			
CB du <i>Scirpetum maritimi</i> Langendonck 1932			
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Bolboschoenetum maritimi</i> Delcoigne & Thébaud in Delcoigne & Thébaud 2018			
** <i>Bidention tripartitae</i> (W. Koch 1926) Nordhagen 1940	C3.5 - Berges périodiquement inondées à végétation pionnière et éphémère		
<i>Chenopodio</i> – <i>Atriplicetum salinae</i> Slavnič (1939) 1948			

*Fonds vaseux des plans d'eau asséchés	C3.6 - Berges nues ou à végétation clairsemée avec des sédiments meubles ou mobiles		
<i>Galio palustris</i> – <i>Caricetum ripariae</i> Bal.-Tul., Mucina, Ellmauer & B.Walln. in G.Grabherr & Mucina 1993	D5.21 - Communautés de grands <i>Carex</i> (magnocariçaies)		
<i>Caricetum gracilis</i> Almquist 1929 nom. conserv. propos.			

Habitats rudéraux et friches nitrophiles

** <i>Brassico nigrae</i> – <i>Carduetum tenuiflori</i> Bouzillé, Foucault & Lahondère 1984 nom. nov. Bioret, Lahondère & Botineau 1993	E5.1 Végétations herbacées anthropiques		
** <i>Sisymbrium officinalis</i> Tüxen, Lohmeyer & Preising ex von Rochow 1951			
** <i>Arctium lappae</i> Tüxen 1937			
** <i>Dauco carotae</i> - <i>Melilotion albi</i> Görs 1966			
** <i>Salsolion ruthenicae</i> G. Phil. ex Oberd. 1983			
** <i>Laguro ovati</i> – <i>Brometum rigidi</i> Géhu & Géhu-Franck 1985			
** <i>Laguro ovati</i> – <i>Brometum rigidi</i> Géhu & Géhu-Franck 1985 X			
<i>Agropyron pungentis</i> Géhu 1968			
** <i>Convolvulo arvensis</i> – <i>Agropyron repentis</i> Görs 1966			
** <i>Sisymbrium officinalis</i> – <i>Hordeetum murinum</i> Braun-Blanq. 1967			

Habitats des fourrés et forêts

<i>Solano dulcamarae</i> – <i>Tamaricetum gallica</i> de Foucault 2008	F9.3131 - Fourrés ouest-méditerranéens de Tamaris	92D0-3 "Galeries riveraines à Tamaris"	92D0 "Galeries et fourrés riverains méridionaux (<i>Nerio-Tamaricetea</i> et <i>Securinegion tinctoriae</i>)"
** <i>Lonicerion periclymeni</i> Géhu, de Foucault & Delelis 1983 (<i>fourrés pauvres en espèces de Prunus spinosa</i> ou <i>Rubus spp.</i>)	F3.1112 - Fourrés à Prunellier et Ronces atlantiques		
** <i>Ulici europaei</i> – <i>Prunetum spinosae</i> Géhu & Géhu-Franck 1983	F3.15 - Fourrés à <i>Ulex europaeus</i>		
** <i>Ulici europaei</i> - <i>Cytisetum scoparii</i> Oberdorfer ex B. Foucault, Lazare & Bioret 2013	F3.141 - Formations à Genêt à balais planitiaires et collinéennes		
<i>Salicetum triandro</i> – <i>viminalis</i> (Tüxen 1931) Lohmeyer 1952 ex Moor 1958	F9.121 Fourrés à Saule à trois étamines et à Osier blanc		
**Bosquets et fourrés dominés par <i>Salix atrocinerea</i>	F9.2 - Saussaies marécageuses et fourrés des bas-marais à <i>Salix</i>		
**Haies composées principalement d'espèces locales	FA.3 - Haies d'espèces indigènes riches en espèces		
<i>Salicion albae</i> Soó 1930	G1.1111 - Saulaies à Saule blanc ouest-européennes	91E0-1 "Saulaies arborescentes à Saule blanc"	91E0 "Forêts alluviales à <i>Alnus glutinosa</i> et <i>Fraxinus excelsior</i> (<i>Alno-Padion</i>, <i>Alnion incanae</i>, <i>Salicion albae</i>)"
<i>Alnion glutinoso</i> - <i>incanae</i> Oberdorfer 1953	G1.211 - Bois des ruisseaux et sources à <i>Fraxinus</i> et <i>Alnus</i>	91E0-8 "Aulnaies-frênaies à Laïche espacée des petits ruisseaux"	
<i>Ulmo laevis</i> – <i>Fraxinetum angustifoliae</i> (Breton) Rameau & Schmitt ex J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006	G1.22 - Forêts mixtes de <i>Quercus-Ulmus-Fraxinus</i> des grands fleuves	91F0-3 "Chênaies-ormaies à Frêne oxyphylle"	91F0 "Forêts mixtes de <i>Quercus robur</i> , <i>Ulmus laevis</i> , <i>Ulmus minor</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> ou <i>Fraxinus angustifolia</i> riveraines des grands fleuves (<i>Ulmenion minoris</i>)"

**Forêts méso-hygrophiles dominées par <i>Quercus robur</i> (incl. <i>Fraxino excelsioris</i> - <i>Quercion roboris</i> Rameau 1996)	G1.A1 - Boisements sur sols eutrophes et mésotrophes à <i>Quercus</i> , <i>Fraxinus</i> et <i>Carpinus betulus</i>		
**Fourrés d' <i>Ulmus minor</i>	G1.A61 - Ormaies à <i>Ulmus minor</i>		
**Plantations d'espèces, d'hybrides ou de cultivars du genre <i>Populus</i> à feuilles caduques	G1.C1 - Plantations de <i>Populus</i>		
**Plantations de Frênes	G1.C4 - Autres plantations d'arbres feuillus caducifoliés		
**Plantations de conifères du genre <i>Pinus</i>	G3.F12 Plantations de Pins indigènes		

Habitats agricoles cultivés et habitats anthropiques

**Cultures céréalières	I1.1 - Monocultures intensives		
*Terres labourées nues	I1.51 - Terres labourées nues		
*Chemins	H5.61 - Sentiers		
*Routes	J4.2 - Réseaux routiers		
* Enrochements	J2.53 - Dignes en milieu marin		

1.5 Discussion

1.5.1 Avantages et limites du système expert de l'estuaire de la Loire

Dans le cadre de ce travail, notre objectif n'était pas de réaliser une révision des référentiels typologiques phytosociologiques (PVF, EuroVegChecklist) et des habitats (EUNIS, EUR28) dont l'élaboration repose sur des concepts et des définitions qui sont le résultat de discussions d'experts et de praticiens régionaux, nationaux et internationaux (Chytrý et al. 2020). Notre but était de développer une méthode permettant de rattacher le plus fidèlement possible des relevés de végétation aux unités typologiques des référentiels préexistants. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser la méthode 'système expert' qui constitue un outil de classification automatisé de relevés phytosociologiques pour l'identification des syntaxons et des habitats.

Nous avons développé un SE intégrant une approche multiscalaire qui reflète la relation entre la phytosociologie et les systèmes européens de classification des habitats (Rodwell et al. 2018; Evans 2010). Les classifications d'habitats sont définies principalement sur la base d'unités phytosociologiques, ce qui justifie cette approche qui se base d'abord sur une identification syntaxonomique et permet ensuite l'identification des habitats. Cette approche est innovante, car les travaux utilisant les SE sont souvent réalisés au niveau des habitats (par exemple, Chytrý et al. 2020) ou au niveau des unités phytosociologiques (par exemple, Landucci et al. 2013), mais rarement aux deux échelles. De plus, lors de l'expérimentation de la méthode sur les prairies humides des *Agrostietea stoloniferae*, nous avons proposé une méthode d'évaluation de la précision du SE en utilisant un jeu de données de référence. Cette méthode d'évaluation à partir de matrices de confusion s'est avéré particulièrement pertinente pour tester la performance du SE et connaître la précision attendue lors de son application pour l'identification de relevés phytosociologiques. Ce type d'évaluation est actuellement mis en œuvre dans le cadre des synthèses phytosociologiques européennes comme par exemple dans le cas de la classification des végétations dunaires européennes (Marcenò et al. 2018), ou pour l'analyse des prairies semi-sèches en Europe centrale et orientale (Willner et al. 2019).

Cependant, contrairement au SE expérimental développé pour les prairies humides, les définitions formelles du SE 'détaillé' ont été uniquement validées sur la base de nos connaissances expertes. Nous n'avons pas retenu la méthode de validation à partir de matrices de confusion sur des tableaux de relevés de référence. Ce choix est essentiellement lié à la difficulté de constituer un jeu de données de référence pour tester le SE. En effet, les tableaux

de relevés ‘princeps’ ayant servi à la description des syntaxons sont souvent difficiles d’accès car généralement publiés depuis plusieurs décennies dans des revues éditées uniquement au format papier. L’utilisation de ces relevés implique un important travail de recherche bibliographique et de numérisation des données qui constituent des tâches très chronophages. Par conséquent, nous avons procédé à une expertise basée sur nos connaissances de terrain, se rapprochant des méthodes mises en œuvre pour l’établissement d’autres SE en Europe, tels que le SE des forêts européennes développé par [Giannetti et al. \(2018\)](#) ou plus récemment le SE des habitats EUNIS proposé par [Chytrý et al. \(2020\)](#). Idéalement, les systèmes experts devraient être établis directement lors de la description phytosociologique des syntaxons, que ce soit directement par leurs auteurs ou bien à l’issue de synthèse comme celle proposée actuellement en France dans le cadre du PVF2 (par exemple, [Delbosc et al. 2021b](#)). L’application du système expert ‘détaillé’ sur l’ensemble des données du site Natura 2000 a donné des résultats satisfaisants et a permis la classification de la quasi-totalité des relevés disponibles de manière formalisée. Au total, l’outil créé a permis d’assigner 1 843 relevés à un syntaxon, dont 1 414 à une association végétale ou une alliance, permettant d’assurer leur mise en correspondance avec les typologies d’habitats EUR28 et EUNIS.

Un autre avantage du SE est qu’il peut révéler les lacunes concernant la caractérisation de certaines végétations sur un territoire donné. Par exemple, nous avons mis en évidence des relevés de roselières à *Phragmites australis* ne répondant à aucune définition d’associations végétales mentionnés préalablement sur l’estuaire de la Loire (*Astero tripolii* – *Phragmitetum communis* et *Phragmitetum communis*). Ce constat nous a conduit à déduire la présence d’une nouvelle communauté de phragmitaie (‘Phragmitaie oligohaline’) pour laquelle nous avons proposé une définition formelle dans le SE. Ce nouveau groupement, caractérisé par la combinaison de *Phragmites australis* et *Oenanthe crocata*, serait à décrire comme une nouvelle association végétale typique des berges estuariennes baignées par les eaux oligohalines¹¹ du fleuve.

L’approche SE, qui s’est particulièrement développée en Europe depuis une dizaine d’année ([Tichý et al. 2014](#); [De Cáceres et al. 2015](#); [Douda et al. 2016](#); [Marcenò et al. 2018](#); [Landucci et al. 2020](#)), nous a permis de proposer un script pouvant être réutilisé par différents praticiens afin de rattacher des relevés phytosociologiques aux syntaxons et aux habitats de manière unifiée et cohérente. Le SE représente ainsi une méthode standardisée et transposable,

¹¹ Caractérise une eau de faible salinité (comprise entre 0,5 et 5g pour mille) ([Géhu 2006](#))

contrairement aux méthodes traditionnelles qui dépendent du jugement subjectif de divers experts et de traditions régionales variées. De plus, la rapidité de l'exécution de l'outil système expert permet l'identification automatique de grandes bases de données de relevés phytosociologiques en seulement quelques secondes (Rodríguez-Rojo et al. 2020; Bonari et al. 2021). Le SE que nous avons créé dans cette étude peut être transposé à d'autres marais de la façade atlantique française et européenne, dès lors que les sites comportent une végétation similaire à celle de l'estuaire de la Loire. C'est le cas en France sur des sites tels que le marais Breton (Bouzillé 1980), le marais Poitevin (Benot et al. 2011) ou les marais de Rochefort et Brouage (Bouzillé et al. 2001). Plus largement, à l'échelle européenne, des végétations semblables de marais estuariens peuvent se rencontrer aux Pays-Bas (Sissingh & Tideman 1960), en Allemagne (Tüxen & Preising 1951) ou en Irlande (Braun-Blanquet & Tüxen 1952), où notre SE pourrait être utilisé. Pour appliquer notre SE sur d'autres sites, les utilisateurs devront prendre en compte le référentiel taxonomique national TAXREF v.13.0 (Gargominy et al. 2019) pour toutes les espèces de leur jeu de données. Plus largement, afin de transposer notre approche méthodologique (développement et validation d'un système expert) à d'autres végétations et habitats et sur d'autres régions, nous suggérons aux futurs développeurs de suivre les trois étapes suivantes : (1) définir les végétations qui seront identifiées par le SE et collecter des relevés de végétation pour le site d'étude concerné ; (2) développer et valider le SE - cette étape nécessite la compilation de données de références bibliographiques (descriptions, relevés de végétation) pour les végétations ciblées. Ces informations descriptives sont utilisées pour construire les formules logiques et pour tester et valider la précision du SE; (3) appliquer le SE au jeu de données du site d'étude afin d'identifier les relevés de végétation.

Cependant, le système expert que nous avons élaboré présente des limites et ne prétend pas être parfait. L'établissement d'un système expert complet de l'estuaire de la Loire représente une tâche longue et difficile compte tenu de la diversité des végétations et de leur proximité floristique. De ce fait, le SE que nous avons développé ne contient pas des définitions formelles pour l'ensemble des végétations de la pré-typologie. Pour les communautés végétales manquantes, il sera possible de développer des formules logiques ultérieurement et de les ajouter au système expert afin de proposer un outil d'identification le plus exhaustif possible. D'autre part, même si notre SE tient compte des communautés végétales décrites en France et en Europe, il a été développé à l'échelle du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire' et contient, de ce fait, des formules logiques pour une liste réduite de syntaxons. Son usage sur un autre territoire pourrait conduire à un faible taux d'identification des associations végétales ou des

alliances si la composition floristique des végétations étudiées diffère de celle de notre site d'étude.

Le système expert est un outil d'identification de relevés phytosociologiques et permet d'identifier les habitats caractérisés par la végétation (habitat à logique végétation). Ce type d'habitat constitue la très grande majorité des habitats présents sur le site Natura 2000, ce qui fait du SE de l'estuaire de la Loire un outil majeur pour établir des identifications formalisées des habitats du site. Cependant, le SE ne permet pas une identification formelle des habitats nécessitant des informations complémentaires sur les conditions de biotope (habitat à logique mixte) et n'est pas adapté à l'identification des habitats entièrement fondé sur des caractéristiques abiotiques (habitats à logique biotope). Pour ces types d'habitat, aucune méthode rigoureuse et objective n'est actuellement proposée. Des recherches complémentaires devraient être initiées pour proposer des méthodes permettant de lever ces difficultés. Par exemple, l'utilisation du positionnement géographique des relevés pourrait aider à différencier des habitats à logique mixte. C'est par exemple le cas de l'habitat 6430-4, qui correspond uniquement aux mégaphorbiaies situées en contexte rivulaire. Des mégaphorbiaies constituées d'une végétation similaire peuvent également se rencontrer sur le site Natura 2000 (mégaphorbiaies de recolonisation de prairies), mais ne sont pas considérées comme des habitats d'intérêt communautaire. Par conséquent, des expertises de terrain et des données géoréférencées sont indispensables pour valider le rattachement à l'habitat. Un autre exemple concerne l'habitat 1150-1 'Lagunes en mer à marées (façade atlantique)' qui suit une logique 'biotope'. Seuls les plans d'eau présentant un fonctionnement lagunaire relèvent de cet habitat (apports périodiques d'eau de mer et passage par une phase d'hypersalinisation par évaporation). Ainsi, l'identification doit être effectuée sur des critères hydrologiques. La présence de certaines communautés végétales pouvant coloniser cet habitat (par exemple : le *Ranunculetum baudotii* ou le *Ruppium maritima*) ne doit pas être utilisée comme critère de détermination, mais uniquement considérée comme des végétations associées à l'habitat (Gaudillat et al. 2018). En l'absence de méthodologie standardisée, l'identification de ces habitats a été réalisée par avis d'expert sur la base de nos connaissances de terrain.

Le SE montre également quelques limites dans l'identification des végétations pluristratifiées ou se présentant sous la forme de voile. Par exemple, les végétations aquatiques peuvent être composées de plusieurs strates (par exemple, des communautés de characées superposées par des *Lemna* spp. ou des renoncules aquatiques). Les relevés phytosociologiques effectués dans

ces contextes répondent ainsi à deux ou plusieurs syntaxons et sont dans la plupart des cas classés en "+" par le SE (relevés répondant à plusieurs définitions). Ici aussi, en l'absence de méthodologie standardisée, l'identification de ces habitats a été réalisée par avis d'expert sur la base de nos connaissances de terrain. Dans d'autres cas, lorsque deux associations étaient floristiquement très proches, il a été préférable de développer certaines définitions formelles uniquement à l'échelle des alliances plutôt qu'à l'échelle des associations végétales. En effet, le cortège floristique d'une communauté végétale à une autre pouvant être très proche, des confusions d'identification inter-associations apparaissaient mais se neutralisaient à l'échelle de l'alliance (Kącki et al. 2021). Dans l'objectif d'identifier les habitats, l'échelle de l'alliance était donc le plus souvent suffisante. C'est par exemple le cas de l'alliance de l'*Agropyron pungentis* dont 4 associations végétales ont été identifiées dans la pré-typologie du site Natura 2000 (*Agropyro pungentis - Althaeetum officinalis* ; *Atriplici hastatae - Agropyretum pungentis* ; *Beto maritimae-Agropyretum pungentis* et *Minuartio peploidis - Agropyretum acuti*). Ces associations végétales étant principalement marquées par la dominance d'*Elytrigia acuta* (caractérisant l'alliance de *Agropyron pungentis*), il nous est paru plus évident de proposer uniquement une définition de l'alliance, niveau suffisant pour identifier l'habitat d'intérêt communautaire 1330-5 'Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée'.

1.5.2 Définition des espèces caractéristiques des habitats

À l'issue de la classification des relevés du site Natura 2000 par le SE, les espèces caractéristiques ont été calculées pour chaque habitat en suivant l'approche proposée par Chytrý & Tichý (2003). Cette méthode est particulièrement adaptée pour l'analyse de grandes bases de données de relevés phytosociologiques comprenant divers types de communautés végétales, ceci afin d'obtenir des résultats d'une grande valeur statistique (Landucci et al. 2011). Ces conditions sont essentielles pour calculer les valeurs de coefficient *Phi* des associations végétales (Chytrý 2011). Notre jeu de données de 1 899 relevés phytosociologiques appartenant aux différents habitats du site répondait aux exigences de cette démarche. Cependant, l'une des principales limites de notre jeu de données reposait sur la variabilité du nombre de relevés identifiés pour chaque habitat. De nombreux habitats ont été caractérisés par seulement quelques relevés (voir uniquement un seul) tandis que d'autres en possédaient plusieurs centaines, ce qui doit conduire à relativiser les résultats présentés. Afin de réduire ce déséquilibre, des méthodes de ré-échantillonnage des données peuvent être utilisées, tel que l'algorithme de ré-échantillonnage par hétérogénéité-contraainte aléatoire (HCR) (Lengyel et al.

2011). Cependant, nous n'avons pas retenu cette méthode qui nécessite au moins 10 relevés par type d'habitat pour être appliquée (Landucci et al. 2013; Chytrý et al. 2020). Des relevés complémentaires devraient être réalisés pour les habitats les moins bien représentés afin de pouvoir mettre en œuvre les méthodes de ré-échantillonnage et permettre un calcul plus précis des espèces caractéristiques. De plus, nous avons fait le choix d'intégrer l'ensemble des relevés phytosociologiques réalisés sur l'estuaire de la Loire, sans distinction à priori de leurs auteurs, du type d'étude, ou de leur période de réalisation. Par conséquent, notre jeu de données peut contenir des relevés invalides (par exemple, des relevés ne respectant pas les principes d'homogénéités floristique et physiognomique) ou présentant des erreurs d'identification de certaines espèces. Bien que les définitions formelles aient été construites de manière à identifier uniquement les relevés des communautés végétales ciblées, des relevés erronés ont pu être rattachés accidentellement à certains syntaxons. Néanmoins, lorsque ce type d'anomalie est détectée, les formules logiques peuvent être mises à jour et complétées afin de mieux filtrer les relevés devant être correctement reconnus. Bien qu'anecdotique, ce type d'erreur peut avoir des conséquences sur le calcul des espèces caractéristiques, en particulier lorsqu'il s'agit d'habitat comportant peu de relevés. Ainsi, la qualité de la caractérisation des habitats dépendra essentiellement du nombre de relevés et de leur typicité (Lengyel et al. 2018). En revanche, lorsque le nombre de relevés caractérisant les habitats est suffisamment important, il y a une vraie signification statistique de l'indice de fidélité, et des mesures de fréquence et d'abondance.

Finalement, l'établissement d'une typologie diversifiée des végétations et des habitats ainsi que le calcul des espèces caractéristiques des habitats ont été obtenus grâce à l'utilisation d'une importante base de données de relevés phytosociologiques. Cette base de données est le résultat d'un important travail de synthèse bibliographique qui a permis de recueillir plusieurs centaines de relevés effectués à travers les nombreuses études réalisées sur le site Natura 2000 depuis les années 70. Ce travail révèle la nécessité de pouvoir accéder aux données produites sur les territoires et doit encourager la mise en place de dispositifs facilitant la centralisation et le partage des données (Schaminée et al. 2011) comme le projet European Vegetation Archive (Chytrý et al. 2016) et l'utilisation de logiciels spécialisés pour le stockage de données de végétation comme Turboveg (Hennekens & Schaminée 2001).

1.5.3 Problèmes typologiques et d'identification des habitats

Lors de l'élaboration de notre système expert, nous avons pris conscience des différences existantes entre les classifications phytosociologiques françaises et les classifications phytosociologiques européennes (Bardat et al. 2004 vs Mucina et al. 2016) ainsi que les différences d'interprétations des habitats entre les pays européens (Evans 2010). C'est notamment le cas pour les prairies humides qui ont été largement étudiées à travers la région atlantique européenne au cours des dernières décennies (Oberdorfer 1983; White & Doyle 1982; Rivas-Martínez et al. 2001; Burkart et al. 2004; Rodwell et al. 2007; de Foucault & Catteau 2012). Par exemple, l'*Alopecurion utriculati* n'a pas été retenu par Mucina et al. (2016) car considéré comme synonyme du *Molinio-Hordeion secalini* (prairies humides des régions subméditerranéennes riches en précipitations des balkans) alors que l'*Alopecurion utriculati* est reconnu en France comme un syntaxon valide représentant les prairies humides subhalophiles (de Foucault & Catteau 2012). Cet exemple n'est pas un cas isolé et interpelle sur les conséquences que peuvent entraîner ces divergences entre les pays européens sur la capacité d'identifier de manière standardisée les habitats à l'échelle de l'UE. Ainsi, lorsque des correspondances sont effectuées entre typologies phytosociologiques et typologies d'habitats, il peut exister des différences dans les rattachements des habitats. En France, les correspondances entre la typologie phytosociologique et les habitats de la DHFF ont été établies par des experts dans le cadre des 'Cahiers d'habitats' (Bensettiti et al. 2001-2005). Par exemple, ces auteurs ont caractérisé l'habitat 1410 'prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)' avec, en partie, des associations végétales appartenant à la classe des *Agrostietea stoloniferae* (*Plantagini majoris* - *Trifolietum resupinati*, *Trifolio maritimi* - *Oenanthetum silaifoliae*, *Carici divisae* - *Lolietum perennis* et *Ranunculo ophioglossifolii* - *Oenanthetum fistulosae*). L'interprétation phytosociologique de l'habitat 1410 diffère entre la France et les autres pays européens car la classification phytosociologique utilisée dans les autres pays ne retient pas la classe des *Agrostietea stoloniferae* (Biondi et al. 2014; Costa et al. 2011; Rodwell 1991-2000). Ainsi, les rattachements des végétations des *Agrostietea stoloniferae* à l'habitat 1410 est une interprétation strictement française. Ce manque d'harmonisation entre les pays peut avoir un impact majeur lorsqu'il s'agit d'effectuer la mise en commun des données à l'échelle européenne dans le cadre du suivi et de l'évaluation de l'état de conservation des HIC (Evans 2010). À l'instar de la proposition d'harmonisation de la classification phytosociologique européenne produit par Mucina et al. (2016), une standardisation des correspondances entre la classification phytosociologique et les habitats d'intérêt communautaire entre pays européens

semble indispensable. Malgré ce constat, nous avons fait le choix méthodologique de suivre les référentiels français (et les correspondances avec les habitats de l'annexe I de la DHFF) car ce sont ceux considérés comme valides et utilisés sur le terrain à une échelle locale et régionale en France.

1.5.4 Enjeux de conservation du patrimoine végétal et des habitats

Les communautés végétales identifiées par le SE ont été regroupées en 6 grands types de milieux : (1) les végétations littorales ; (2) les végétations aquatiques ; (3) les végétations de prairies ; (4) les végétations d'ourlets et mégaphorbiaies ; (5) les végétations de roselières ; (6) les végétations de fourrés et forêts. Chacun de ces grands types de milieux représente des enjeux de conservation qui lui sont propres et qui sont détaillés ci-après.

Les **végétations littorales** constituent l'un des milieux les mieux identifiées par le SE (530 relevés). Certaines de ces communautés végétales ont fait l'objet d'études spécifiques qui ont conduit à la réalisation de nombreux relevés phytosociologiques sur l'estuaire de la Loire (par exemple, de Foucault 1984; Magnanon 1991; Lafage & Bouzillé 2010-2013). Ces études ont permis de mettre en exergue l'intérêt floristique de ces communautés végétales et pour certaines d'entre-elles leur caractérisation comme habitat d'intérêt communautaire. C'est le cas de l'habitat 1410-3 'Prairies subhalophiles thermo-atlantiques' qui repose notamment sur la description des associations végétales *Trifolio maritimi – Oenanthetum silaifoliae*, *Carici divisae – Lolietum perennis* et *Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthetum fistulosae* par de Foucault (1984) à partir de nombreux relevés réalisés sur le site de l'estuaire de la Loire. Ces prairies subhalophiles, très bien identifiées par le SE (388 relevés), sont typiques des conditions estuariennes rencontrées sur le site Natura 2000, ce qui peut conduire à considérer ce territoire comme un secteur témoin de la composition floristique de ces végétations (cf. de Foucault 1984). À l'inverse, d'autres communautés végétales sont caractérisées par un faible nombre de relevés. Il s'agit notamment des végétations littorales de l'*Halimionetum portulacoidis* (1 relevé) ou du *Festucetum littoralis* (2 relevés) qui sont liées à des milieux très halophiles. Les conditions favorables à l'expression de ces végétations paraissent peu fréquentes sur le site Natura 2000, ce qui justifie le faible nombre de relevés les caractérisant. De plus, la rareté de l'*Halimionetum portulacoidis* pourrait s'expliquer par sa sensibilité au piétinement et au pâturage (Delassus 2009) limitant son expression sur l'estuaire de la Loire où les prés salés sont

généralement pâturés. Néanmoins des prospections complémentaires permettraient de confirmer leur répartition sur le site. De manière générale, la quasi-totalité des végétations littorales caractérise des habitats relevant de la DHFF (8 habitats EUR28) montrant ainsi les forts enjeux de conservation associés à ces milieux. Ces résultats sont conformes au premier inventaire des habitats réalisé au début des années 2000 (*Ouest Aménagement 2003*), mais 3 habitats initialement relevés n'ont pas été identifiés lors de nos investigations :

- 1140 'Replats boueux ou sableux exondés à marée basse' qui correspond aux zones d'estrans sableux ou vaseux qui succèdent au 1130 'Estuaires' lorsque les conditions sont marines (*Bensettiti et al. 2004*). Les vasières situées les plus à l'aval du site Natura 2000 sont probablement à l'interface entre ces deux habitats, mais en l'absence de critères d'identification clairement établis, nous avons seulement retenu la présence du 1130.
- 1210 'Végétation annuelle des laisses de mer' dont la définition a été précisée entre les deux périodes d'inventaires par une note du Centre thématique européen sur la protection de la nature et la biodiversité (*ETC-NPB 2002*), qui souligne que l'habitat se trouve spécifiquement sur graviers. L'habitat avait initialement été identifié à partir des communautés annuelles des hauts de plages (*Atriplici laciniatae – Salsolion kali*) qui se rattachent finalement à l'habitat 2110 'Dunes mobiles embryonnaires'. Aucune végétation annuelle des laisses de mer se développant spécifiquement sur graviers n'a été identifiée sur le site, ce qui nous a conduits à ne pas retenir l'habitat 1210.
- 1320 'Prés à *Spartina (Spartinion maritima)*' que nous n'avons pas retenu en l'absence de données récentes sur la présence des végétations indicatrices sur l'estuaire de la Loire.

A l'inverse, nous avons identifié un habitat supplémentaire : le 1150 'Lagunes côtières' qui suit une logique 'biotope' et se caractérise par des plans d'eau avec un fonctionnement lagunaire (apports périodiques d'eau de mer et passage par une phase d'hypersalinisation par évaporation). Certains plans d'eau de chasse situés à l'aval de l'estuaire et à proximité de la Loire répondent à cette définition.

Concernant les **végétations aquatiques**, hormis une étude spécifique sur les communautés du *Chenopodio chenopodioidis - Crypsietum aculeatae* par *Guillon & Terrisse (2015)*, ces communautés végétales restent peu étudiées à l'échelle de l'estuaire de la Loire (50 relevés identifiés par l'ES). De futures prospections seraient nécessaires pour préciser les variabilités structurelles et fonctionnelles de ces végétations. Ces investigations sont d'autant plus

nécessaires, que les végétations aquatiques caractérisent plusieurs HIC dont la conservation est menacée par le développement d'espèces exotiques envahissantes telle que la jussie (*Ludwigia spp.*) qui envahit de nombreux canaux et tend à remplacer les végétations aquatiques originelles (Haury et al. 2012). Par rapport au premier inventaire des habitats de 2002, nous avons reconnu un habitat supplémentaire : le 3170 'Mares temporaires méditerranéennes' caractérisé par les végétations du *Chenopodio chenopodioidis - Crypsietum aculeatae*. Cet habitat est actuellement situé en dehors des limites de la ZSC (ce qui explique son absence lors de l'étude de 2002), mais sa présence pourrait justifier une extension du périmètre du site Natura 2000 sur les secteurs concernés.

Les **végétations de prairies** correspondent au milieu le mieux représenté avec 531 relevés identifiés par le SE. Ces unités végétales peuvent se décomposer en deux grandes catégories : les prairies mésophiles et les prairies hygrophiles. Les prairies et pelouses mésophiles (*Thero – Airion*, *Cynosurion cristati* et *Lolio perennis – Plantaginion majoris*) sont faiblement représentées compte tenu des caractéristiques écologiques du site Natura 2000 qui est composé pour l'essentiel de végétations de marais. De ce fait, ces communautés végétales sont cantonnées aux secteurs les plus élevés de l'estuaire de la Loire, situés en limite externe du site Natura 2000 et sur quelques remblais en bordure du fleuve. En revanche les prairies hygrophiles, en particulier les prairies relevant du *Bromion racemosi* et de l'*Oenanthion fistulosae* sont largement représentées car il s'agit de végétations typiques des marais inondables gérées par la fauche et le pâturage (De foucault 1984). Ces prairies, caractéristiques des milieux doux, se situent au contact des végétations subhalophiles relevant de l'*Alopecurion utriculati* et du *Ranunculo ophioglossifoli-Oenanthion fistulosae*, à l'amont du site et en retrait de la Loire. Le principal enjeu de conservation pour ces unités végétales repose sur le seul habitat d'intérêt communautaire présent sur l'estuaire de la Loire, le 6410-6 'Prés humides et bas-marais acidiphiles atlantiques'. L'identification de cet habitat a été effectuée à partir de relevés provenant des marges du site, dans des zones de marais à tendance para-tourbeuse qui marque la transition vers les marais oligotrophes de Brière ou de Grand-Lieu (Dupont 1983; Magnanon 1994). Lors du premier inventaire des habitats de 2002, un autre HIC de prairies avait été recensé : le 6510 'Prairies maigres de fauche de basse altitude (*Alopecurus pratensis*, *Sanguisorba officinalis*)'. Cependant, aucun des 531 relevés de prairies identifiés par le SE n'a permis de confirmer la présence de cet habitat sur l'estuaire de la Loire, qui a potentiellement été confondu avec des prairies floristiquement proches appartenant aux *Agrostietea stoloniferae* (Lacroix et al. 2010).

En ce qui concerne les **végétations d'ourlets et mégaphorbiaies**, la communauté du *Calystegio sepium – Angelicetum heterocarphae* a été identifiée à partir d'un grand nombre de relevés (54 relevés). Plusieurs études, accompagnées de relevés phytosociologiques, se sont focalisées sur ce syntaxon endémique des estuaires de la façade atlantique française (Géhu & Géhu 1978; Magnanon et al. 1998; Mesnage 2015; Lafage & Sacre 2016). L'originalité de ce syntaxon réside dans la présence d'*Angelica heterocarpa*, espèce endémique de ces estuaires (Dupont 1962) qui se développe sur les parties oligohalines estuariennes françaises (Lacroix et al. 2009). Ce syntaxon caractérise l'HIC 6430-5 'Mégaphorbiaies oligohalines'. Les autres communautés végétales sont représentées par un faible nombre de relevés malgré l'intérêt qu'elles présentent du point de vue de la caractérisation d'HIC : 6430-1 'Mégaphorbiaies mésotrophes collinéennes', 6430-4 'Mégaphorbiaies eutrophes des eaux douces' et 6430-6 'Végétations des lisières forestières nitrophiles, hydroclines, héliophiles à semi-héliophiles'. Des investigations supplémentaires seraient nécessaires pour mieux connaître la composition floristique et la répartition de ces végétations, dans le but de mieux distinguer les habitats de mégaphorbiaies HIC se développant uniquement en contexte alluvial.

Les **végétations de roselières** couvrent des superficies importantes sur les systèmes estuariens car elles sont conditionnées par des submersions régulières des fleuves (Cianfaglionne 2021). Sur l'estuaire de la Loire, les gradients d'inondations et de salinité implique une grande diversité de ces communautés végétales et plus largement des habitats (15 habitats EUNIS identifiés). Même si aucune de ces unités végétales ne relèvent de la DHFF, elles représentent un grand intérêt écologique notamment pour la préservation d'espèces de passereaux paludicoles telles que le Phragmite aquatique (*Acrocephalus paludicola*) (Musseau et al. 2014; Chenaival et al. 2011), ou du point de vue des services écosystémiques à travers leur rôle d'épuration des eaux (Ou et al. 2006). Des prospections complémentaires sont nécessaires pour clarifier la syntaxonomie de certaines communautés végétales. En effet, un groupement à *Phragmites australis* et *Oenanthe crocata*, se développant dans la partie rivulaire oligohaline de la Loire, a fait l'objet de quelques relevés et d'une définition formelle au sein du SE. D'un point de vue caténal, ce groupement se situe entre l'*Astero tripolii - Phragmitetum australis* (roselières saumâtres en aval de l'estuaire) et le *Phragmitetum communis* (roselières dulçaquicoles), et représentent donc une végétation originale écologiquement et floristiquement. Ce groupement partage également de nombreuses espèces avec le *Calystegio sepium – Angelicetum heterocarphae* dont *Angelica heterocarpa*. Cette communauté devra, à l'avenir, être décrite selon le code de nomenclature phytosociologique (Theurillat et al. 2021). Lors du premier

inventaire des habitats de 2002, un habitat d'intérêt communautaire de roselière avait été identifié : le 7210 'Marais calcaires à *Cladium mariscus* et espèces du *Caricion davallianae*'. Cependant, l'espèce *Cladium mariscus* a uniquement été observée très ponctuellement lors de nos prospections de terrain ne permettant pas de caractériser cet habitat et aucun relevé recueilli à travers la bibliographie n'a répondu à la définition des végétations caractéristiques de ce type de marais.

Les végétations des **fouffrés et forêts** sont les milieux identifiés à partir du plus faible nombre de relevés (19 relevés). Sur l'estuaire de la Loire, les forêts couvrent de faibles surfaces en raison de la gestion agropastorale du site qui favorise les milieux ouverts. Il est très probable, qu'en l'absence de gestion, les forêts occuperaient des surfaces bien plus importantes et pourraient jouer un rôle écologique important comme lieu de nidification d'oiseaux comme les hérons cendrés (*Ardea cinerea*) (Cianfaglione 2021). Néanmoins, les conditions de salinité sur l'estuaire de la Loire limitent leur expression sur les secteurs les plus aval du site. 3 HIC appartenant aux fouffrés et forêts ont été recensés : le 91E0 'Forêts alluviales à *Alnus glutinosa* et *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*)' ; 91F0 'Forêts mixtes à *Quercus robur*, *Ulmus laevis*, *Ulmus minor*, *Fraxinus excelsior* ou *Fraxinus angustifolia*, riveraines des grands fleuves (*Ulmenion minoris*)' et le 92D0 'Galeries et fouffrés riverains méridionaux (*Nerio-Tamaricetea* et *Securinegion tinctoriae*)'. Ce dernier habitat, caractérisé par les haies et fouffrés de *Tamarix gallica*, n'avait pas été retenu dans la liste des HIC du premier inventaire de 2002. Pourtant, cette communauté végétale (*Solano dulcamarae – Tamaricetum gallicae*) est mentionnée sur l'estuaire de la Loire depuis plusieurs décennies (de Foucault 1984) et considérée d'intérêt communautaire (de Foucault et al. 2012).

1.6 Conclusion

Le système expert que nous avons développé sur le site Natura 2000 de l'estuaire de la Loire a permis d'attribuer efficacement des noms de syntaxons et d'habitats aux relevés de végétation avec un haut niveau de précision. Il est le premier outil en France d'identification automatique des habitats d'un site Natura 2000 à partir de relevés phytosociologiques.

Une telle approche méthodologique présente de nombreux avantages. Elle permet de classer de manière formalisée les relevés du site Natura 2000 vers les typologies de référence au niveau national et européen, contrairement aux jugements des experts qui peuvent différer selon les opérateurs. D'autre part, le SE effectue des identifications de manière reproductible et pourra être appliqué sur de nouveaux relevés obtenus à l'avenir, en utilisant les mêmes critères. Par conséquent, l'utilisation du SE rend possible le suivi des habitats sur le long terme à partir d'analyses diachroniques de jeux de données de relevés phytosociologiques réalisés au fil du temps. L'observation des changements floristiques qui peuvent s'opérer au sein des habitats (par exemple, la raréfaction ou l'absence de certaines espèces diagnostiques) permet d'évaluer l'impact de la gestion mise en place par le gestionnaire (Kapfer et al. 2017). Les analyses de la dynamique de la végétation permettent une meilleure compréhension de la structure (variabilité floristique notamment) et du fonctionnement des habitats et apporteront des informations sur des états de dégradation ou de résilience en lien avec des activités anthropiques et écologiques (Janssen et al. 2016). Plus largement, le suivi de la végétation à partir du système expert peut participer à l'évaluation de l'état de conservation des habitats énumérés dans la directive (art. 11) (European Commission 1992).

De plus, l'application du SE sur les relevés de l'estuaire de la Loire a permis d'établir automatiquement des groupes de relevés (clusters) pour chaque type d'habitat. L'analyse de ces clusters a été utilisée pour définir les espèces caractéristiques (espèces diagnostiques, constantes et dominantes) pour chaque habitat afin de préciser et compléter les listes d'espèces présentées dans les descriptions des référentiels européens. En complément, les informations sur les optimums écologiques des espèces végétales (par exemple, les indices d'Ellenberg (Ellenberg et al. 1991)) peuvent être utilisées pour décrire les conditions environnementales des habitats (Diekmann 2003) (Annexe 04). Finalement, les localisations des relevés phytosociologiques identifiés par le SE ont été utilisées pour spatialiser la distribution des

relevés rattachés aux habitats sur le site d'étude. L'ensemble de ces informations a été utilisé et synthétisé pour rédiger des fiches descriptives des habitats pour chaque HIC (*Annexe 05*) qui intégreront le document d'objectifs (DOCOB) du site Natura 2000.

Le SE constitue un outil évolutif dont la mise à jour peut être effectuée en fonction de l'évolution des connaissances (*Chytrý et al. 2020; Maciejewski et al. 2020*). Il peut être modifié et / ou complété par l'ajout de nouveaux types de végétation ou par l'ajustement des définitions déjà incluses. Les perspectives de ce travail seront de poursuivre la construction du SE en ajoutant de nouvelles définitions formelles des végétations observées et d'améliorer les définitions existantes à partir de nouvelles données.

Par tous ces aspects, la méthode SE peut être considérée comme un véritable outil d'aide à la décision, notamment dans le cadre de la priorisation des enjeux de conservation ou dans le choix des orientations de gestion à mettre en œuvre sur le site Natura 2000 (*Rodríguez-Rojo et al. 2014; Schaminée et al. 2016; Chytrý et al. 2020*). La méthode SE s'inscrit dans le développement de dispositifs numériques innovants basés sur les nouvelles technologies tels que les applications Android d'identification des végétations VegKey en République Tchèque (*Tichý & Chytrý 2019*) et VegKeyFr pour le littoral français (<https://play.google.com/store/apps/details?id=com.test.tichy.vegkeyFR>).

Cette étape d'identification des végétations et des habitats était surtout indispensable pour la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire qui est abordée dans le chapitre suivant. En effet, la cartographie du tapis végétal nécessite une typologie des végétations selon laquelle les variations plus ou moins continues de la composition des éléments sont triées en types ou classes distincts. Ainsi, le système expert peut être considéré comme un outil d'aide à la cartographie des habitats, permettant de contribuer à la localisation et la quantification des surfaces occupées par chaque habitat au sein du site Natura 2000.

Chapitre 2 : Cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire par télédétection

2.1 Introduction

La cartographie des habitats s'est principalement développée à la suite de l'adoption de la directive 'Habitats-Faune-Flore' en 1992 qui a généré de nombreux travaux pour identifier et délimiter les sites Natura 2000 du réseau européen (Ichter et al. 2014). Depuis cette période et jusqu'à aujourd'hui, la méthode traditionnelle de cartographie des habitats est principalement basée sur des prospections de terrain et de la photo-interprétation (Lewis et al. 2013; Rhodes et al. 2015). En France, les modalités de mise en œuvre de la démarche sont détaillées dans le guide méthodologique de cartographie des habitats des sites Natura 2000 du Muséum national d'Histoire naturelle (Clair et al. 2005). Cette méthode nécessite un travail intensif de prospection de terrain pendant lequel l'opérateur inventorie les unités élémentaires (communautés végétales et composantes abiotiques) caractérisant les habitats de la typologie préalablement établie. Les habitats sont délimitées sur un support cartographique, constitué le plus souvent d'une photographie aérienne sur papier. Leur individualisation est réalisée à partir de l'analyse visuelle des caractéristiques de l'image (couleurs, textures, formes...) et la mise en correspondance avec les éléments visibles sur le terrain. Les zones présentant les mêmes apparences sont interprétées comme correspondant à un même type d'habitat. Dans un second temps, les délimitations des habitats recensés sur le terrain sont numérisées en individualisant chaque polygone manuellement dans un SIG. Le support cartographique le plus couramment utilisé pour l'inventaire et la numérisation des données est la photographie aérienne de l'IGN¹² (BD ORTHO®). Actuellement disponible avec une résolution entre 50 cm et 20 cm, elle est particulièrement adaptée à la photo-interprétation. De manière générale, la méthode traditionnelle de cartographie des habitats est considérée comme performante et permet de produire des cartes précises avec une résolution spatiale fine (Mitsch & Gosselink 2000; Becker et al. 2007) (Fig. 15).

¹² Institut national de l'information géographique et forestière

Cependant, bien que la méthode traditionnelle soit l'approche la plus couramment utilisée actuellement pour la cartographie des habitats, elle présente de nombreuses contraintes et plusieurs auteurs ont mis en avant ses limites. D'une part, cette méthode est considérée comme soumise à une certaine forme de subjectivité et les représentations cartographiques peuvent différer considérablement d'un opérateur à l'autre (Stevens et al. 2004; Cherrill 2014; Mõisja et al. 2018; Raab et al. 2018; Ullerud et al. 2018). Par exemple, une étude réalisée au Royaume-Uni a conclu que l'accord spatial par paires entre sept opérateurs cartographiant le même site ne représentait que 34% au niveau des communautés végétales de la typologie nationale de Grande-Bretagne (NVC) (Hearn et al. 2011). Pourtant, les cartes produites par cette méthode sont généralement acceptées comme étant correcte sans aucune forme d'évaluation de la précision (Lewis et al. 2013; Ichter et al. 2014). De plus, la méthode traditionnelle de cartographie nécessite de parcourir l'intégralité des zones étudiées afin de recueillir des données sur les végétations et les facteurs environnementaux qui caractérisent les habitats. De ce fait, il s'agit d'une méthode très longue, et donc difficile à déployer sur des territoires vastes et difficiles d'accès comme les marais et les zones escarpées (Zlinszky et al. 2014; Marcinkowska-Ochtyra et al. 2018). Par conséquent la réalisation des cartographies d'habitat est difficile à mettre en œuvre, en particulier sur les grands sites Natura 2000, ce qui peut conduire à des retards importants dans leur actualisation. Ces difficultés peuvent impacter les gestionnaires qui ne bénéficient pas d'un suivi régulier des habitats (Harris et al. 2015) et qui sont souvent obligés d'utiliser des données anciennes dans le cadre de leurs missions (par exemple dans le cadre d'évaluations d'incidences). Cette contrainte est d'autant plus marquée lorsqu'il s'agit d'écosystèmes en évolution rapide comme les estuaires (Kopeć et al. 2016; Moran et al. 2017).

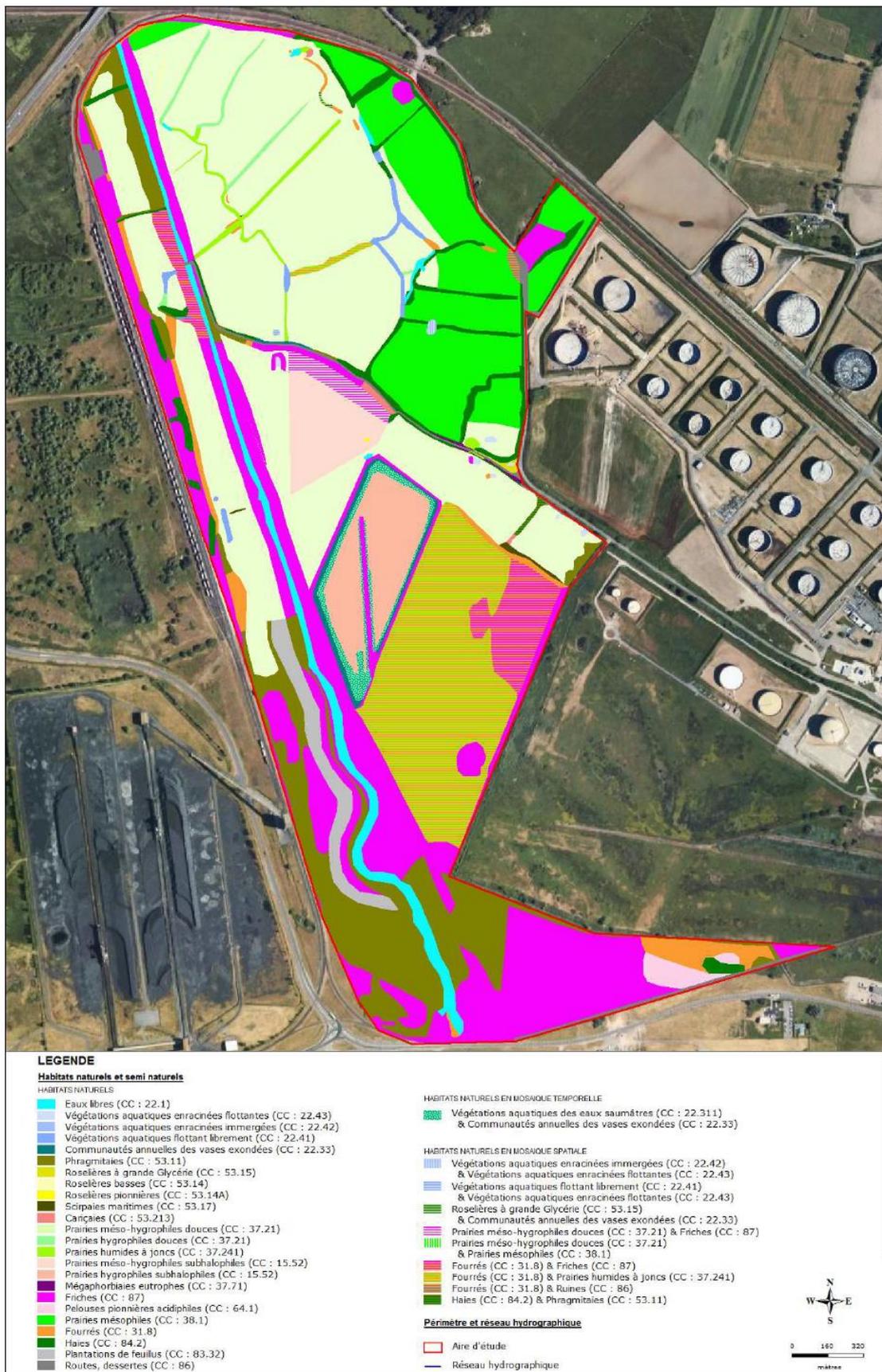


Figure 15. Exemple d'une cartographie produite par la méthode traditionnelle : Carte des habitats des espaces naturels en aval du Priory (Donges / Montoir-de-Bretagne), réalisée en 2010 par le bureau d'étude Biotope pour le Grand Port Maritime Nantes Saint-Nazaire (typologie Corine Biotopes) (Biotope 2010)

Quelques témoignages sur les difficultés de cartographie de l'estuaire de la Loire...

« En raison de l'immensité du territoire, de son extrême variété dans le détail, des difficultés d'accès de beaucoup de points, l'étude restait très superficielle. [...] On trouve aussi plusieurs dépressions relativement vastes mais dont le contour, difficile à cerner, est donné approximativement. [...] L'accès de bien des points est fort délicat, la marche difficile dans les zones molles, de longs détours sont souvent nécessaires et il est bien délicat de se repérer en de nombreux points. Nous avons cependant parcouru l'ensemble de la zone, mais il est évident que bien des limites sont plus ou moins approximatives. [...] C'est si varié et si complexe que c'est très difficile, aussi bien à décrire qu'à cartographier. » (Dupont et al. 1983)

« Les 'coupures' entre les groupements sont parfois difficiles à distinguer. [...] L'absence de topographie très marquée et des pratiques agricoles peu tranchées expliqueraient ces fines nuances. Il se produit un passage très progressif d'un groupement à l'autre. » (Daudon 1998)

« Le suivi de la répartition des groupements végétaux implique d'en renouveler, à une fréquence déterminée, la cartographie. Cependant, dans le cas présent, il n'était pas envisageable d'effectuer, tous les 5 ou 6 ans, l'inventaire de l'ensemble de la surface à surveiller ; ce travail se révélerait beaucoup trop laborieux étant donné qu'il a déjà fallu deux ans pour mettre en place l'état de référence en aval de Nantes. » (Ouest Aménagement 2003)

« L'objectif initial était de pénétrer dans chaque parcelle afin d'y caractériser la végétation. Cependant, la présence de bovins a parfois limité ces accès (taureau, vaches avec veau, troupeaux de génisses) et l'observateur est resté en bordure de parcelle où y a pénétré rapidement. En bordure immédiate de la Loire, un secteur n'a pu être visité car cerné par les eaux du fleuve. » (SCE 2011)



Pâturage extensif d'une prairie inondable par un troupeau de génisses

© Mathieu Le Dez

Face à ces difficultés, de nombreuses études ont été menées depuis plusieurs années pour évaluer le potentiel la télédétection dans le cadre de la cartographie de la végétation et des habitats (Turner et al. 2003; Corbane et al. 2015; Jongman et al. 2019). La télédétection désigne l'acquisition à distance d'information sur une cible donnée, par l'intermédiaire d'un instrument de mesure n'ayant pas de contact avec celle-ci (Baghdadi & Zribi 2016). Contrairement aux approches de cartographies classiques de terrain, la télédétection présente notamment les avantages suivants : 1) elle permet de produire de manière rapide et rentable des cartographies sur de vastes territoires (Luo et al. 2015; Free et al. 2020) ; 2) elle évite les problèmes d'accessibilité en produisant des données à distance spatialement explicite et cohérente sur l'ensemble d'un territoire (Rapinel et al. 2015b; Kalacska et al. 2017; Grabska et al. 2019) ; 3) Elle répond à une plus grande objectivité grâce au suivi de procédures de traitements harmonisées (Nagendra et al. 2013; Stenzel et al. 2014; Raab et al. 2018) ; 4) Elle permet la mise en place de suivis réguliers de la végétation et des habitats grâce à l'accès à des données produites régulièrement et de manière standardisée (Jia et al. 2017; Laengner et al. 2019).

Les images utilisées proviennent régulièrement de capteurs optiques passifs qui enregistrent l'énergie solaire réfléchi par les différents matériaux de la surface terrestre. Le rayonnement est le plus souvent enregistré dans la partie visible et infrarouge, correspondant à la partie solaire du spectre électromagnétique. Les réponses spectrales des surfaces terrestres sont variées et diffèrent selon la nature des matériaux. La figure 16 illustre un spectre théorique d'une végétation saine. Dans la partie visible du spectre (400-700 nm), l'absorption de la lumière par les pigments foliaires est très élevée. Les pigments chlorophylliens a et b absorbent sélectivement les longueurs d'onde bleues (400-500 nm) et rouges (600-700 nm) pour la photosynthèse (Salisbury & Ross 1992). L'absorption est moindre dans les longueurs d'ondes vertes (500-600 nm), d'où l'aspect vert de la végétation saine. Les caroténoïdes ont une forte absorption dans les longueurs d'ondes bleues (400-500 nm) (Peñuelas & Filella 1998). Une végétation stressée produira une signature spectrale différente correspondant à l'effet du stress sur les différents pigments foliaires (Blackburn 2006; Cole et al. 2014). Dans les longueurs d'ondes du proche infrarouge (700-1300 nm), la réflectance augmente nettement en lien avec la structure interne des feuilles (interfaces air-cellule dans le mésophylle spongieux des feuilles) (Woolley 1971), ce qui se traduit par un plateau élevé dans le proche infrarouge (NIR). La région spectrale caractérisée par une forte augmentation de la réflectance entre le rouge et le NIR est connue sous le nom de 'red-edge'. Elle est notamment utilisée dans la détection du stress des plantes (Gitelson et al. 1996). Le moyen infrarouge (SWIR : 1300-2500 nm) est

marqué par l'absorption de l'eau et certaines substances biochimiques comme la lignine et les constituants du carbone (Woolley 1971). Les bandes d'absorption à 970, 1200, 1450, 1790, 1930 et 2500 nm caractérisent plus particulièrement la concentration en eau des feuilles (Peñuelas & Filella 1998). Le nombre de bandes spectrales et leur largeur, enregistrées par les capteurs optiques passifs, définit la résolution spectrale : les images multispectrales sont caractérisées par un nombre de bandes limité et relativement larges (de 3 à 20) tandis que les images hyperspectrales se composent de plusieurs dizaines ou centaines de bandes relativement étroites.

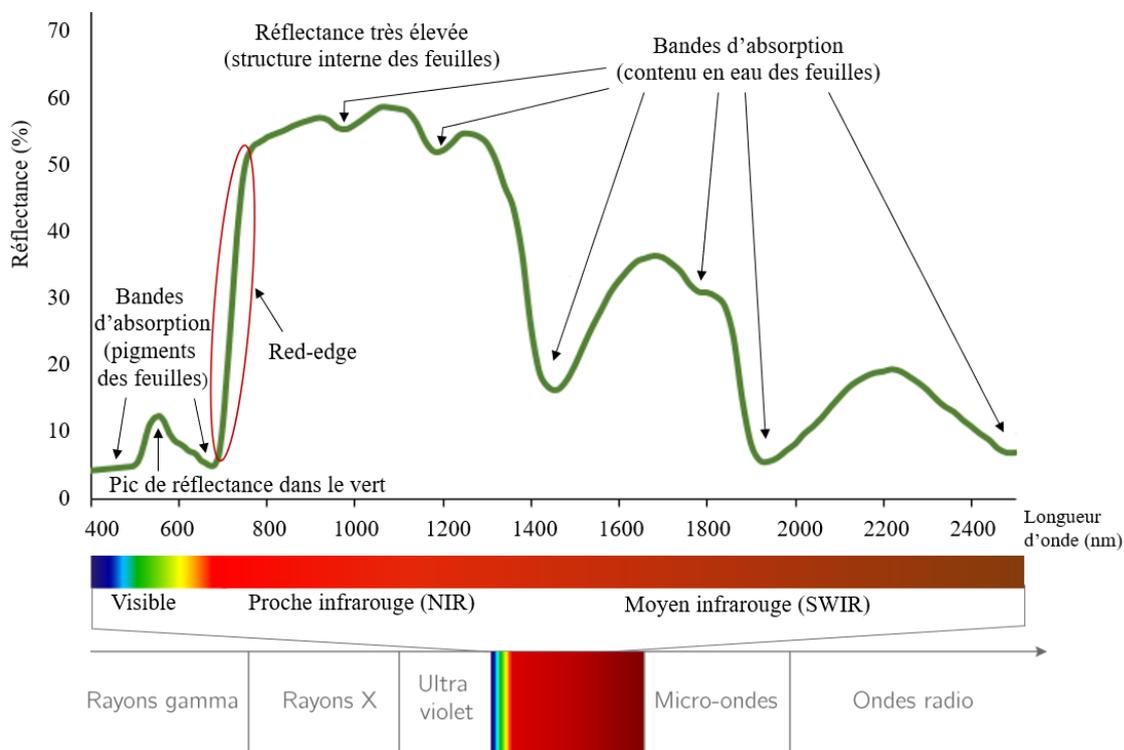


Figure 16. Signature spectrale théorique d'une végétation saine dans les longueurs d'ondes du visible au moyen infrarouge

En complément des données optiques passives, les capteurs LiDAR sont régulièrement utilisés dans les recherches en cartographie de la végétation et des habitats (Melin et al. 2017; Launeau et al. 2018a; Frati et al. 2020; Shi et al. 2021). Le LiDAR (Light Detection and Ranging) correspond à un système actif utilisant des impulsions laser permettant de déduire les coordonnées 3D des surfaces terrestres. Le laser émet des millions d'impulsions et déduit l'endroit où elles se reflètent par la mesure du temps aller-retour de chaque impulsion, produisant ainsi un nuage de points 3D (Fig. 17). Le traitement du nuage de points donne notamment accès à la topographie, avec la production du modèle numérique de terrain (MNT) après classification des nuages de points en végétation ou bâtiment. La différence entre

l'enveloppe de tous les points (modèle numérique de surface - MNS) et le MNT correspond au modèle numérique de canopée (MNC) indiquant la hauteur du couvert végétal.

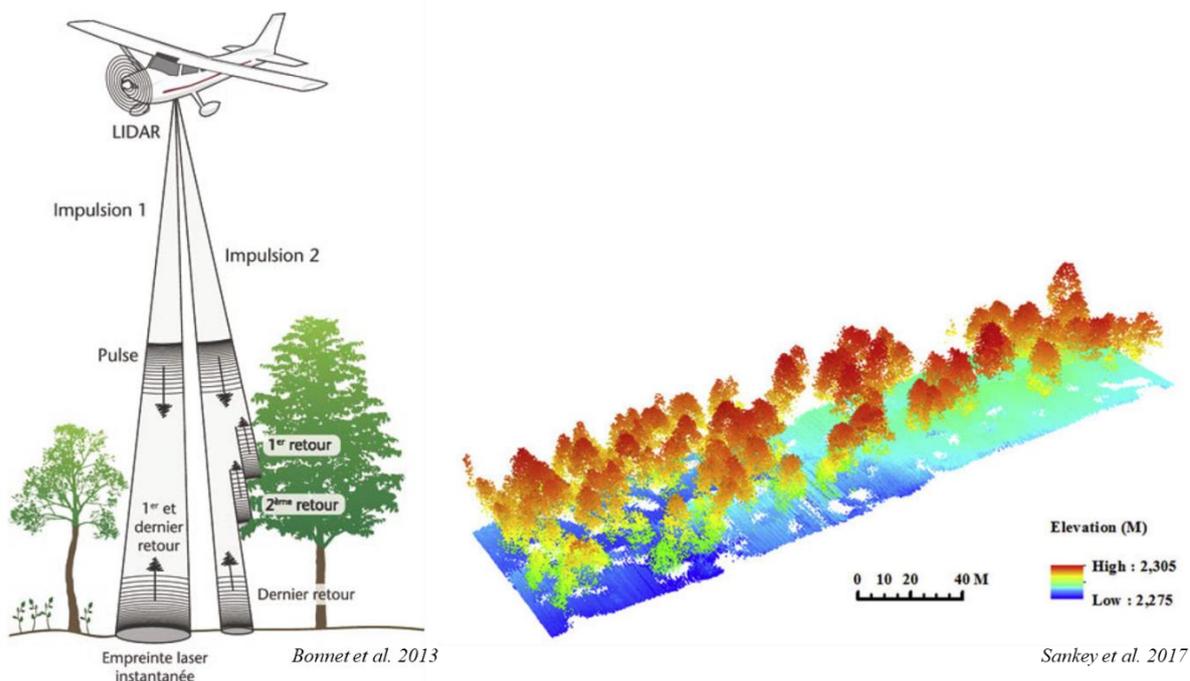


Figure 17. Illustration du fonctionnement d'un système LiDAR. Les retours d'onde des impulsions émises par le LiDAR permettent la production d'un nuage de points traduisant la structure 3D de la surface terrestre

Depuis de nombreuses années, des études s'intéressent spécifiquement à l'utilisation des données de télédétection pour la cartographie de la végétation et des habitats dans des écosystèmes similaires à celui de l'estuaire de la Loire. Parmi ces études, un nombre important fait appel à l'imagerie satellitaire. C'est le cas, par exemple, de [Laba et al. \(2008\)](#) qui ont utilisé des images Quickbird pour la cartographie de plantes invasives d'un estuaire aux Etats-Unis. De la même manière, [Rapinel et al. \(2014\)](#) ont analysé des images du satellite Worldview-2 pour la cartographie de la végétation de marais littoraux en France, tandis que des images SPOT-4 ont été explorées par [Valentini et al. \(2015\)](#) pour la cartographie d'habitats littoraux en Italie. Plus récemment, l'utilisation des données Sentinel-2 est apparue comme un bon compromis pour la cartographie de la végétation des zones humides. La mission Sentinel-2 est composée de deux satellites mis en orbite en 2015 et 2017 dans le cadre du programme d'observation de la Terre 'Copernicus' de l'Agence Spatiale Européenne. Les caractéristiques de cette nouvelle constellation de satellites permettent l'obtention gratuite d'images multispectrales à 13 bandes du visible au moyen infra-rouge avec une résolution spatiale minimum de 100m² et une fréquence de revisite élevée (plusieurs images par mois). Plusieurs

études récentes ont démontré le potentiel des images Sentinel-2 pour la cartographie de la végétation, en particulier grâce à l'analyse de séries temporelles. Par exemple, [Calleja et al. \(2019\)](#) ont utilisé des données Sentinel-2 en milieu estuarien pour la cartographie de l'arbuste envahissant *Baccharis halimifolia*, tandis que [Rapinel et al. \(2019\)](#) ont exploité les données de ces satellites pour la cartographie des prairies d'une plaine inondable en Bretagne.

En parallèle, d'autres recherches se sont focalisées sur l'utilisation de données hyperspectrales et LiDAR pour la cartographie de la végétation de zones humides. Par exemple, [Zomer et al. \(2009\)](#) ont travaillé à partir de données hyperspectrales pour cartographier un marais estuarien en Californie. De la même manière, [Burai et al. \(2015\)](#) ont utilisé une image hyperspectrale pour la cartographie de la végétation d'une zone humide en Hongrie. L'utilisation de données LiDAR a été étudiée par [Collin et al. \(2010\)](#) sur des végétations de marais littoraux du Golfe du Saint-Laurent au Québec, ainsi que par [Zlinszky et al. \(2014\)](#) sur les prairies humides d'un site Natura 2000 en Hongrie. L'utilisation de données hyperspectrales associées à des données LiDAR a notamment été expérimentée par [Onojeghuo & Onojeghuo \(2017\)](#) pour la cartographie d'habitats de marais en Angleterre, et plus récemment par [Sławik et al \(2020\)](#) pour l'identification de prairies humides d'intérêt communautaire sur un site Natura 2000 en Pologne.

Ces différents exemples, ainsi que de nombreuses autres études, ont permis de révéler le potentiel représenté par les méthodes de télédétection dans le cadre de la cartographie des habitats des sites Natura 2000. Ainsi, dans le cadre de l'élaboration de la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire, notre objectif est de développer une approche méthodologique basée sur l'utilisation de différentes sources de données de télédétection. Pour répondre à cet objectif, nous avons choisi d'utiliser des images présentant des caractéristiques complémentaires afin d'estimer l'intérêt de différentes propriétés de données de télédétection disponibles actuellement :

- 1) D'une part, des images satellites Sentinel-2, afin d'évaluer l'apport de données multispectrales à haute résolution spatiale (13 bandes spectrales avec une résolution spatiale entre 60 et 10 mètres). Ces données seront également utilisées pour estimer l'intérêt de la répétitivité à travers une classification multi-dates d'images acquises au cours d'une année.

- 2) D'autre part, des images aéroportées hyperspectrales et LiDAR afin d'examiner l'intérêt de l'utilisation d'informations spectrales détaillées et de données structurelles (dimension 3D) pour la cartographie des habitats.

2.2 Matériel et méthode

2.2.1 Acquisition et pré-traitements des images

2.2.1.1 Images satellites Sentinel-2

La recherche et le téléchargement des images ont été effectués à partir de la plateforme française de données et de services sur les surfaces continentales Theia (theia-land.fr). La couverture de l'ensemble du site nécessitait l'utilisation de deux tuiles d'images Sentinel-2 (identifiants des tuiles : T30TWT & T30TXT). Nous avons recherché des images sans couverture nuageuse et distribuées régulièrement au cours d'un cycle annuel de végétation. Au total, nous avons utilisé 22 images Sentinel-2 (Level-2A – product–Bottom of Atmosphere (BOA) reflectance), correspondant à 11 dates d'acquisition réparties entre l'automne 2018 et l'été 2019 (Fig. 18).

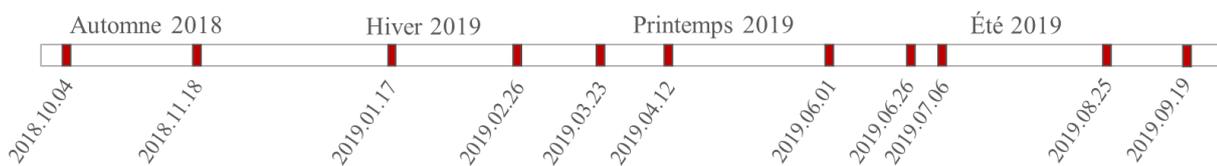


Figure 18. Dates d'acquisition des images Sentinel-2 durant un cycle annuel de végétation

Les images Sentinel-2 sont distribuées avec 3 bandes spectrales à 60m de résolution spatiale (B1, B9 et B10), 6 bandes à 20m de résolution spatiale (B5, B6, B7, B8A, B11 et B12) et 4 bandes à 10m de résolution spatiale (B2, B3, B4 et B8) (Tab. 19). Pour chaque date, nous avons retenu uniquement les bandes avec une résolution spatiale de 10 et 20 mètres (les bandes à 60m étant principalement destinées aux corrections atmosphériques). Nous avons empilé les bandes de même résolution spatiale et les bandes de 20 m ont été rééchantillonnées sur une grille de 10 m en utilisant une méthode bilinéaire. Pour finir, l'ensemble des bandes a été empilé pour former une image à 10 bandes spectrales de 10 mètres de résolution spatiale.

Tableau 19. Caractéristiques des bandes Sentinel-2

Bandes Sentinel-2	Régions spectrales	Longueur d'onde centrale (nm)	Largeur de bande (nm)	Résolution (m)
B1	Aérosol côtier	442.7	21	60
B2	Bleu	492.4	66	10
B3	Vert	559.8	36	10
B4	Rouge	664.6	31	10
B5	Red-edge 1	704.1	15	20
B6	Red-edge 2	740.5	15	20
B7	Red-edge 3	782.8	20	20
B8	Proche infrarouge	832.8	106	10
B8A	Proche infrarouge étroit	864.7	21	20
B9	Vapeur d'eau	945.1	20	60
B10	Moyen infrarouge - Cirrus	1373.5	31	60
B11	Moyen infrarouge 1	1613.7	91	20
B12	Moyen infrarouge 2	2202.4	175	20

2.2.1.2 Images hyperspectrales et LiDAR

2.2.1.2.1 Caractéristiques des capteurs

Caméras hyperspectrales

L'acquisition des images hyperspectrales a été réalisée à partir de deux caméras ('HySpex VNIR 1600'¹³ et 'HySpex SWIR 320 me'²) de la compagnie Norsk Elektro Optikk, Skedsmokorset, Norvège. L'utilisation de deux caméras permet une couverture totale du spectre allant du visible (400 nm) jusqu'au moyen infrarouge (2 447 nm). Les caractéristiques complètes de ces deux capteurs sont présentées dans le **tableau 20**.

Tableau 20. Caractéristiques des deux capteurs hyperspectraux : HySpex VNIR 1600 et HySpex SWIR 320 me (acquisition en 2009 dernier réétalonnage en 2017)

	HySpex VNIR 1600	HySpex SWIR 320 me
Détecteur	CCD Si	MCT (Hg Cd Te)
Pixels	1600	320
Canaux	160	256
Gamme spectrale (nm)	400 - 1000	960 - 2447
Résolution spectrale (nm)	4.2	7.2
Echantillonnage par canal (nm)	3.6	6.0
Champ de vision (°)	17	13
Filtre égaliseur EQ	Oui	Non
Altitude au-dessus du sol (m)	1500	1500
Résolution spatiale obtenue à 240 km/h (m)	1.12	2.24

¹³ Les caméras ont été financées par le l'Europe via le FEDER en Pays de la Loire, l'Etat via le FNADT et le Département de la Loire-Atlantique dans le cadre du CPER 2007-2013 GÉNIE CIVIL, ENVIRONNEMENT ET GESTION DURABLE DE LA VILLE R51_p6 Axe 3 : Application de la télédétection au génie civil environnemental et à la gestion durable de la ville.

Dans la suite du manuscrit, nous faisons référence au capteur ‘HySpex VNIR 1600’ comme étant le capteur VNIR, et au capteur ‘HySpex SWIR 320 me’ comme étant le capteur SWIR.

Système LiDAR

Les données LiDAR ont été acquises avec un système Titan¹⁴ de la société Teledyne Optech Incorporated, Vaughan, Ontario, Canada. Ce matériel est composé d’un laser bathymétrique avec une longueur d’onde dans le vert (canal C3 : 532 nm) et d’un laser topographique avec une longueur dans le proche infrarouge (canal C2 : 1064 nm). Le LiDAR est équipé d’un enregistreur du retour d’onde complet (IWR-3). Pour cette étude, seules les informations du laser topographique ont été acquises. Les caractéristiques complètes de ce capteur sont présentées dans le [tableau 21](#).

Tableau 21. Caractéristiques du capteur topo-bathymétrique LIDAR Titan (acquisition en 2015, maintenance annuelle)

	Titan DW 600	Commentaires
Canal C2 (nm)	1064	Topographique
Canal C3 (nm)	532	Bathymétrique
Ouverture laser C2 (mrad)	0.35	
Ouverture laser C3 (mrad)	0.7	
Altitude opérationnelle topographique (m)	300 - 2000	
Altitude opérationnelle bathymétrique (m)	300 - 600	
Fréquence des tirs lasers (kHz)	50 - 300	
Fréquence de scan (Hz)	0 - 210	
Champ de vision (°)	0 - 60	
Précision vertical (cm)	5 - 10	À 1 sigma
Enregistreur de retour d’onde (Go/s)	1	1 par nanoseconde
Compensation du roulis	Programmable	Désactivé avec caméras

2.2.1.2.2 Campagne aéroportée

La campagne aéroportée pour l’acquisition des données hyperspectrales et LiDAR a été programmée dès le début de la thèse (hiver 2018). Cette mission a été préparée en collaboration avec les sociétés GEOFIT-expert (cabinet de géomètres, spécialiste dans l’acquisition des données) et PIXAIR Survey (société spécialisée dans les services de levés aériens). Un avion bi-trappe Chieftain PA31-350, fabriqué par PIPER (Vero Beach, Floride, États-Unis) est

¹⁴ Le LiDAR a été financé conjointement par la Région des Pays de la Loire via l’AAP 2011 Réseau de Suivi et de Surveillance Environnementale (RS2E-OSUNA) Axe 1 Protection du littoral, des berges de Loire et de leurs ouvrages associés et par la Région Bretagne et le FEDER en Bretagne.

nécessaire pour cette mission spécifique impliquant l'installation des caméras hyperspectrales et LiDAR (Fig. 19).

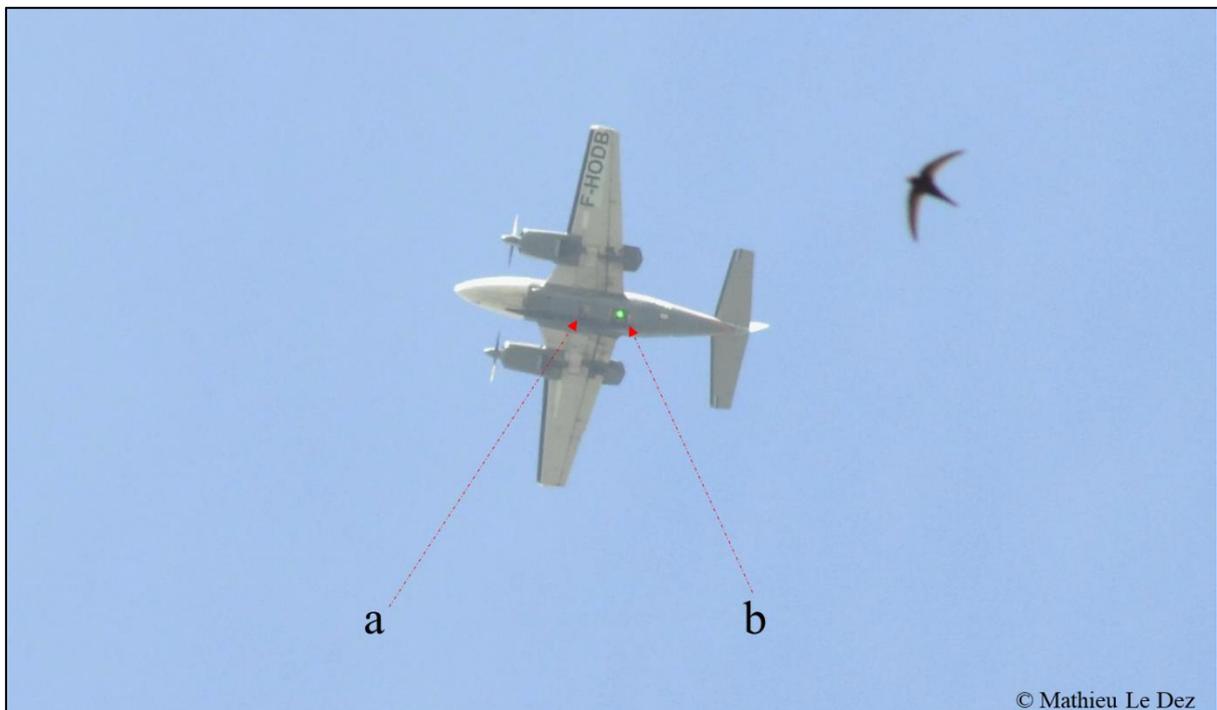


Figure 19. Photographie de l'avion lors du survol du site Natura 2000. a) trappe avec les caméras VNIR et SWIR ; b) trappe avec le LiDAR Titan (le point lumineux correspond au faisceau du laser vert (C2) uniquement en mode discret)

Grâce au montage du LiDAR Titan sur la première trappe et des caméras VNIR et SWIR sur la seconde trappe de l'avion, une seule campagne aéroportée a été organisée par la société GEOFIT-expert. William Gentile (ingénieur à GEOFIT-expert) était responsable de l'acquisition LiDAR et Manuel Giraud (ingénieur d'étude au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique) coordonnait les acquisitions hyperspectrales.

Le scan du faisceau laser infrarouge du LiDAR a été ajusté sur le champ de vue de la caméra HySpex VNIR 1600 d'une ouverture de 17° et le recouvrement a été porté à 42% de façon à optimiser la couverture des images SWIR 320me à 13° d'ouverture (Fig. 20). L'altitude de l'avion et la vitesse d'acquisition ont été adaptées aux capacités de numérisation de la caméra. Ces réglages permettent ainsi d'assurer un aller-retour laser pour chaque ligne d'image acquise.

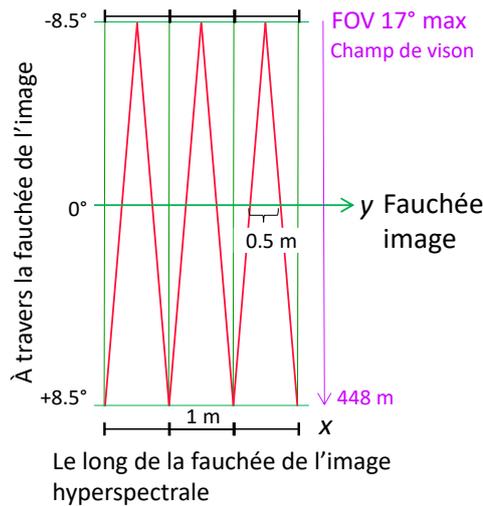


Figure 20. Caractéristiques de la ligne de balayage de la caméra HySpex VNIR 1600

La campagne aéroportée a été conçue afin de couvrir la majorité des surfaces du site Natura 2000, c'est-à-dire les secteurs compris entre Montoir-de-Bretagne (à l'aval) et Bouguenais (à l'amont) (Fig. 21). Le plan de vol a été optimisé à l'aide du logiciel AMM Teledyne Optech afin de réduire au minimum le temps d'acquisition. Au total, la couverture de la zone retenue nécessitait 67 lignes de vol, soit 3 jours consécutifs d'acquisition (les caractéristiques du vol sont présentées dans le [tableau 22](#)).

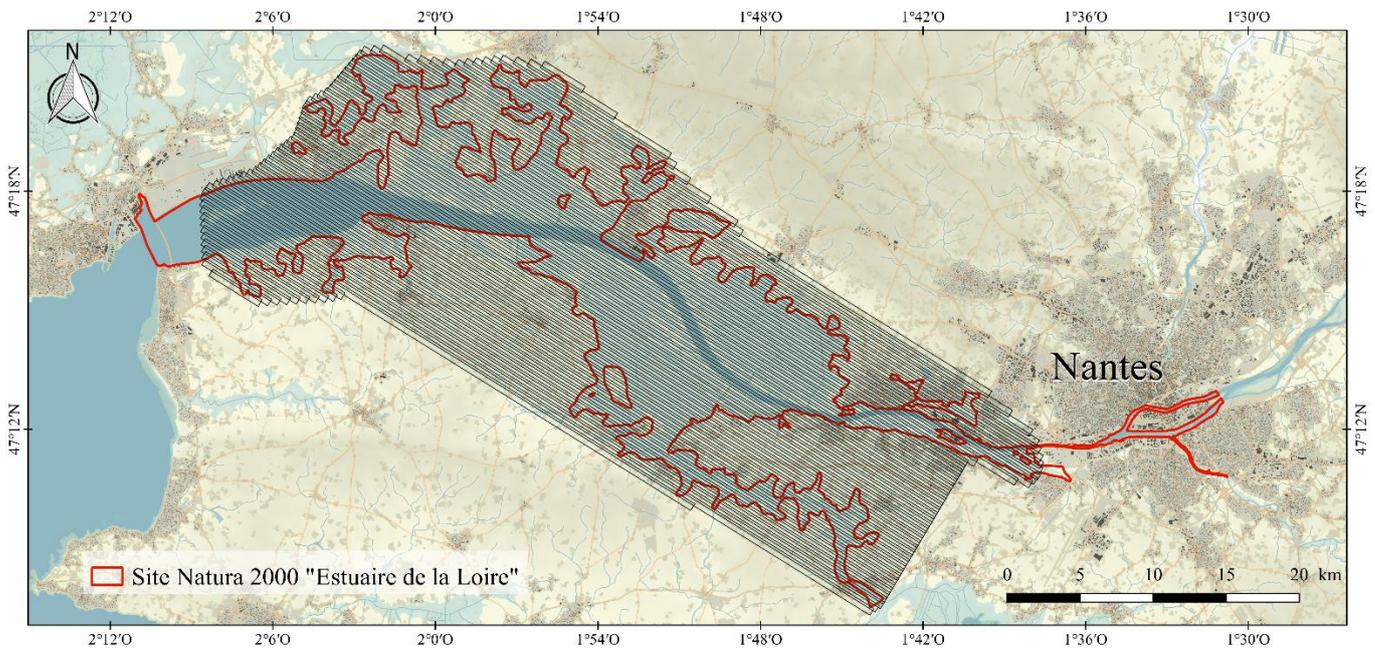


Figure 21. Plan de vol de la campagne aéroportée. Les bandes grises correspondent à l'emprise au sol des images enregistrées pour les 67 lignes de vols

Tableau 22. Caractéristiques détaillées du vol

Plan de vol		Commentaires
Surface couverte km ²	370.75km ²	
Lignes de vols	67	
Distance totale (km)	2554.9	
Distance lignes de vols (km)	1760.4	
Temps total (hh/mm/ss)	10:36:42	Effectué en 3 jours
Temps sur lignes (hh/mm/ss)	07:18:42	
Recouvrement (%)	42	
Vitesse au sol (km/h)	240	
Champ de vision (°)	17	Ajusté sur VNIR 1600
Fréquence des tirs lasers (kHz)	150	
Fréquence de scan (HZ)	70	
Densité de points au nadir (p/m ²)	3.63	
Densité de points en bordure (p/m ²)	2.03	
Densité moyenne de points (p/m ²)	5	
Altitude de vol au-dessus du terrain (m)	1500	
Largeur d'une fauchée (m)	448	
Espacement des points latéraux (m)	0.58	
Espacement des points parallèle nadir (m)	0.48	
Espacement des points parallèle bordure (m)	0.84	
Empreinte du laser C2 au sol (m)	0.525	

La période de survol a été fixée entre la mi-mai et le début du mois de juin. Elle correspondait à la saison optimale pour le développement de la majorité des communautés végétales du site, en particulier pour les prairies qui couvrent l'essentiel des surfaces de la zone d'étude. Cette période de l'année permettait également d'intervenir après la saison hivernale caractérisée par l'inondation prolongée de certaines zones de marais, et avant le début des premières fauches qui commencent à partir du mois de juin. Le survol du site était initialement prévu en mai 2018, mais des problèmes techniques sur le capteur LiDAR ainsi qu'une météo extrêmement défavorable ont contraint à l'annulation de la campagne. Finalement, la campagne aéroportée a été reportée l'année suivante avec un survol réalisé les 13, 14 et 15 mai 2019.

2.2.1.2.3 Prétraitement des données

Données hyperspectrales

Corrections atmosphériques et géométriques

Les corrections atmosphériques des images ont été réalisées par Manuel Giraud. Un fichier IGM (Image Geometry Map) produit par le programme PARAmetric GEocoding (PARGE) a été utilisé avec un Modèle Numérique de Surface (MNS) de la zone d'étude pour effectuer les

corrections atmosphériques avec le logiciel Atmospheric and Topographic Correction (ATCOR 4) dans la géométrie des capteurs dont la position de chaque pixel était connue en x, y, z, grâce à cette IGM et au MNS associé, et dont la position par rapport à la direction d'éclairement solaire était connue grâce à une éphéméride déterminée par temps GPS. Ainsi, la correction atmosphérique a été faite avec ATCOR 4 en lignes et colonnes des deux caméras VNIR et SWIR, traitées l'une après l'autre, pour tenir compte des effets propres à chaque capteur. C'étaient par exemple des défauts d'alignement des canaux en longueur d'onde qui pouvaient être repérés par logiciel à partir de la position de la bande spectrale étroite de l'oxygène et réalignées. Le principal constituant retiré sur l'image était la vapeur d'eau dont l'estimation a été faite pour chaque pixel grâce à la bande d'absorption à 820 nm. La bande à 940 nm de la vapeur d'eau étant très forte et bruitée, ne pouvait pas servir de référence à ce stade. Elle a été utilisée par la suite pour retrouver l'eau liquide contenue dans les feuilles grâce à une forme spectrale moins sensible. La seconde composante essentielle venait des aérosols qui ont été simulés par un modèle théorique rural avec une distance de visibilité estimée entre 40 km et 100 km. L'avantage de cette correction était de tirer parti de la résolution hyperspectrale pour aller chercher dans le spectre des radiances les signatures de la vapeur d'eau de chaque pixel pour tenir compte de toutes les hétérogénéités de sa distribution à l'échelle de la zone d'étude, assurant une correction la plus fine possible.

Ce n'est que dans un deuxième temps, après correction atmosphérique, que les images ont été produites dans un référentiel géographique par application de l'IGM à l'image sur le MNS initial. Malheureusement l'absence d'alignement mécanique parfait des deux caméras sur une même ligne d'acquisition au sol était à l'origine d'un décalage angulaire de visée qui s'est traduit par un décalage cartographique entre les images SWIR et VNIR. Ce défaut a été corrigé en routine par la détection automatique de points d'amer entre la BD ORTHO® et l'image VNIR géoréférencée sur des canaux de longueurs d'onde similaires dans le rouge. Une seconde procédure a ensuite été utilisée pour caler les deux images hyperspectrales par l'intermédiaire de recherche automatique de points d'amer entre VNIR et SWIR sur des canaux proches : à 940 nm pour le VNIR et 1064 nm pour le SWIR. Lorsque la détection de point d'amer entre la BD ORTHO® et l'image VNIR n'a pas été possible, en particulier à cause de changements d'état des surfaces trop fort (inondation, sécheresse, marécage...), la recherche manuelle de points d'amer a été effectuée sur des images d'intensités d'échos LiDAR discrets infrarouges. Cette opération plus lente a été utilisée une dizaine de fois. Lorsque les points d'amer ont été collectés, les images ont été drapées avec une résolution de 1 mètre avec la méthode RST (Rotation,

Scaling and Translation) fournie par le logiciel ENVI (Harris Geospatial Solutions, Broomfield, CO, USA) avec un rééchantillonnage au plus proche voisin.

Les lignes d'images étant très longues, elles ont été traitées par blocs avant d'être rassemblées dans deux mosaïques finales intitulées 'LA-20190513-15-VNIR' et 'LA-20190513-15-SWIR'. Pour minimiser les effets directionnels des réflexions solaires, les mosaïques ont été constituées préférentiellement avec les pixels les plus proches du nadir de chaque acquisition. De cette manière, les bordures d'images ne sont visibles que dans les secteurs de coups de vent ayant perturbé la trajectoire de l'avion. Si le recouvrement des images VNIR est complet, des lacunes apparaissent sur la mosaïque SWIR à cause de l'étroitesse du champ de vue de cette caméra.

La qualité spectrale de l'image a été améliorée par l'application d'une MNF (Minimum Noise Fraction transform) du logiciel ENVI. Cette méthode a permis une meilleure séparation du signal de l'image avec le bruit de numérisation qui a ainsi pu être retiré par une transformation inverse ne conservant que les 32 premières composantes de la mosaïque VNIR et de la mosaïque SWIR (Fig. 22-c). Malgré cela, un bruit résiduel propre à chaque caméra demeurait et a pu être retiré à la fin de cette chaîne de traitement par un ajustement sur un unique pixel de contrôle au sol ayant été échantillonné sur le terrain avec un spectromètre ASD FieldSpec 3 (ASD Inc., Longmont, Colorado) (Fig. 22-d). Ce simple ajustement a permis de retirer un bruit constant affectant essentiellement la dynamique de l'image tout en préservant la qualité de la correction atmosphérique d'ATCOR 4 (suppression des variations locale d'humidité de l'atmosphère en tout point de l'image).

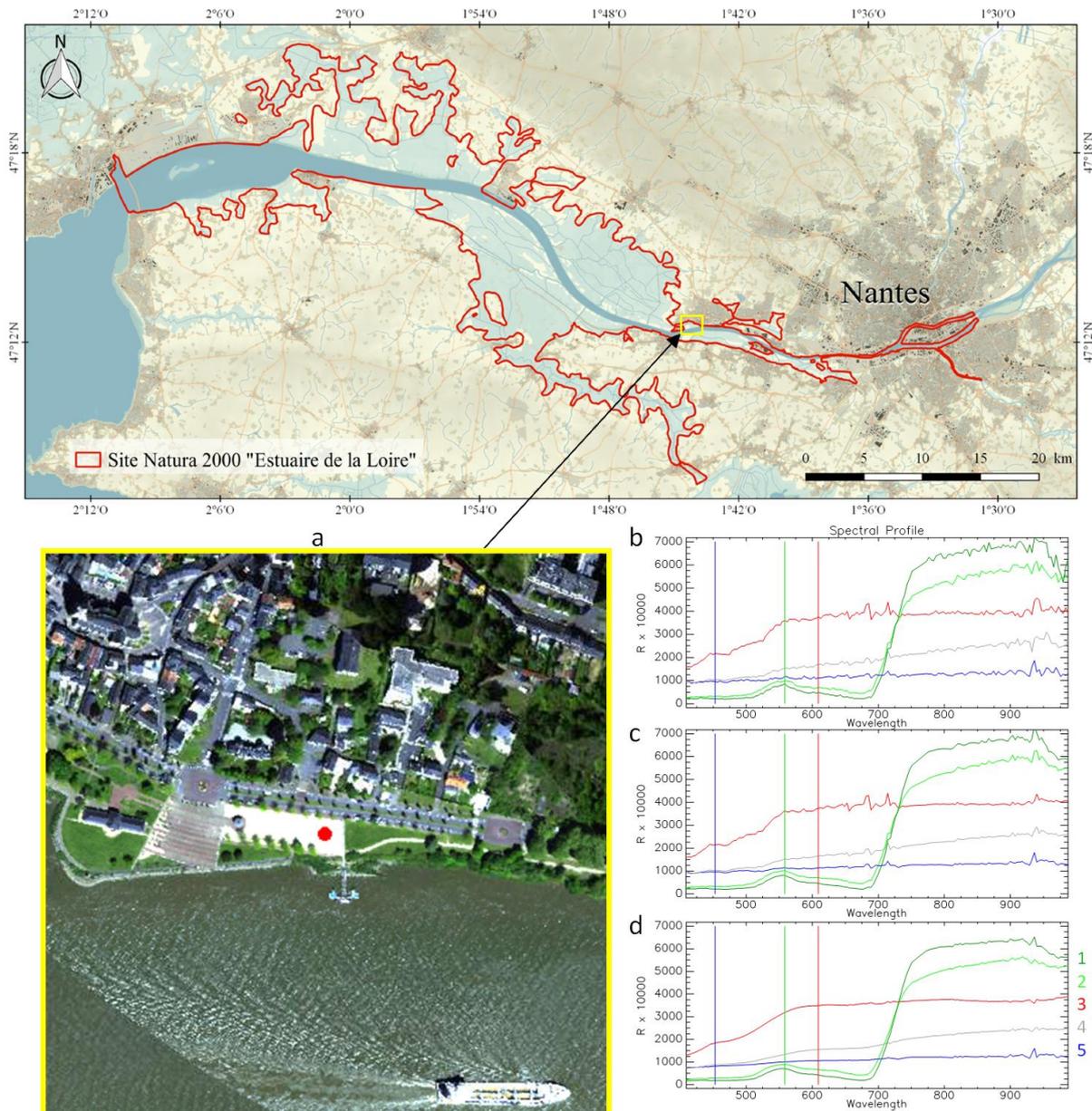


Figure 22. Zoom de l'image VNIR sur un secteur de Couëron (a) pour la visualisation des signatures spectrales de 5 surfaces (1 : arbre ; 2 : pelouse ; 3 : gravier (point de contrôle, en rouge sur l'image) ; 4 : ciment ; 5 : asphalt) correspondant aux différents niveaux de corrections (b : Réflectance ; c : MNF inverse et d : ajustement au pixel de contrôle au sol)

En raison des grandes variations de plages horaires d'acquisition (du matin à l'après-midi avec un éclairage solaire passant du sud-est au sud-ouest), une composante de réflexion spéculaire était à l'origine d'une translation des intensités de spectres à laquelle se sont ajoutés des changements de directions d'ombres portées. La quantité de données à traiter et le budget alloué ne nous permettait pas de réaliser une correction d'effet directionnel sur chaque ligne d'image. Une solution a été trouvée en procédant à une 'correction rapide' qui consistait à aligner toutes les réflectances de végétation équivalent sur une même base de réflectance dans le bleu (Fig.

23) grâce à une suppression de la distorsion des spectres dans cette gamme de longueur d'onde par la correction ATCOR (pas de remonté des réflectances dans le bleu Fig. 22-d).

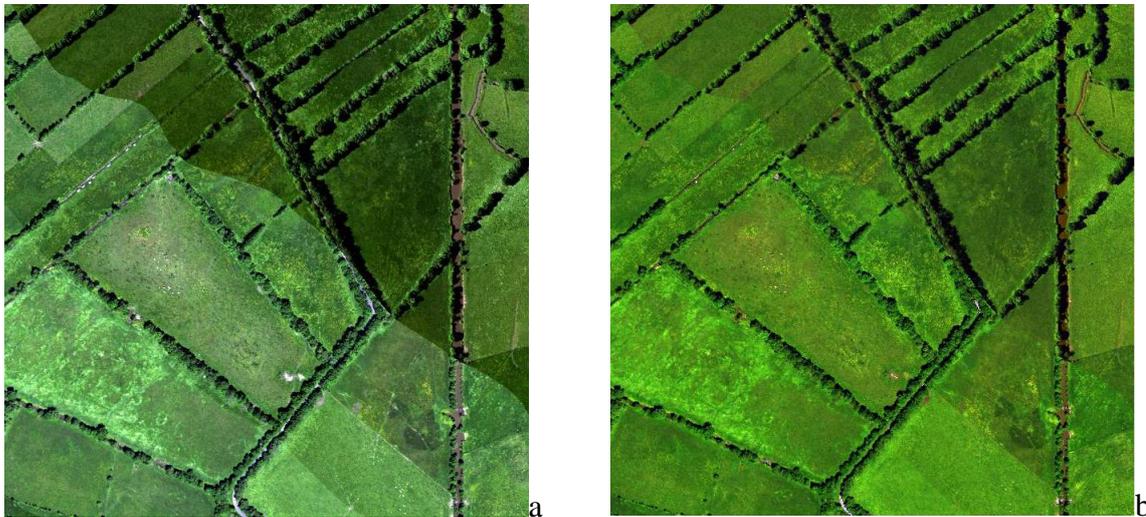


Figure 23. Visualisation de l'effet de la 'correction rapide'. a : image avant correction ; b : image après l'application de la 'correction rapide'. Ce zoom permet également de constater les décalages des ombres portées entre une ligne de vol acquise en fin de journée le 13 mai (partie supérieure de l'image) et une acquisition réalisée en début de journée le 15 mai (partie inférieure de l'image)

Pour accélérer encore la suite des traitements, seules les zones comprises dans le périmètre du site d'étude ont été conservées (Fig. 24). La correction rapide des grosses variations de plage horaire a permis de minimiser les principaux effets directionnels à l'origine du blanchiment de certaines lignes de vols liées aux directions d'éclairage et à la trajectoire de l'avion. Cette effet était minimum lors des acquisitions parallèles à l'élévation solaire et maximum lors des acquisitions quasi perpendiculaires facilement repérables par l'alternance de lignes de vols claires et sombres entre allers et retours (Fig. 24-a).



Figure 24. Visualisation de la 'correction rapide' sur l'ensemble de la zone. a : image avant correction ; b : image après l'application de la 'correction rapide'

Transformation de l'image hyperspectrale pour la simulation des caractéristiques spectrales d'une image Sentinel-2

Nous avons utilisé les caractéristiques spectrales des images satellites Sentinel-2 pour produire une image simulée à la résolution spatiale d'1 mètre (image appelée S2-S) en utilisant les données des caméras VNIR et SWIR. Ce choix méthodologique a été retenu afin d'évaluer les effets de l'augmentation de la résolution spatiale (de 10m pour les images satellites à 1m pour les images aéroportées) tout en conservant une résolution spectrale similaire entre les deux types d'images. La production de cette image a été effectuée à l'aide des fonctions de sensibilité des bandes du satellite Sentinel 2A (Fig. 25). La bande 10 correspondant à une bande d'absorption complète de la vapeur d'eau au niveau du sol celle-ci ne peut donc pas être calculée.

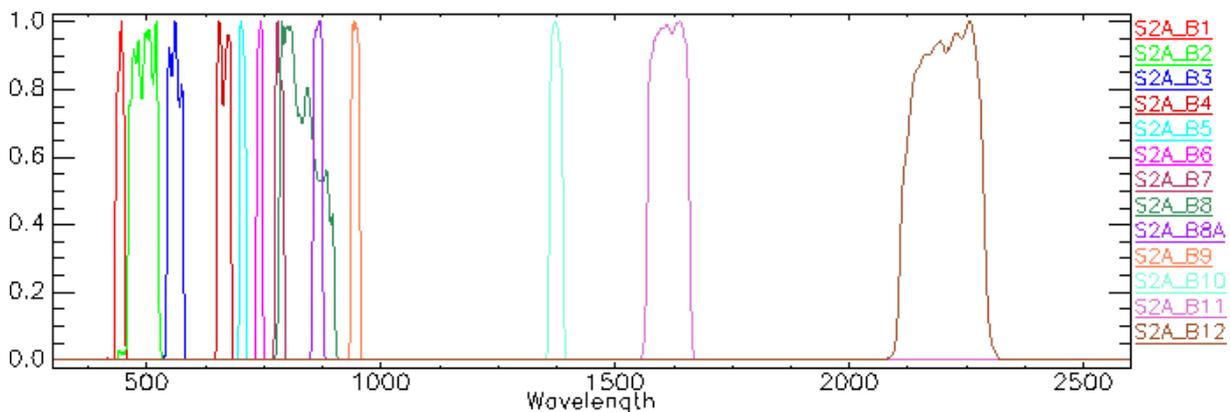


Figure 25. Fonctions de sensibilité des bandes du satellite Sentinel 2A

La figure 26 représente deux compositions colorées construites à partir de la caméra VNIR et SWIR. Elles sont utilisées pour présenter les spectres de réflectance d'une place en gravier clair (point de contrôle ASD au sol – ligne noire dans figure 26-c,d,e) et d'une pelouse (à l'est de ce point - ligne verte dans figure 26-c,d,e). Cette figure permet de constater qu'après le calcul des moyennes pondérées par leur fonction de sensibilité (Fig. 25) l'image S2-S présente des spectres moins riches en informations spectrales (Fig. 26-e) bien que son affichage en couleurs visibles donne la même image (Fig. 26-a). Si la simple inspection des spectres hyperspectraux permet de repérer les bandes d'eau contenues dans le feuillage à 940 nm et 1 130 nm ainsi que la liaison Al-OH du gravier à 2 200 nm, ces informations sont inaccessibles avec les spectres de l'image S2-S. Les formes générales de ces spectres doivent être comparées avec leurs voisins pour être classés puis identifiés par interprétation.

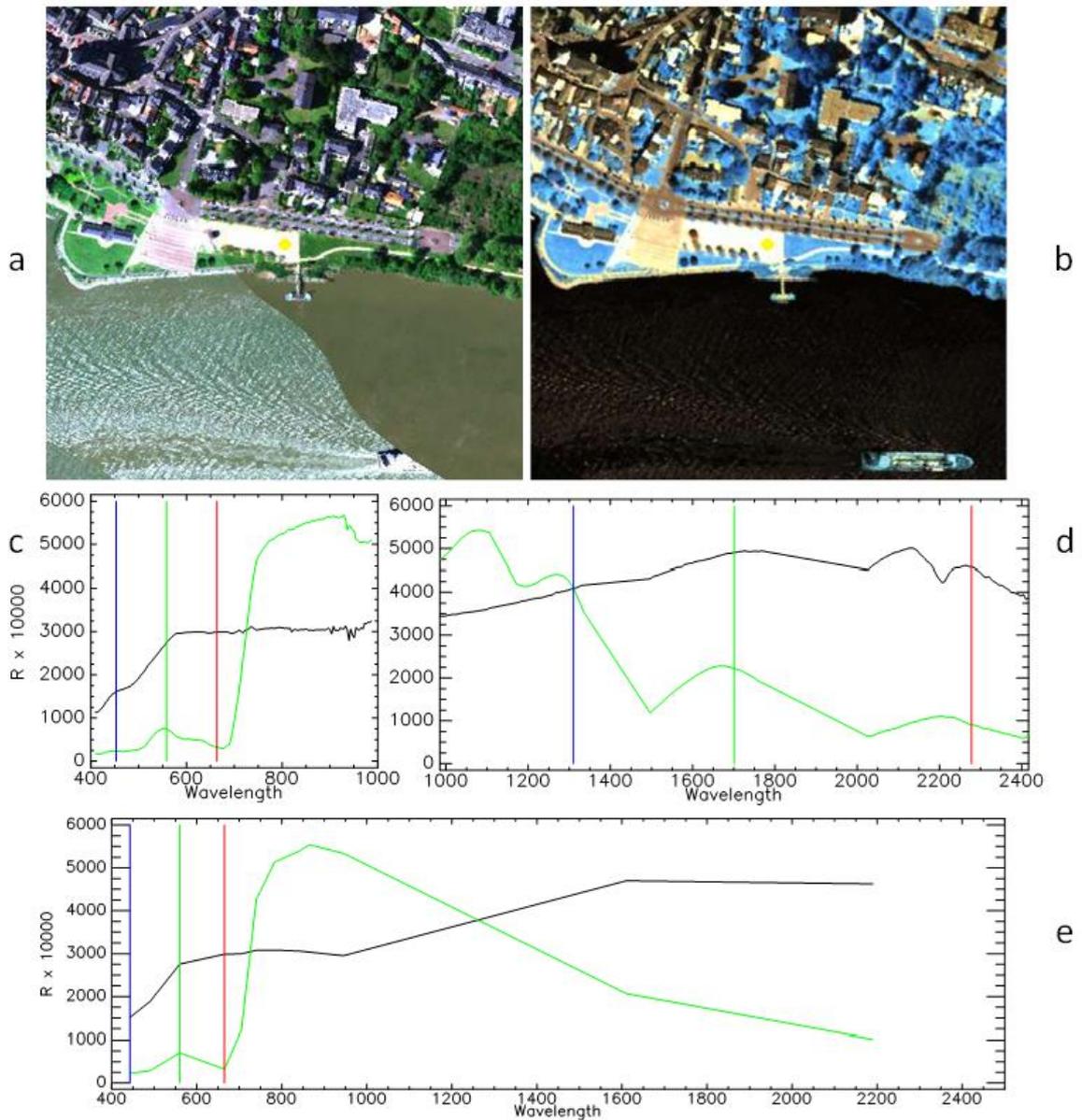


Figure 26. Compositions colorées construites à partir des données des caméras VNIR (a) et SWIR (b) (les canaux des compositions colorées sont indiqués par 3 traits verticaux rouges, verts et bleus sur les diagrammes c et d). Les spectres de réflectance d'une place en gravier clair (ligne noire) et d'une pelouse (ligne verte) sont représentés à partir des 160 bandes de la caméra VNIR (c), à partir des 162 bandes de la caméra VNIR (d) et à partir des 12 bandes de l'image S2-S (e)

Données LiDAR

Les traitements de données LiDAR sont décrits en détail dans l'article de [Launeau et al. \(2018\)](#) portant sur la caractérisation de la végétation basse du littoral. Les retours d'ondes ont été rééchantillonnés selon un trajet lumineux identique à celui des retours solaires des pixels de l'image hyperspectrale vers l'avion. L'approche LiDAR classique par comptage de points (échos) permet de différencier une végétation par la dispersion verticale de ses échos dans un volume, alors que par exemple, une route présentera des échos concentrés sur une surface. Des

classifications de dispersion des points peuvent ainsi permettre d'identifier une végétation et, à l'inverse, la détection de surfaces planes. Ce principe a été utilisé pour calculer le modèle d'élévation de terrain (MNT) et le modèle de surface (MNS) avec le logiciel ENVI-LiDAR (Exelis Visual Information Solutions, Inc, USA). Le MNS est l'enveloppe supérieure de la végétation et des bâtiments tandis que le MNT représente leur base, donnant ainsi accès à la surface du sol hors végétation et bâtiments. La différence entre la hauteur du MNS et du MNT constitue le modèle numérique de canopée (MNC) (Figure 27). Le MNC est utilisé depuis longtemps pour évaluer la hauteur des arbres et des végétations identifiables par des échos discrets au toit de la canopée. L'inconvénient de cette approche classique est qu'elle ne donne accès qu'au toit de la végétation basse. Celle-ci est uniquement caractérisée par un seul écho qui est situé le plus souvent près de son sommet. La végétation est trop basse pour que d'autres échos puissent se former à sa base comme elle peut le faire sous des arbres.

Pour contourner ce problème, l'approche par retour d'onde complet, en enregistrant le signal toutes les nanosecondes, permet d'accéder à la transformation du signal émis par son interaction avec la surface rencontrée. Ainsi, l'analyse des déformations de retours d'onde d'un seul écho peut permettre l'évaluation de la hauteur des végétations basses. Cette approche est particulièrement adaptée en contexte de plaine, où ces déformations ne peuvent pas être confondus avec des changements de pentes de la topographie (Mallet & Breta 2009). Ainsi, en terrain plat, l'évaluation de la hauteur des végétations basses peut se faire par la mesure de l'élargissement des retours d'onde de LiDAR à 1064 nm par une distribution de feuilles en couronnes à partir d'une implantation centrale au niveau du sol ou en rayons autour d'une tige. Le pic du retour d'onde peut ainsi apparaître dans la partie basse ou haute du signal dont l'évasement vers le bas va être caractéristique de la hauteur totale de la plante.

La méthode choisie est illustrée dans la figure 28 pour une phragmitaie en pleine croissance (flèche noire, Fig. 28-a) et une phragmitaie sèche (flèche rouge, Fig. 28-a) situées dans un creux topographique bien visible sur le MNT (Fig. 28-b). La figure 28-c permet dans un premier temps de constater que les intensités maximales des retours d'ondes cumulés par pixel de 1 m² tous les 5 cm dans la direction des tirs laser sont les plus faibles pour les arbres. Ces derniers sont par ailleurs bien identifiables à partir du MNC (Fig. 28-d). Ces faibles valeurs des intensités maximales des retours d'ondes s'expliquent par l'étalement de chaque impulsion laser sur une multitude de micro-retours à différents niveaux de la canopée des arbres. À l'inverse, le sol et les végétations basses retournent toute l'impulsion du LiDAR en une seule fois.

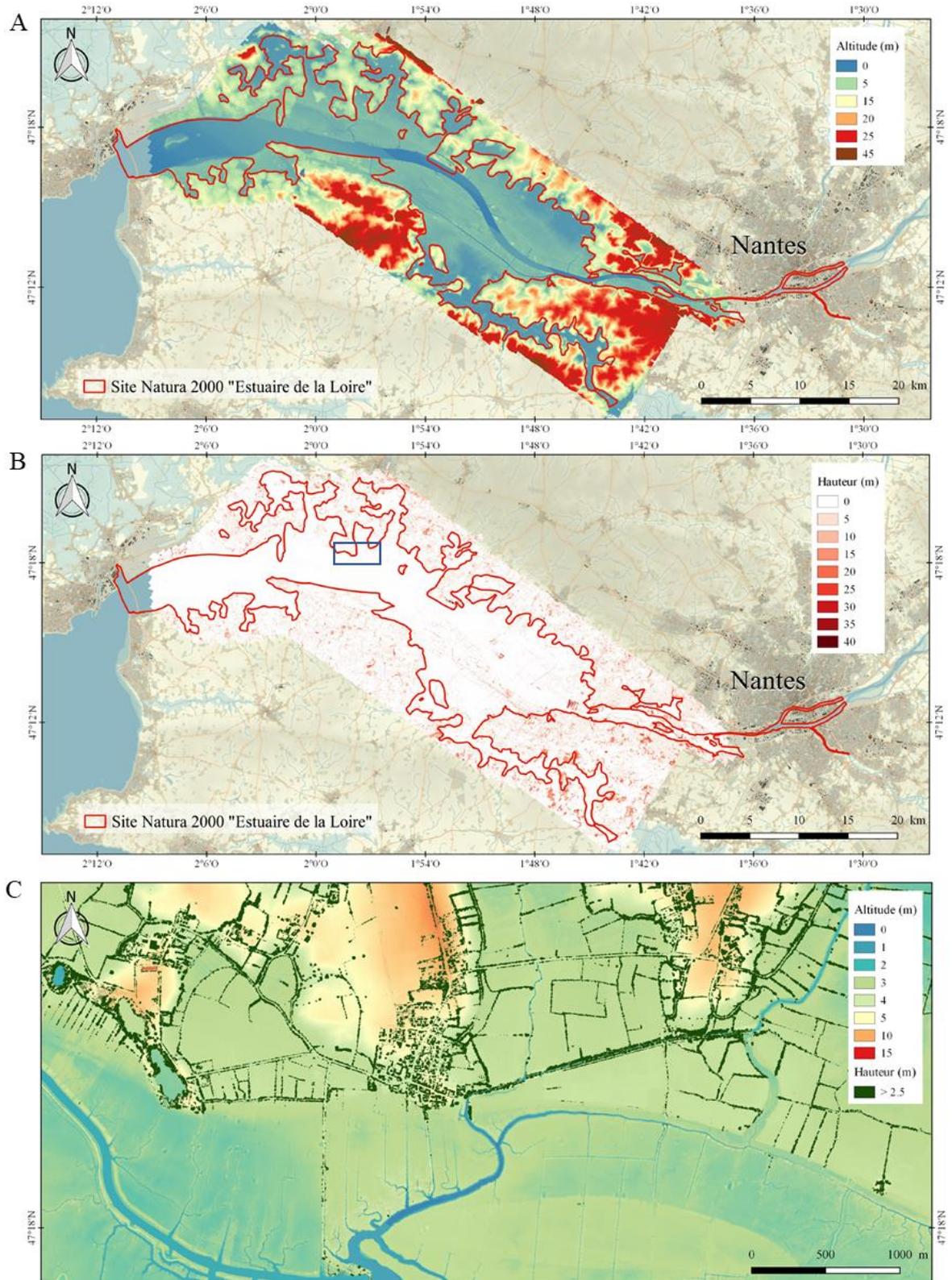


Figure 27. Représentation du MNT (A) et du MNC (B) à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude. Zoom sur le secteur de Lavau-sur-Loire (cadre bleu dans l'image B) avec la combinaison des informations du MNT et du MNC

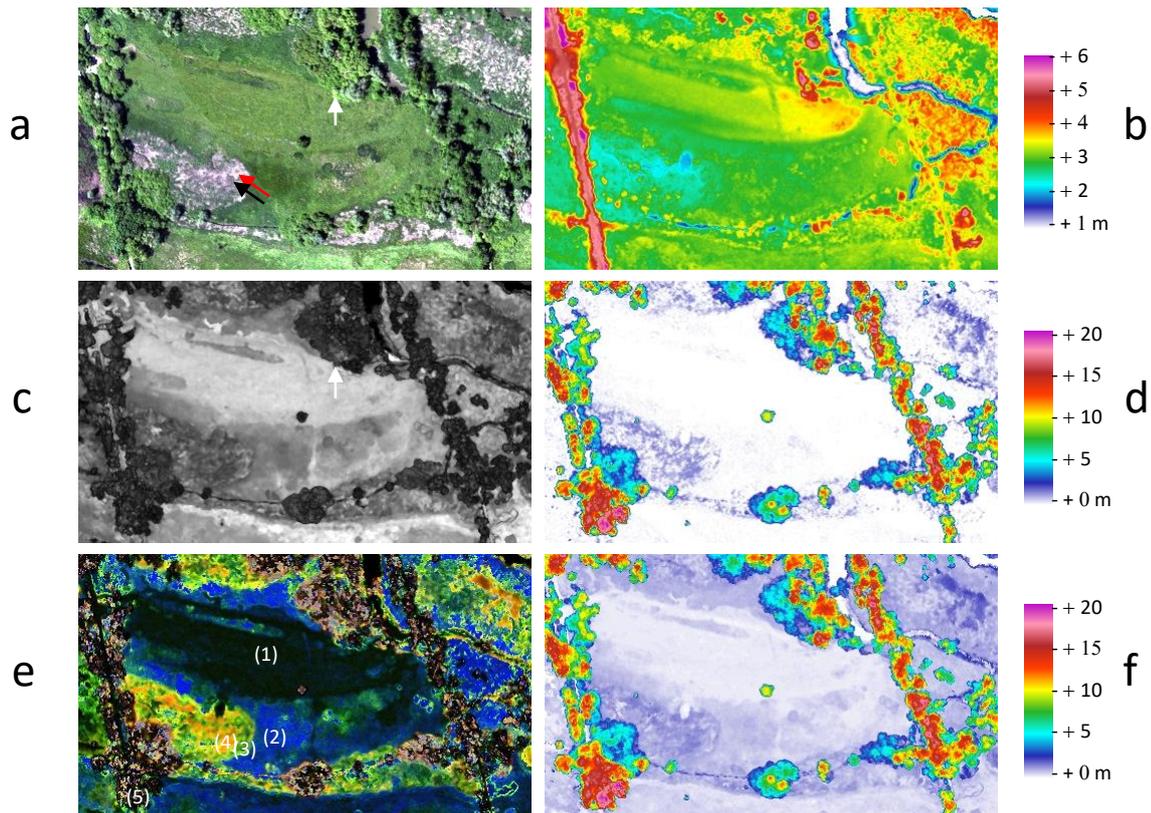


Figure 28. Hauteur de la végétation : a) image visible (r,v,b) ; b) MNT discret ; c) intensité relative maximum des retours d'onde LiDAR à 1 064 nm (intensité croissante du noir vers le blanc) ; d) MNC donnant la hauteur de la végétation mesurable par échos discrets ; e) retours d'onde normés et centrés sur le dernier écho visualisé par une composition colorée à -1,0 m dans le bleu, + 0,75m dans le vert et +1,15 m dans le rouge ; f) hauteur complète de la végétation par combinaison du MNC discret et des largeurs de retours d'onde LiDAR à 1 064 nm (image dénommé 'HVeg' par la suite)

Pour faciliter leur analyse, les courbes de retours d'onde LiDAR à 1 064 nm sont représentées à partir de l'écho le plus bas (Fig. 29, ci-dessous). Il peut s'agir du sol lorsque celui-ci a pu être atteint par le faisceau laser ou d'un niveau intermédiaire de la canopée traversée comme une branche ou un tronc d'arbre. Dans ce dernier cas, seule le MNC peut donner accès à sa hauteur. En revanche, cette analyse de forme des retours d'ondes est la seule donnant accès à l'étalement des retours d'ondes par une densité de feuillage dont les variations modèlent la forme de cette courbe de retour d'onde. Une composition colorée faite à partir des canaux à -1 m, +0,75 m et +1.15 m du dernier écho permet rapidement de visualiser en carte les variations de forme des retours d'onde (Fig. 28-e). Une sélection de profils de retours d'ondes numérotés de (1) à (5) est reportée sur le graphique de la figure 29 avec un pas de 5 cm par pixel de 1 m x 1 m : En (1) le sol à végétation rase présente une largeur de retour à un niveau de d'intensité relative de 100 choisi comme référence arbitraire. Sa demi-largeur (1,1 m) est donc équivalente à un niveau 0. Il est alors possible de considérer tous les accroissements au-dessus de ce seuil comme étant

le résultat d'un effet de dispersion du signal par une distribution de feuilles non détectable par écho discret.

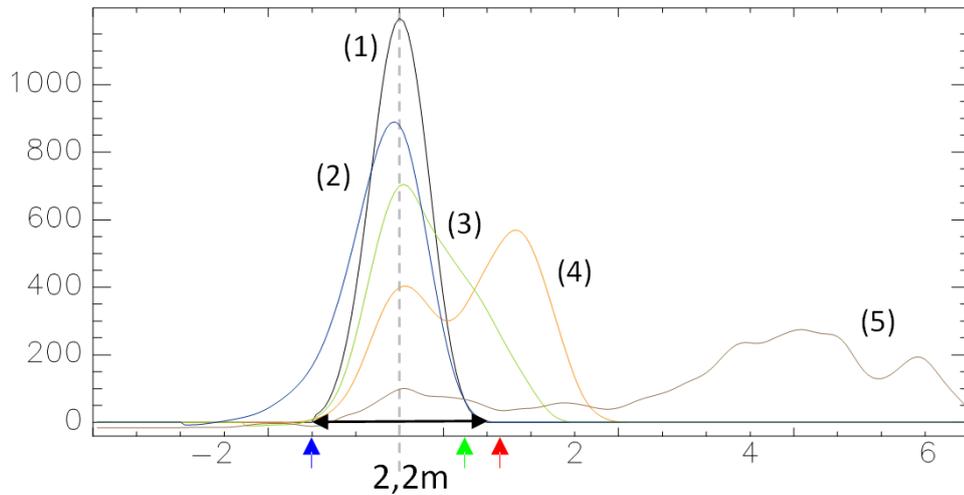


Figure 29. Retours d'onde LiDAR à 1 064 nm centrés à la hauteur du dernier écho et normés à leurs sommets montrant le retour d'un pixel à végétation rase en (1), d'une végétation à étalement des retours vers le bas en (2), d'un pixel de Phragmitaie avec étalement des retours vers le haut en (3), d'un pixel de Phragmitaie avec deux échos en (4) et d'un pixel arbre en (5)

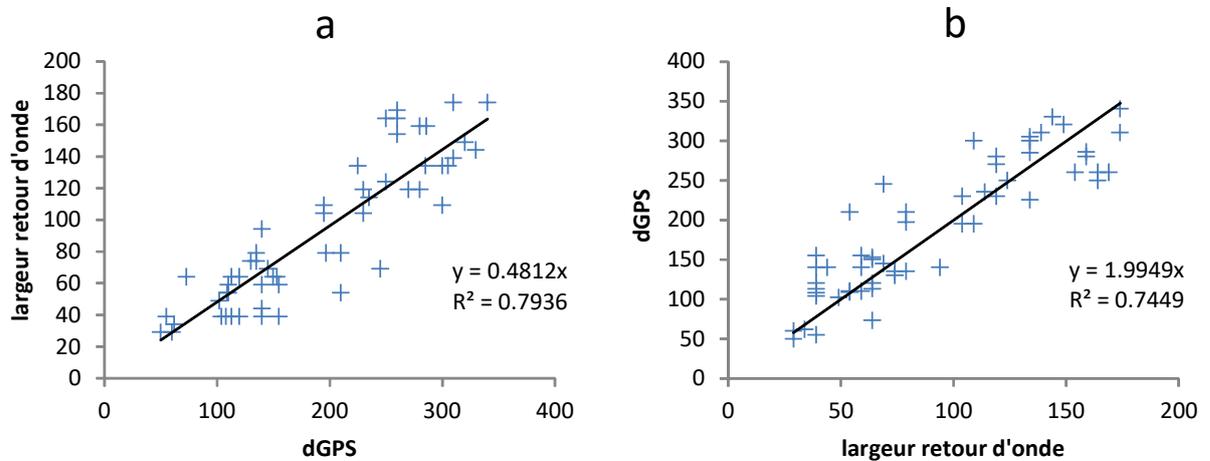


Figure 30. Corrélation entre les largeurs de retours d'ondes (moins 1,1 m) et les hauteurs de végétations (en cm) mesurées en chaque point de contrôle dGPS

Pour évaluer la pertinence de cette largeur de retour d'onde, une série de mesures de contrôle a été faite au sol à l'aide d'un mètre mesurant la hauteur maximale de différents types de végétations (Fig. 30). Le but n'était pas ici de retrouver très exactement la hauteur de la végétation mais de comparer les longueurs de tiges avec les hauteurs de dispersion du retour d'onde. La droite de corrélation nous donne une pente proche de 2 entre retours d'ondes et mesures au sol et 0,48 des mesures du sol vers celles des retours d'ondes. Les écarts peuvent

aller localement jusqu'à 1m ce qui est possible dans un volume de 1m³ échantillonné par la mesure de quelques tiges de plantes. Les ordres de grandeur étant ainsi comparables, le LiDAR a pu être utilisé pour décrire finement la structure de la végétation. La combinaison des largeurs des retours d'onde et du MNC a ainsi permis de produire l'image 'HVeg' qui caractérise précisément l'ensemble des différentes hauteurs de la végétation (Fig. 28-f).

2.2.2 Calculs de variables complémentaires dérivées des images optiques

2.2.2.1 Indices spectraux

Les indices spectraux en télédétection sont basés sur des combinaisons de bandes spectrales permettant de faire ressortir des caractéristiques biophysiques des surfaces terrestres. Les indices de végétation sont nombreux (plus de 100, Xue & Su 2017). Ils permettent notamment de caractériser la concentration de certains pigments (chlorophylles, caroténoïdes) ou la teneur en eau des couverts végétaux (Frampton et al. 2013). On peut les classer de différentes façons en fonction de ce que l'on souhaite mettre en évidence : Bannari et al. (1995) recense les divers systèmes de classification en deux ensembles fondés (i) soit sur le nombre de canaux (indices à 2 deux bandes –le rouge et le near-infrared (NIR)-, indices à 3 bandes ou plus –le rouge, le NIR, le bleu, le vert, le shortwave- infrared (SWIR)), (ii) les indices de type ratio et les indices de type orthogonal et (iii) les indices dits de première génération déterminés par des méthodes empiriques sans référence aux effets atmosphériques, à la brillance et à la couleur des sols, et les indices de seconde génération construits avec un raisonnement physique et avec recours à la simulation afin de souligner les interactions entre le rayonnement électromagnétique, l'atmosphère, la couverture végétale et les sols. Plus récemment, une classification plus précise en 6 classes a été proposée par Xue & Su (2017) synthétisant les approches binaires précédentes : les indices de végétation de base (Basic Vegetation indices), les indices tenant compte des effets atmosphériques (Vegetation indices considering atmospheric effects), l'indice de végétation ajusté au sol (Adjusted-soil vegetation index), l'indice modifié sur la partie verte de la végétation (Tasseled Cap transformation of greenness vegetation index), les indices de végétation des données drones (Vegetation indices based on UAS Remote sensing in the visible spectra region), les indices liés à l'état de la végétation (Vegetation indices related to vegetation status).

Pour cette étude, nous avons retenu un ensemble d'indices spectraux couramment utilisés pour la cartographie de la végétation (Adam et al. 2010; Roberts et al. 2011; Kaplan & Avdan 2017; Wakulinńska & Marcinkowska-Ochtyra 2020). Parmi ceux-ci, 12 ont été sélectionnés pour exploiter spécifiquement les propriétés spectrales apportées par les bandes Sentinel-2 (Tab. 23). Ils illustrent les divers aspects des systèmes de classification présentés précédemment : ainsi, par exemple, le 'NDVI' reste le plus utilisé des indices avec une réponse très sensible à la végétation verte à travers le ratio absorption pigmentaire dans le rouge et réflectance des cellules dans le proche infrarouge mais reste toutefois sensible aux effets de couleur du sol, de la brillance du sol et aux effets de l'atmosphère. Le 'GNDVI' à la différence du 'NDVI' établit le ratio entre le saut proche infrarouge et le vert des feuilles. Les effets du sol sont plus pris en compte dans le 'SAVI' ce qui améliore théoriquement le 'NDVI' tandis que L' 'EVI' prend plus en compte les effets de l'atmosphère et la dimension réflexion spéculaire dans le bleu. La courbure du red-edge est plus spécifiquement ciblée avec le 'MCARI'. Le 'NDWI' cible les feuilles avec le ratio proche infrarouge et SWIR sensible à l'eau dans les feuilles.

Tableau 23. Liste des indices de végétation calculés à partir des bandes spectrales Sentinel-2

Indices de végétation	Formules	Bandes Sentinel-2 utilisées	Bibliographie
NDVI	$(NIR - R) / (NIR + R)$	(B8 - B4) / (B8 + B4)	Rouse et al. 1973
NDWI	$(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$	(B8 - B11) / (B8 + B11)	Gao 1996
GNDVI	$(NIR - G) / (NIR + G)$	(B8 - B3) / (B8 + B3)	Gitelson et al. 1996
IReCI	$(NIR - R) / (RE1 / RE2)$	(B8 - B4) * (B5 / B6)	Frampton et al. 2013
PSSRa	NIR / R	B8 / B4	Blackburn 1998
NDI45	$(RE1 - R) / (RE1 + R)$	(B5 - B4) / (B5 + B4)	Delegido et al. 2011
EVI	$2.5 * (NIR - R) / ((NIR + 6 * R - 7.5 * B) + 1)$	$2.5 * (B8 - B4) / ((B8 + 6 * B4 - 7.5 * B2) + 1)$	Huete et al. 2002
SAVI	$((NIR - R) / (NIR + R + 0.428)) * (1 + 0.428)$	$(B8 - B4) / (B8 + B4 + 0.428) * (1.0 + 0.428)$	Huete 1988
MCARI	$[(RE1 - R) - 0.2 (RE1 - G)] * (RE1 - R)$	$((B5 - B4) - 0.2 * (B5 - B3)) * (B5 / B4)$	Daughtry et al. 2000
CRE	$(NIR / RE1) - 1.0)$	$((B8 / B5) - 1.0)$	Gitelson et al. 2006
S2REP	$705 + 35 * (((NIR + R) / 2) - RE1) / (RE2 - RE1))$	$705 + 35 * (((B8 + B4) / 2) - B5) / (B6 - B5))$	Frampton et al. 2013
MTCI	$(RE2 - RE1) / (RE1 - R)$	$(B6 - B5) / (B5 - B4)$	Dash and Curran 2004

B, G, R, RE1, RE2, NIR, SWIR1, représentent les bandes spectrales: bleue, verte, rouge, red-edge 1, red-edge 2, proche infrarouge and moyen infrarouge 1.

NDVI: Normalised Difference Vegetation Index

NDWI: Normalized Difference Water Index

GNDVI: Green Normalised Difference Vegetation Index

IReCI: Inverted Red-Edge Chlorophyll Index

PSSRa: Pigment Specific Simple Ratio

NDI45: Normalized difference index 4 and 5

EVI: Enhanced Vegetation Index

SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index

MCARI: Modified chlorophyll absorption in reflectance index

CRE: Chlorophyll Red-Edge index

S2REP: Sentinel-2 red-edge position

MTCI: MERIS Terrestrial Chlorophyll Index

Les images hyperspectrales offrent un choix beaucoup plus large de combinaisons de bandes spectrales, avec notamment de nombreux indices spécifiques nécessitant des bandes étroites (≤ 10 nm) (Roberts et al. 2011). Pour cette étude, 11 indices ont été calculés afin de mettre en évidence des courbures locales des spectres de réflectance (Fig. 31 et Tab. 24).

Pour distinguer rapidement les feuillages verts et les feuillages rouges ou pourpres, deux indices construits autour du pic de réflectance du vert de la végétation ont été adaptés de l'étude de

Launeau et al. 2017 : Le 'NDGLibis' détecte les feuilles vertes en mesurant le spectre de pente positive de 585 nm vers 553 nm, tandis que le 'NDRLI sol' révèle les feuilles rouges en ciblant les pentes positives de 553 nm vers 600 nm, ce qui permet également de mettre en évidence les sols. L'indice 'NDGI' permet d'évaluer la pente du plateau infrarouge de 773 nm à 921 nm. Celle-ci est systématiquement plus élevée avec les lichens, les mousses mais aussi avec la végétation sèche (Kassouk et al. 2010). L'indice 'ND ombre ciel bleu' mesure la remontée des spectres vers le bleu de 445 nm à 409 nm ce qui permet d'isoler les pixels à l'ombre qui ne sont éclairés qu'indirectement par la diffusion de la lumière solaire par le ciel bleu.

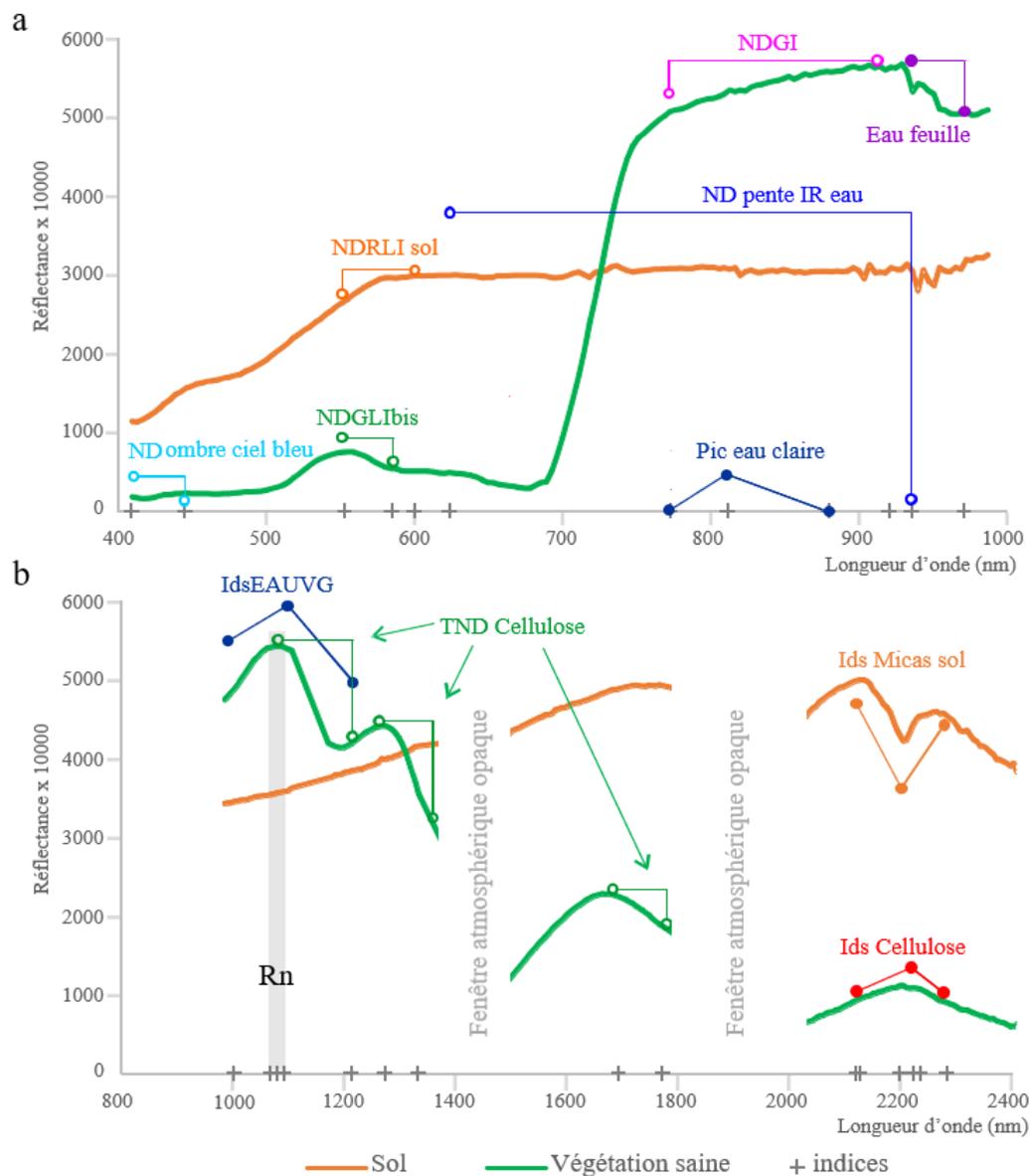


Figure 31. Positionnement des bandes spectrales utilisées pour le calcul des indices hyperspectraux. Ces indices permettent de mettre évidence des courbures locales des spectres de réflectance, illustrés ici par les signatures théoriques d'un sol et d'une végétation saine : a) VNIR ; b) SWIR

Les images à pleine résolution étant traitées séparément, il était important de développer une analyse des teneurs en eau avec l'image VNIR, indépendamment des indices SWIR comme le 'NDWI'. L'eau liquide libre présente toujours une pente positive de 936 nm (hors eau des feuilles) vers 624 nm ce qui a permis d'établir l'indice 'ND pente IR eau'. L'indice 'Eau feuilles' utilise un intervalle spectral plus serré en se basant sur la pente de 976 nm à 921 nm. Il est très sélectif avec la teneur en eau des feuilles lorsque les corrections atmosphériques ont bien éliminé les bandes spectrales de la vapeur d'eau. Dans ces conditions, il est même possible d'accéder à la fine couche d'eau claire à la surface des vasières et des végétations partiellement immergées grâce à l'indice 'Pic eau claire' qui est construit de part et d'autre d'un pic à 812 nm formé entre les bandes d'absorption ténues de l'eau claire à 740 nm et 880 nm (Launeau et al. 2018b).

L'image SWIR a été traitée indépendamment en raison de sa résolution spectrale et spatiale plus grossière, mais aussi en raison de variations d'intensité entre lignes de vol de sens opposés comme cela a déjà été discuté avec la normalisation aux bandes du bleu dans le visible. Cette irrégularité est ici plus prononcée en raison d'un défaut de régularité des niveaux d'intensité constatée à l'issue de la campagne d'acquisition. La normalisation au proche infrarouge sur une moyenne de 5 premières bandes hors bruit de 1 069 nm à 1 093 nm (Fig. 31-b) est donc systématique et notée 'Rn' sur quatre indices ayant montré une moins grande sensibilité à la défaillance de la caméra. Ainsi l'indice de l'eau de la végétation 'IdsEauVG' présente un pic caractéristique à 1 082 nm entre les bandes d'absorption de l'eau vers 1 003 nm et vers 1 214

Tableau 24. Liste des indices calculés à partir des bandes spectrales VNIR et SWIR

Nom de l'indice	Formules	Bibliographie
NDGLIbis	$(R553 - R585) / (R555 + R585)$	modifié à partir de Launeau et al. 2017
NDRLI sol	$(R600 - R553) / (R600 + R553)$	Kassouk et al. 2010
NDGI	$(R921 - R773) / (R921 + R773)$	Kassouk et al. 2010
ND ombre ciel bleu	$(R409 - R445) / (R409 + R445)$	modifié à partir de Launeau et al. 2017
ND pente IR eau	$(R624 - R936) / (R624 + R936)$	modifié à partir de Launeau et al. 2018
Pic eau claire	$(2 \times R812) / (R740 + R880) - 1$	modifié à partir de Launeau et al. 2018
Eau feuilles	$(R921 - R976) / (R921 + R976)$	Launeau et al. 2018
IdsEauVG	$(- R1003 + 2 \times R1082 - R1214) / Rn$	communication personnelle
Ids Cellulose	$(- R2122 + 2 \times R2224 - R2284) / Rn$	communication personnelle
TND Cellulose	$(R1082 - R1214 + R1274 - R1334 + R1695 - R1773) / Rn$	communication personnelle
Ids Micas sol	$(- R2127 + 2 \times R2200 - R2236) / Rn$	communication personnelle

avec $Rn = (R1069 + R1075 + R1081 + R1087 + R1093) / 5$

NDGLIbis (Normalized Difference Green Leaf Index)

NDRLI sol (Normalized Difference Red Leaf Index)

NDGI (Normalized Difference Grass Index)

ND ombre ciel bleu

ND pente IR eau

Pic eau claire (Indice à 3 bandes pic eau claire)

Eau feuilles

IdsEauVG (Indice à 3 bandes eau de la végétation)

Ids Cellulose (Indice à 3 bandes cellulose)

TND Cellulose (Triple Normalized Difference (2 bandes) de Cellulose)

Ids Micas sol (Indice à 3 bandes de micas ou liaison Al-OH)

nm, tandis que l'eau libre se caractérise par un spectre plat. Un pic se forme également à 2 224 nm pour la cellulose avec une chute de la réflectance à 2 122 nm et 2 284 nm en dehors des bandes d'absorption complètes de l'atmosphère masquant une partie de la signature en forme de 'M', caractéristique de la cellulose étudiée en éclairage halogène. Au lieu de rechercher uniquement ce pic, il est aussi possible de cumuler trois sauts brutaux spectraux caractéristiques de la cellulose. L'indice 'TND Cellulose' combine trois différences normalisées au pic de la végétation du proche infrarouge moyen 'Rn'. La somme normée à 'Rn' des sauts de 1 214 nm vers 1 082 nm, 1 334 nm vers 1 274 nm et de 1 773 nm vers 1 695 nm forme une série de marches très caractéristiques d'une cellulose bien formée et gorgée d'eau (Fig. 31-b). Finalement, un dernier indice nommé 'Ids Micas sol', centré sur la bande d'absorption Al-OH à 2 200 nm avec des épaules à 2 127 nm et 2 236 nm, permet de sélectionner les pixels riches en argiles et micas.

2.2.2.2 Calcul de statistiques sur les images hyperspectrales

Des statistiques descriptives ont été calculées sur les images hyperspectrales. Elles comprennent les moyennes, les minimums, les maximums et les écarts types pour l'image VNIR, l'image SWIR et l'image simulée S2-S (Tab. 25). L'intégration de ces variables comme entrées supplémentaires dans le processus de classification a montré son intérêt dans plusieurs études (Colditz 2015; Moran et al. 2017; Prošek et al. 2020).

Tableau 25. Liste des 12 variables calculées à partir des statistiques (moyenne, minimum, maximum et écart type) des images VNIR, SWIR et S2-S

Statistiques	Image VNIR	Image SWIR	Image S2-S
Moyenne	<i>VNIR_moy</i>	<i>SWIR_moy</i>	<i>S2A_moy</i>
Minimum	<i>VNIR_min</i>	<i>SWIR_min</i>	<i>S2A_min</i>
Maximum	<i>VNIR_max</i>	<i>SWIR_max</i>	<i>S2A_max</i>
Ecart type	<i>VNIR_ect</i>	<i>SWIR_ect</i>	<i>S2A_ect</i>

2.2.3 Sélection des données d'apprentissage

2.2.3.1 Images satellites Sentinel-2

Nous avons vectorisé une image Sentinel-2 pour construire une grille vecteur constituée de polygones de 100m² (10x10m) utilisée comme support pour la sélection des zones d'apprentissage (ou régions d'intérêt - ROIs). Cette grille a été superposée à une image en très

haute résolution spatiale acquise au printemps 2018 (Google Earth : Images CNES© / Airbus, Maxar Technologies©). Sur la base des localisations des relevés phytosociologiques, nous avons sélectionné individuellement et manuellement les polygones couvrant des unités de végétations visuellement homogènes (pixels ‘purs’) (Fig. 32). Les ROIs devaient répondre à un critère d’homogénéité physiologique et colorimétrique afin de s’assurer de ne pas sélectionner d’habitats en mélange (mosaïque) ou de parcelles chevauchants plusieurs unités typologiques.

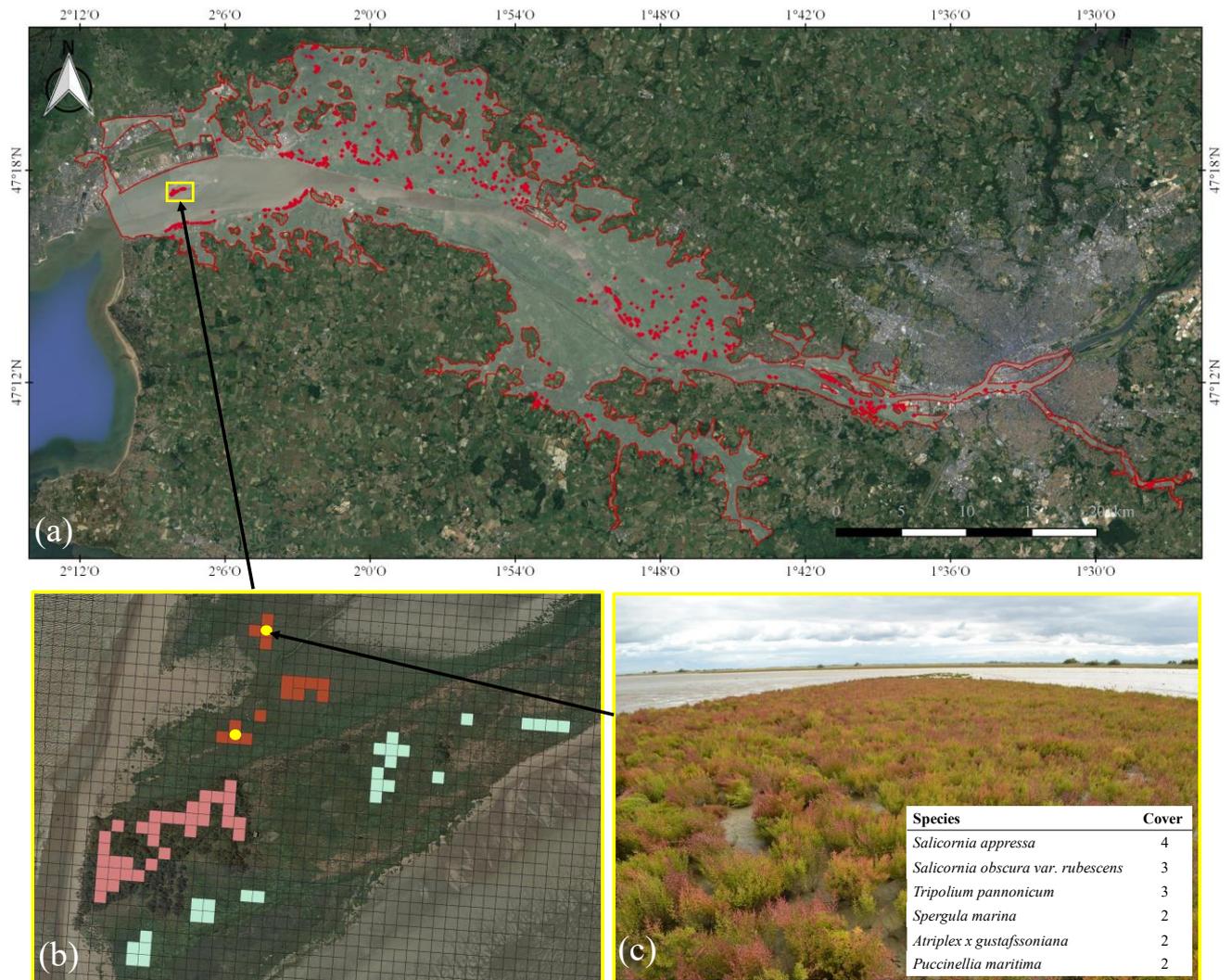


Figure 32. Procédure méthodologique pour la sélection des ROIs. (a) Image en très haute résolution spatiale du site d'étude (les polygones rouges indiquent les localisations des ROIs). (b) Zoom sur une partie du site d'étude avec l'affichage de la grille vecteur et les polygones sélectionnés pour 3 habitats EUNIS différents (pourpre : EUNIS A2.551 ; rose : EUNIS F9.3131 ; bleu ciel : EUNIS A2.511). Les points jaunes correspondent aux localisations des relevés phytosociologiques. (c) Relevé phytosociologique et photographie de l'habitat EUNIS A2.551 acquis lors de la campagne de terrain

Pour cette étape, les relevés de végétation anciens (> 10 ans) ont été exclus afin d'éviter des décalages entre les données de terrains et les données satellitaires. En complément, nous nous sommes basés sur une étude de la dynamique spatio-temporelle des végétations de l'estuaire de

la Loire (Le Dez et al. 2017b) pour déterminer le niveau de stabilité des communautés végétales du site d'étude. Pour les communautés végétales présentant une grande stabilité (ex : bois et forêts, certains types de prairies), nous avons sélectionné des ROIs sur la base de relevés jusqu'à dix ans d'ancienneté. A l'inverse, pour les communautés végétales présentant une dynamique très importante, seuls les relevés réalisés durant l'année d'acquisition des images satellites ont été retenus (par exemple, les végétations annuelles des prés salés (A2.5513 'Marais salés pionniers à *Salicornia spp.*') ou les roselières des berges régulièrement submergées (C3.27 'Formations halophiles à *Scirpus*, *Bolboschoenus* et *Schoenoplectus*'). De plus, lors de la phase de sélection des pixels par photo-interprétation, nous avons contrôlé la bonne cohérence entre les pixels visualisés et les catégories d'habitats identifiés dans la typologie afin de ne pas sélectionner de ROIs sur des secteurs où la végétation aurait pu évoluer. Pour finir, des pixels supplémentaires ont été sélectionnés pour certaines catégories d'habitats facilement reconnaissables par photo-interprétation et pour lesquels nous avons peu de données de terrain (par exemple, C3.21 'Phragmitaies à *Phragmites australis*' ou G1.1111 'Saulaies à Saule blanc ouest-européennes'). Nous avons veillé à sélectionner un nombre de données d'apprentissages proportionnellement à la superficie couverte par chaque habitat sur le site d'étude (Colditz 2015; Raab et al. 2018).

2.2.3.2 Images aéroportées hyperspectrales et LIDAR

De la même manière que pour les images satellites, nous avons utilisé les localisations des données de terrain pour sélectionner un pool de données d'apprentissage le plus exhaustive possible sur la base de la typologie complète des habitats du site. Les ROIs ont été délimités manuellement sous SIG à partir de polygones regroupant des pixels au niveau de zones visuellement homogènes sur l'image hyperspectrale (Fig. 33).



Figure 33. Illustration de la méthode utilisée pour la sélection des ROIs pour la classification des images aéroportées hyperspectrales et LiDAR.

Compte tenu de la variabilité physiologique de certaines unités de végétation, il a été nécessaire de reconsidérer la typologie pour prendre en compte certains faciès de la végétation. C'est par exemple le cas des communautés végétales à *Phragmites australis* (*Astero tripolii* – *Phragmitetum communis* ; *Phragmitetum communis* ; Phragmitaie oligohaline) pour lesquelles un faciès 'phragmitaie sèche' a été ajouté. Cette subdivision a permis d'intégrer les variations physiologiques constatées sur les images entre les phragmitaies en pleine croissance (au feuillage vert) et celles encore sèches de l'année précédente (feuillage blanchâtre) (Fig. 34).

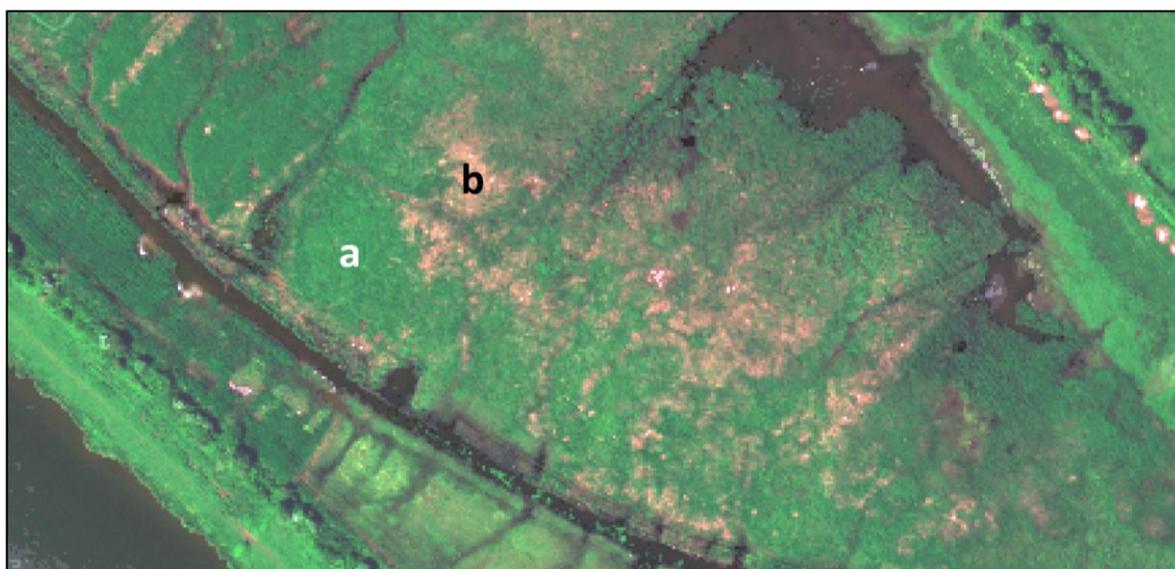


Figure 34. Exemple de variations physiologiques visibles sur l'image hyperspectrale au sein d'une phragmitaie. a) Zone de *Phragmites australis* en pleine croissance (feuillage vert) ; b) Zone de *Phragmites australis* composée des cannes sèches de l'année précédente.

A l'inverse, certaines associations végétales ont été rassemblées pour n'être sélectionnées qu'au niveau de l'alliance. C'est par exemple le cas du *Cirsio dissecti* – *Scorzoneretum humilis* et du *Caro verticillati* – *Juncetum acutiflori* considérées comme physionomiquement et floristiquement proches sur le site. Ce choix méthodologique a notamment été réalisé afin d'intégrer davantage de pixels pour une même unité (échelle de l'alliance) au lieu de conserver plusieurs unités avec peu de données d'apprentissage (échelle de l'association végétale). C'est également le cas de certains habitats de fourrés et forêts qui sont co-dominés dans des proportions variables par plusieurs espèces couvrant individuellement une surface supérieure à 1m². C'est par exemple le cas de l'habitat G1.A1 'Boisements sur sols eutrophes et mésotrophes à *Quercus*, *Fraxinus* et *Carpinus betulus*' qui est composé d'un assemblage de plusieurs espèces arborées, ou de l'habitat F3.1112 'Fourrés à Prunellier et Ronces atlantiques' dominé par *Rubus spp.* et *Prunus spinosa*. De ce fait, afin de sélectionner uniquement des ROIs homogènes, nous avons fait le choix de subdiviser ces unités en sélectionnant des zones couvrant chaque espèce individuellement.

2.2.4 Méthodes de classification des images

2.2.4.1 Choix de l'algorithme de classification

Les classifications des images satellites et aéroportées ont été réalisées à partir de l'algorithme Random Forest (RF) (Breiman 2001). RF est un classifieur couramment utilisé en télédétection et de nombreuses études ont démontré sa capacité à produire des cartographies précises des types de végétation et d'habitats (Rodriguez-Galiano et al. 2012; Belgiu & Dra 2016; Maxwell et al. 2018). RF est notamment apprécié pour sa rapidité (nécessitant peu d'efforts de calcul) et sa capacité à traiter des ensembles de données très asymétriques avec un grand nombre de variables prédictives (Millard & Richardson 2015; Sławik et al. 2019). Dans le modèle RF, les données d'entraînement originales sont échantillonnées de manière aléatoire avec remplacement, ce qui génère des échantillons 'bootstrap'. Chaque arbre de décision RF est entraîné sur un échantillon 'in bag' des données d'entraînement originales. L'échantillon restant (échantillon 'out of bag') est utilisé pour être prédit par tous les arbres de décision, ce qui permet d'évaluer le résultat final (connu sous le nom de score OOB). Pour nos analyses, nous avons fixé le nombre d'arbres à une valeur de 2000 et le nombre de variables échantillonnées au hasard comme candidates à chaque fractionnement à une valeur de 6.

L'indice de précision globale (OA) et le coefficient Kappa ont été utilisés pour évaluer la qualité générale des modèles de classification (Stehman 1997; Smits et al. 1999). Des matrices de confusion représentant les erreurs selon les classes ont été produites à l'issue de chaque modélisation et la précision du producteur (PA)¹⁵ ainsi que la précision de l'utilisateur (UA)¹⁶ ont été calculées pour chaque habitat (Congalton 1991). Ces mesures d'évaluation de la précision sont couramment utilisées en télédétection (Belgiu & Csillik 2018; Calleja et al. 2019; Rana & Venkata Suryanarayana 2020). A l'issue de chaque traitement d'image, le modèle produit à partir des zones d'apprentissage a été appliqué à l'ensemble de l'image pour produire une classification prédictive des habitats sur l'ensemble du site. Pour cette étape, un périmètre élargi par rapport aux limites actuelles du site Natura 2000 a été utilisé (24 000 ha). Il correspond à une proposition de révision de la ZSC suggérée par le Département, devant répondre à une meilleure cohérence dans l'intégration de certaines zones de marais.

2.2.4.2 Classification des données satellites Sentinel-2

Pour la classification des données satellites Sentinel-2, nous avons empilés les 12 indices de végétation (Tab 23) avec les 10 bandes spectrales pour obtenir une image à 22 variables pour chaque date. Ensuite, nous avons cherché à identifier les variables les plus importantes (dates d'acquisition, bandes spectrales et indices de végétation) pour la classification des habitats du site Natura 2000. Des méthodes automatisées pour la sélection des meilleures variables tel que le propose par exemple l'algorithme Recursive Feature Elimination (Kuhn 2012) peuvent être utilisées pour cette étape (Radecka et al. 2019; Rapinel et al. 2019). Cependant, nous avons fait le choix de développer notre propre méthodologie supervisée en priorisant dans un premier temps la sélection des dates d'acquisition des images. L'objectif général était d'intégrer les variations phénologiques saisonnières pour l'ensemble des habitats du site d'étude. Ainsi, les images devaient inclure les changements de la végétation depuis le développement des communautés végétales les plus précoces jusqu'à celles apparaissant les plus tardivement (principalement du début du printemps jusqu'à l'automne sur le site d'étude).

¹⁵ PA (de l'anglais producer's accuracy) : calculée pour chaque unité élémentaire et habitat en divisant le nombre de pixels correctement classés par le nombre total de pixels de référence (en ligne dans la matrice de confusion)

¹⁶ UA (de l'anglais user's accuracy) : calculée pour chaque unité élémentaire et habitat en divisant le nombre de pixels correctement classés par le nombre total de pixels attribués selon le résultat de la classification (en colonne dans la matrice de confusion)

Dans un premier temps, nous avons réalisé une classification RF pour chacune des 11 dates et nous avons évalué la qualité générale des modèles de classification à partir de l'OA. Afin de ne sélectionner que les dates d'acquisition des images les plus performantes, nous avons fixé un seuil de précision à 80% (OA=0.8) au-dessus duquel le résultat de la classification était jugé satisfaisant, comme le suggéraient [Rapinel et al. \(2014\)](#) et [Zlinszky et al. \(2014\)](#). Toutes les images dépassant ce seuil (OA>0.8) ont été retenues, tandis que celles inférieures (OA<0.8) ont été exclues car jugées peu performantes pour la classification.

Dans un second temps, nous avons évalué l'importance des variables spectrales (bandes spectrales et indices de végétation) en utilisant les mesures de la diminution moyenne de Gini (MDG) obtenus à l'issue des classifications RF. Pour chaque date retenue (OA>0.8), les cinq variables les plus performantes (bandes spectrales ou indices de végétation) ont été sélectionnées sur la base du MDG ([Grabska et al. 2019](#)). Pour finir, nous avons compilé l'ensemble de ces variables (5 bandes et/ou indices les plus performants des dates avec un OA>0.8) afin de construire un ensemble de données multi-date.

2.2.4.3 Classification des données aéroportées hyperspectrales et LIDAR

La contribution des données aéroportées hyperspectrales et LiDAR pour la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire a été évaluée à partir de trois ensembles de données dénommés Test 1, Test 2 et Test 3 (Tab. 26) :

- Test 1 : correspond à une image composée des 10 bandes spectrales de l'image Sentinel-2 simulée (S2-S) et des 12 indices de végétation du [tableau 23](#), calculés à partir des bandes de l'image S2-S ; Ce test intègre les mêmes variables que pour l'analyse d'une image satellite Sentinel-2 (les 10 bandes spectrales et les 12 indices de végétation) mais à la résolution spatiale d'1 mètre. Il a été conçu afin de comparer l'apport de la très haute résolution spatiale (THRS) par rapport à la résolution de 10 mètres des images satellites.
- Test 2 : est constitué par l'image précédente (Test 1) à laquelle ont été ajoutés les 11 indices à bandes étroites du [tableau 24](#) et les 12 statistiques descriptives du [tableau 25](#). Ce test a été réalisé afin d'évaluer l'apport de données hyperspectrales sur la classification grâce à l'intégration de ces 23 nouvelles variables spécifiquement calculées à partir des données des capteurs VNIR et SWIR.
- Test 3 : rassemble les variables des images Test 1 et Test 2 auxquelles ont été ajoutés le modèle numérique de terrain (MNT) et la hauteur de la végétation (HVeg). Ce dernier test a été élaboré pour évaluer la contribution des données LiDAR pour la cartographie des habitats.

Tableau 26. Combinaisons de variables utilisées pour les 3 classifications des données aéroportées (Test 1, Test 2 et Test 3)

Variables	Test 1	Test 2	Test 3
B2*	x	x	x
B3*	x	x	x
B4*	x	x	x
B5*	x	x	x
B6*	x	x	x
B7*	x	x	x
B8*	x	x	x
B8A*	x	x	x
B11*	x	x	x
B12*	x	x	x
MDWI*	x	x	x
MTCI*	x	x	x
EVI*	x	x	x
GNDVI*	x	x	x
IReCI*	x	x	x
PSSRa*	x	x	x
NDI45*	x	x	x
SAVI*	x	x	x
MCARI*	x	x	x
CRE*	x	x	x
S2REP*	x	x	x
NDVI*	x	x	x
NDGLIbis		x	x
NDRLI sol		x	x
NDGI		x	x
ND ombre ciel bleu		x	x
ND pente IR eau		x	x
Pic eau claire		x	x
Eau feuilles		x	x
IdsEauVG		x	x
Ids Cellulose		x	x
TND Cellulose		x	x
Ids Micas sol		x	x
VNIR_moy		x	x
VNIR_min		x	x
VNIR_max		x	x
VNIR_ect		x	x
SWIR_moy		x	x
SWIR_min		x	x
SWIR_max		x	x
SWIR_ect		x	x
S2A_moy		x	x
S2A_min		x	x
S2A_max		x	x
S2A_ect		x	x
MNT			x
Hveg			x

* Variables issues de l'image Sentinel-2 simulée (S2-S)

2.2.4.4 Logiciels

Les analyses ont été réalisées avec le logiciel R (version 3.6.2) (R Development Core Team 2019), en utilisant les packages ‘randomForest’ (version 4.6-14) (Liaw & Wiener 2002), ‘rgdal’ (version 1.4-8) (Bivand et al. 2015) et ‘raster’ (version 3.0-7) (Hijmans 2015). Les résultats ont été visualisés dans QGIS 3.4.8 (QGIS Development Team 2019).

2.3 Résultats

2.3.1 Typologies retenues pour les classifications après sélection des données d’apprentissage

Les unités élémentaires pour lesquelles des ROIs ont pu être sélectionnés pour les classifications des images satellites et des images aéroportées sont présentées dans le [tableau 27](#).

2.3.1.1 Images satellites Sentinel-2

Pour la classification des images satellites Sentinel-2, seules 44 unités élémentaires sur les 145 identifiées initialement ont pu être sélectionnées comme ROIs. Dans le détail, les unités retenues correspondent à :

- 9 unités sur les 32 caractérisant les ‘habitats littoraux’ ;
- 2 unités sur les 22 caractérisant les ‘habitats aquatiques’ ;
- 14 unités sur les 30 caractérisant les ‘habitats prairiaux’ ;
- 1 unité sur les 8 caractérisant les ‘habitats d’ourlets et mégaphorbiaies’ ;
- 6 unités sur les 24 caractérisant les ‘habitats de roselières’ ;
- 10 unités sur 15 caractérisant les ‘habitats des fourrés et forêts’ ;
- 1 unité sur les 5 caractérisant les ‘habitats agricoles et anthropiques’ ;
- 1 catégorie englobant les 9 unités des ‘habitats rudéraux et friches nitrophiles’ qui ont été regroupées pour maximiser le nombre de données d’apprentissage pour ces végétations.

Ce résultat correspond à 39 habitats EUNIS sur les 89 identifiés, 13 habitats des ‘Cahiers d’habitats’ sur 29 et 9 habitats EUR28 sur les 17 identifiés sur le site Natura 2000. Le nombre de pixels d’apprentissage par unités typologiques varie de 15 (Fonds vaseux des plans d’eau

asséchés) à 777 (*Alopecurion utriculati*). Au total, 5 564 pixels ont été sélectionnés pour l'ensemble des données d'apprentissage pour la classification des images Sentinel-2, représentant 55,6 ha, soit 0.2 % de la surface totale de la zone d'étude.

2.3.1.2 Images aéroportées hyperspectrales et LiDAR

Pour la classification des images aéroportées, 116 unités élémentaires sur les 145 identifiées dans la typologie initiale ont pu faire l'objet d'une sélection de ROIs. Dans le détail, les unités retenues correspondent à :

- 25 unités sur les 32 caractérisant les 'habitats littoraux' ;
- 11 unités sur les 22 caractérisant les 'habitats aquatiques' ;
- 26 unités sur les 30 caractérisant les 'habitats prairiaux' ;
- 3 unités sur les 8 caractérisant les 'habitats d'ourlets et mégaphorbiaies' ;
- 3 unités sur les 24 caractérisant les 'habitats de roselières' ;
- La totalité des unités (9 unités) caractérisant les 'habitats rudéraux et friches nitrophiles' ;
- La totalité des unités (15 unités) caractérisant les 'habitats des fourrés et forêts' ;
- La totalité des unités (9 unités) caractérisant les 'habitats agricoles et anthropiques'.

Afin de tenir compte de certaines variations physiologiques de la végétation visibles sur les images, 11 unités élémentaires de la typologie initiale ont été subdivisées en faciès (de 2 à 4 subdivisions selon les unités concernées). Par exemple, nous avons distingué les phragmitaies en pleine croissance (au feuillage vert) de celles encore sèches de l'année précédente (feuillage blanchâtre) (cf. partie 2.2.3.2). Ces variations physiologiques se traduisent par des réponses spectrales différentes qui, grâce à la haute résolution spectrale, sont visibles statistiquement à partir de leurs spectres de réflectance (Fig. 35). Ainsi, les zones de *Phragmites australis* en croissance présentent un pic de réflectance dans le vert, une courbure du red-edge bien marquée, un plateau infrarouge élevé et une bande d'absorption à 970 nm. A l'inverse, la 'phragmitaie sèche' montre une réflectance plus forte dans la partie visible du spectre et un plateau infrarouge moins élevé ce qui permet de la distinguer très clairement de la phragmitaie en croissance.

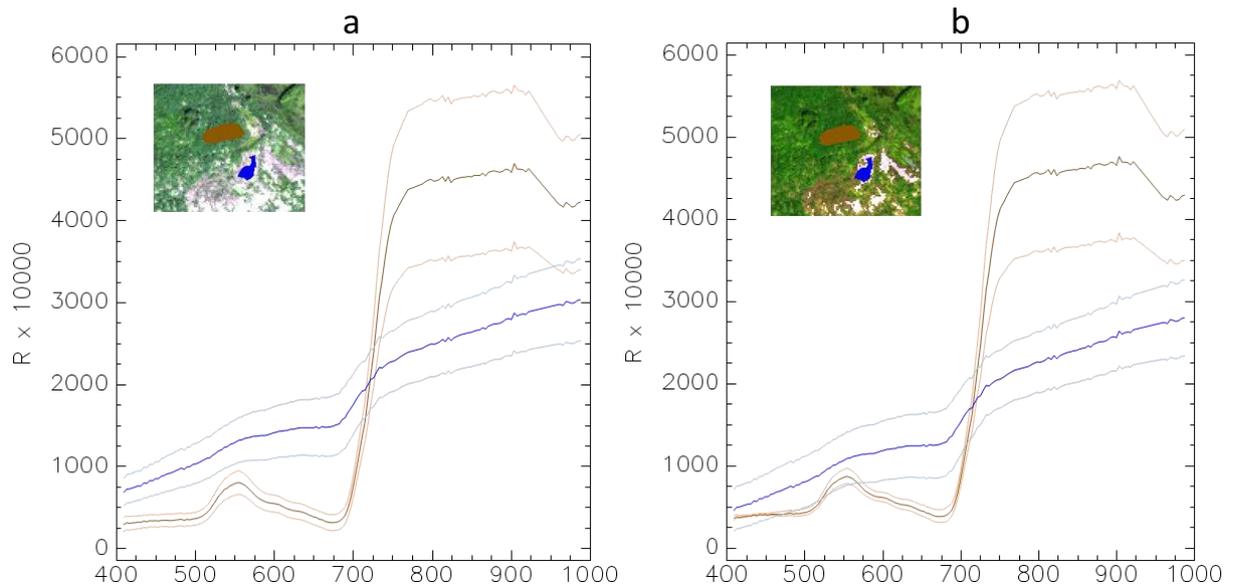


Figure 35. Spectres de réflectance moyens (courbes foncées) encadrés par les écart-types (courbes claires) pour les zones de *Phragmites australis* en pleine croissance (courbes marrons - 18 ROI et 2 774 pixels) et les 'phragmitaies sèches' (courbes bleues 15 ROI et 1 387 pixels). Diagramme a : spectres en réflectance brute. Diagramme b : spectres après normalisation du bleu de la végétation. Seul un ROI par classe est visible sur l'image en cartouche

Au total, la typologie retenue pour la classification des images aéroportées comporte 127 unités élémentaires. Le nombre de ROIs sélectionnés par unités typologiques varie de 4 pixels (*Juncetum gerardii*) à 22 667 pixels (*Trifolium maritimi* – *Oenanthe silaifoliae*). 181 448 pixels d'apprentissage ont été sélectionnés pour l'ensemble des données, représentant 18,1 ha, soit 0,08 % de la surface totale de la zone d'étude couverte par le survol. A l'échelle des habitats, cette typologie permet d'intégrer 74 habitats EUNIS sur les 89 habitats de la typologie initiale, 23 habitats des 'Cahiers d'habitats' sur 29 et 13 habitats EUR28 sur les 17 identifiés sur le site Natura 2000.

Tableau 27. Typologie détaillée des habitats utilisée pour la classification des images satellites et aéroportées. ‘Nb pixels’ correspond au nombre de pixels sélectionnés comme ROIs pour la classification des images. Les unités élémentaires avec un retrait indiquent les unités qui ont été ajoutées : 1) soit pour subdiviser certaines unités (pour tenir compte d'un faciès) ; 2) soit pour rassembler certaines unités (considérées comme physionomiquement et floristiquement proches). Les ROIs entre crochets ‘[]’ correspondent à plusieurs habitats. Le symbole ‘?’ indique les habitats à logique mixte pour lesquels des données complémentaires à la végétation sont nécessaires pour différencier les habitats (utilisation de critères abiotiques)

Unités élémentaires (syntaxons ou composantes abiotiques)	Nb pixels		Habitats EUNIS	Habitats des Cahiers d'habitats	Habitats EUR28
	Images satellites	Images aéroportées			
Habitats littoraux					
Rivage sablonneux comprenant des sables propres (à grains grossiers, moyens ou fins) et des sables vaseux	47	2308	A2.2 - Sable et sable vaseux intertidaux	1130-1 "slikke en mer à marée"	1130 "Estuaires"
Débris coquilliers		26			
Rivages boueux de sédiments à fines particules, principalement dans la fraction limon et argile	195	8006	A2.3 - Vase intertidale		
Plans d'eau caractérisés par des apports périodiques d'eau de mer et par le passage par une phase d'hypersalinisation (fonctionnement lagunaire). Végétations potentiellement associées: <i>Ranunculetum baudotii</i> Hocquette 1927; <i>Parvopotamo – Zannichellietum pedicellatae</i> Soó (1934) 1947 ; <i>Zannichellietum obtusifoliae</i> Brullo & Spampinato 1990; <i>Ruppium maritima</i> Hocquette 1927; <i>Potamogeton pectinatus</i> Carstensen ex Hilbig 1971			X03 - Lagunes littorales saumâtres	1150-1 "Lagunes en mer à marées (façade atlantique)"	1150 "Lagunes côtières"
<i>Astero tripolii – Suaedetum maritima subsp. maritima</i> Géhu & Géhu-Franck 1984		240	A2.5512 Marais salés pionniers à <i>Suaeda maritima</i>	1310-1 "Salicorniaies des bas niveaux (haute slikke atlantique)"	1310 "Végétations pionnières à <i>Salicornia</i> et autres espèces annuelles des zones boueuses et sableuses"
<i>Astero tripolii – Suaedetum maritima subsp. maritima</i> Géhu & Géhu-Franck 1984 (faciès à <i>Tripolium pannonicum</i>)		217			
<i>Salicornion europaeo – ramosissimae</i> Géhu & Géhu-Franck ex Rivas-Martínez 1990	92	585	A2.5513 Marais salés pionniers à <i>Salicornia</i> spp.	1310-2 "Salicorniaies des hauts niveaux (schorre atlantique)"	
<i>Parapholido strigosae – Hordeetum marini</i> (Géhu et al. 1975) Géhu & de Foucault 1978	66	2859	A2.552 - Communautés halo-nitrophiles pionnières du littoral méditerranéen	1310-4 "Pelouses rases à petites annuelles subhalophiles"	
<i>Puccinellietum maritima</i> Christiansen 1927	92	2134	A2.542 - Communautés de la partie inférieure des rivages atlantiques	1330-1 "Prés salés du bas schorre"	
<i>Puccinellion maritima</i> W.F. Christiansen 1927 nom. corr. in Bardat et al. 2004					
<i>Halimionetum portulacoidis</i> Kuhnholz-Lordat 1927		10	A2.5271- Fourrés argentés	1330-2 "Prés salés du schorre moyen"	1330 "Prés salés atlantiques (<i>Glaucopuccinellietalia maritima</i>)"
<i>Juncetum gerardii</i> Warming 1906		4	A2.5311 Prés salés atlantiques à <i>Juncus gerardii</i>	1330-3 "Prés salés du haut schorre"	
Groupement à <i>Plantago maritima</i>		16	A2.5312 - Prés salés atlantiques à <i>Plantago maritima</i>		
<i>Festucetum littoralis</i> Corillion 1953 nom. em. Géhu 1976			A2.5313 Gazon atlantiques à <i>Festuca rubra</i> et <i>Agrostis stolonifera</i>		
<i>Armerion maritima</i> Braun-Blanquet & De Leeuw 1936			A2.531 - Communautés atlantiques de la partie supérieure du rivage		
<i>Oenanthe lachenalii – Juncetum maritimi</i> Tüxen 1937	21	18	A2.531A - Jonchaies atlantiques à <i>Juncus maritimus</i>		
<i>Atriplicetum littoralis</i> (Christiansen 1933) Tüxen 1937			A2.512 - Communautés d'espèces annuelles des hautes marées salées atlantiques	1330-5 "Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée"	
<i>Atriplicion littoralis</i> Nordhagen 1940		126			
<i>Agropyron pungentis</i> Géhu 1968	152	3175	A2.511 - Communautés à hautes herbes des marais salés et des hautes marées atlantiques		

<i>Junco gerardi</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault ass. nov. hoc loco		1155	A2.5319 - Prés salés atlantiques à <i>Eleocharis</i>		
<i>Loto tenuis</i> – <i>Trifolium fragiferum</i> (Westhoff, van Leeuwen & Adriani 1962) de Foucault 2008		80			
<i>Carici divisae</i> – <i>Lolium perennis</i> de Foucault 2008		2142			
<i>Trifolium maritimi</i> – <i>Oenanthe silaifoliae</i> (Dupont 1954) de Foucault 2008		22667			
<i>Alopecurion utriculati</i> Zeidler 1954	777	4035	A2.523 - Prés salés ras méditerranéens à <i>Juncus</i> , <i>Carex</i> , <i>Hordeum</i> et <i>Trifolium</i>	1410-3 "Prairies subhalophiles thermo-atlantiques"	1410 "Prés salés méditerranéens (<i>Juncetalia maritimi</i>)"
<i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault (1984) 2008		5879			
<i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault in de Foucault & Catteau 2012	97	125			
<i>Atriplici laciniatae</i> – <i>Salsolion kali</i> Géhu 1975			B1.12 - Communautés annuelles des plages sableuses médio-européennes		
<i>Honckenyetum latifoliae</i> Géhu 1996		30			
<i>Honckenyo peploidis</i> – <i>Elymion arenarii</i> Tüxen 1966					
Groupement des dunes embryonnaires à <i>Elymus × acutus</i> et <i>Elymus farctus</i> in Delassus 2018		85	B1.311 - Dunes embryonnaires atlantiques	2110-1 "Dunes mobiles embryonnaires atlantiques"	2110 "Dunes mobiles embryonnaires"
Groupement des dunes embryonnaires à <i>Elymus × acutus</i> et <i>Elymus farctus</i> in Delassus 2018 (faciès "ouvert")		24			
<i>Euphorbia paraliae</i> - <i>Ammophiletum arenariae</i> Tüxen in Braun-Blanquet & Tüxen 1952		7	B1.3211 - Dunes côtières : dunes blanches (au sens strict)	2120-1 "Dunes mobiles à <i>Ammophila arenaria</i> subsp. <i>Arenaria</i> des côtes atlantiques"	2120 "Dunes mobiles du cordon littoral à <i>Ammophila arenaria</i> ("dunes blanches")"
<i>Ammophilon arenariae</i> (Tüxen in Braun-Blanquet & Tüxen 1952) Géhu 1988					
<i>Euphorbia portlandicae</i> - <i>Helichryson stoechadis</i> Géhu & Tüxen ex Sissingh 1974		14	B1.42 - Dunes grises fixées gasconnes	2130-2 "Dunes grises des côtes atlantiques"	2130 "Dunes côtières fixées à végétation herbacée ("dunes grises")"

Habitats aquatiques

<i>Lythro portulae</i> – <i>Damasonietum alismatis</i> (Gadeceau 1909) de Foucault 1988			C3.51 - Gazons ras eurosibériens à espèces annuelles amphibies	3130-4 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, de bas-niveau topographique, planitiaires, d'affinités atlantiques, des <i>Isoeto-Juncetea</i> "	3130 "Eaux stagnantes, oligotrophes à mésotrophes avec végétation des <i>Littorelletea uniflorae</i> et/ou des <i>Isoeto-Nanojuncetea</i> "
<i>Ranunculo sardoii</i> – <i>Myosuretum minimi</i> Diémont et al. ex Oesau 1973				3130-5 "Communautés annuelles oligotrophiques à mésotrophiques, acidiphiles, de niveau topographique moyen, planitiaires à montagnardes, des <i>Isoeto-Juncetea</i> "	
<i>Radiolion linoidis</i> W. Pietsch 1971					
Plan d'eau oligomésotrophe à mésotrophe avec des communautés végétales du <i>Nitelletalia flexilis</i> W. Krause 1969, des <i>Charetalia hispidae</i> Krausch ex W. Krause 1997 ou du <i>Charetum connivitis</i> Ionescu-Teculescu 1972			C1.25 Tapis immergés de Charophytes des plans d'eau mésotrophes	3140-1 "Communautés à characées des eaux oligo-mésotrophes basiques"	3140 "Eaux oligo-mésotrophes calcaires avec végétation benthique à <i>Chara</i> spp. "

<i>Potametum trichoidis</i> Freitag, Markus & Schwippl 1958 ex Tüxen 1974			C1.23 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau mésotrophes		
<i>Ranunculo circinati</i> – <i>Elodeetum nuttallii</i> Lange in H. Passarge 1994		31		3150-1 "Plans d'eau eutrophes avec végétation enracinée avec ou sans feuilles flottantes"	
CB du <i>Parvopotamo</i> – <i>Zannichellietum palustris</i> (W. Koch 1926) Passarge 1964 em. Görs 1977			C1.33 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes		
<i>Potametum pectinati</i> Carstensen ex Hilbig 1971		1222			
<i>Lemnetum trisulcae</i> Hartog 1963		89		3150-2 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres submergés"	3150 "Lacs eutrophes naturels avec végétation du Magnopotamion ou de l'Hydrocharition"
<i>Lemnion minoris</i> Tüxen ex O. Bolòs & Masclans 1955		125	C1.221 - Couvertures de lentilles d'eau	3150-3 "Plans d'eau eutrophes avec dominance de macrophytes libres flottant à la surface de l'eau"	
<i>Lemnetum gibbae</i> W. Koch ex Miyawaki & J. Tüxen 1960					
<i>Spirodelo</i> – <i>Lemnetum minoris</i> Th. Müller & Görs 1960					
<i>Chenopodio chenopodioidis</i> - <i>Crypsietum aculeatae</i> Paradis & Lorenzoni 1994			C3.423 Gazons méditerranéens amphibies à <i>Crypsis</i>	3170-3 "Gazons méditerranéens amphibies halonitrophiles (<i>Heleochoilon</i>)"	3170 "Mares temporaires méditerranéennes"
<i>Trapa natantis</i> V. Kárpáti 1963			C1.2412 - Tapis de Châtaigne d'eau		
Grpt à <i>Nuphar lutea</i> (<i>Nupharetum luteae</i> Pohjala 1933 ou <i>Nymphaeetum albo</i> – <i>luteae</i> nowinski 1928)		13	C1.2411 - Tapis de Nénuphar		
<i>Parvopotamo</i> – <i>Zannichellietum pedicellatae</i> Soó (1934) 1947			?C1.33 - Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes / ?X03 - Lagunes littorales saumâtres		
<i>Zannichellietum obtusifoliae</i> Brullo & Spampinato 1990			C1.3411 - Communautés des eaux peu profondes à <i>Ranunculus</i>		
<i>Potamo crispus</i> – <i>Ranunculetum trichophylli</i> imchenetzky 1926					
<i>Ranunculetum baudotii</i> Hocquette 1927		228	?C1.54 - Macrophytes submergés des eaux salées et saumâtres / ?X03 - Lagunes littorales saumâtres		
Grpt à <i>Ludwigia grandiflora</i> et Grpt à <i>Ludwigia peploides</i>		778			
Plans d'eau douce ou saumâtre superficielle et réseau de canaux	96	2022	C - Eaux de surface continentales		
La Loire soumise à la marée	125	13372	X01 - Estuaire		

Habitats prairiaux

Prairies fauchées		1537			
<i>Anthriscu caucalidis</i> - <i>Cochlearion danicae</i> B. Foucault 2009			E1.6 - Pelouses à annuelles subnitrophiles		
<i>Thero</i> – <i>Airion</i> Tüxen ex Oberdorfer 1957	113	279	E1.91 - Pelouses siliceuses d'espèces annuelles naines		
<i>Polygono arenastri</i> – <i>Coronopodion squamati</i> Sissingh 1969		89	E1.E - Pelouses xériques piétinées à espèces annuelles		
<i>Cynosurion cristati</i> Tüxen 1947 X <i>Sisymbrietea officinalis</i> Korneck 1974	81	793	E2.1 - Pâturages permanents mésotrophes et prairies de post-pâturage X E5.1 Végétations herbacées anthropiques		
<i>Cynosurion cristati</i> Tüxen 1947	311	4134	E2.1 - Pâturages permanents mésotrophes et prairies de post-pâturage		
<i>Cynosurion cristati</i> Tüxen 1947 ("faciès prairie de fauche")		636	E2.2 - Prairies de fauche de basse et moyenne altitudes		
Prairies permanentes fortement fertilisées ou réensemencées	45	1474	E2.6 - Prairies améliorées, réensemencées et fortement fertilisées, y compris les terrains de sport et les pelouses ornementales		

<i>Lolium perennis</i> – <i>Plantaginion majoris</i> G. Sissingh 1969		230	E2.8 - Pelouses mésophiles piétinées à espèces annuelles		
<i>Bromion racemosi</i> Tüxen ex de Foucault 2008	246	939			
<i>Oenanthe peucedanifoliae</i> – <i>Brometum racemosi</i> de Foucault 1981					
<i>Senecioni aquatici</i> – <i>Oenanthe mediae</i> Bourmérias et al. 1978		12618			
<i>Hordeo secalini</i> – <i>Lolietum perennis</i> (Allorge 1922) de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006		9946			
<i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault 2008	141	1356	E3.41 - Prairies atlantiques et subatlantiques humides		
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault 2008		4776			
<i>Gratiolo officinalis</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006		146			
<i>Junco acutiflori</i> – <i>Cynosuretum cristati</i> Sougnez 1957		86			
<i>Ranunculo repentis</i> – <i>Cynosurion cristati</i> Passarge 1969	46	318			
Prairies humides dominées par <i>Juncus effusus</i>	23	1088			
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault 2008 (faciès à <i>Juncus effusus</i>)		195	E3.417 - Prairies à Jonc épars		
Prairies humides dominées par <i>Juncus acutiflorus</i>					
<i>Cirsio dissecti</i> – <i>Scorzoneretum humilis</i> de Foucault 1981 (faciès à <i>Juncus acutiflorus</i>)		101			
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault 2008 (faciès à <i>Juncus acutiflorus</i>)		81	E3.42 - Prairies à <i>Juncus acutiflorus</i>		
<i>Junco acutiflori</i> – <i>Cynosuretum cristati</i> Sougnez 1957 (faciès à <i>Juncus acutiflorus</i>)		129			
Prairies humides dominées par <i>Juncus inflexus</i>	101	569			
Facès à <i>Juncus inflexus</i> exclusif		108	E3.441 - Pâtures à grands Juncs		
Pâturages hygrophiles régulièrement inondés par les eaux oligohalines de la Loire et dominés par <i>Agrostis stolonifera</i> (=CB de l' <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault 2008)	125	1218			
Pâturages méso-hygrophiles régulièrement inondés par les eaux oligohalines de la Loire et dominés par <i>Agrostis stolonifera</i> (=CB du <i>Bromion racemosi</i> Tüxen ex de Foucault 2008)	121	4011	E3.44 - Gazons inondés et communautés apparentées		
Groupement hygronitrophile à <i>Festuca arundinacea</i>		379			
<i>Pulicario dysentericae</i> – <i>Juncetum inflexi</i> de Foucault 2006		12			
<i>Potentillo anserinae</i> – <i>Alopecuretum geniculati</i> Tüxen 1947		978			
<i>Potentillon anserinae</i> Tüxen 1947					
Pâturages hygrophiles régulièrement inondés par les eaux saumâtres de la Loire et dominés par <i>Agrostis stolonifera</i> (=CB du <i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i> de Foucault in de Foucault & Catteau 2012)	113	1998	E3.44 - Gazons inondés et communautés apparentées X A2.5 - Marais salés côtiers et roselières salines		
Pâturages méso-hygrophiles régulièrement inondés par les eaux saumâtres de la Loire et dominés par <i>Agrostis stolonifera</i> (=CB de l' <i>Alopecurion utriculati</i> Zeidler 1954)	41	1008			
<i>Cirsio dissecti</i> – <i>Scorzoneretum humilis</i> de Foucault 1981					
<i>Caro verticillati</i> – <i>Juncetum acutiflori</i> Oberdorfer in Oberdorfer 1979			E3.512 - Prairies acidoclines à Molinie bleue	6410-6 "Prés humides et bas-marais acidiphiles atlantiques"	6410 "Prairies à <i>Molinia</i> sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (<i>Molinion caeruleae</i>)"
<i>Juncion acutiflori</i> Braun-Blanquet in Braun-Blanquet & Tüxen 1952	20	689			

Habitats d'ourlets et mégaphorbiaies

<i>Thalictro flavi</i> – <i>Althaeetum officinalis</i> (Molinier & Tallon 1950) de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006				? 6430-1 "Mégaphorbiaies mésotrophes collinéennes" / ? non HIC	6430 "Mégaphorbiaies hygrophiles d'ourlets planitiaires et des étages montagnard à alpin"
<i>Achilleo ptarmicae</i> – <i>Cirsion palustris</i> Julve & Gillet ex de Foucault 2011	19	339	?E5.412 - Mégaphorbiaies occidentales némorales rivulaires dominées par <i>Filipendula</i> / ?E5.42 - Communautés à grandes herbacées des prairies humide		
<i>Convolvulion sepium</i> Tüxen in Oberdorfer 1957		60		? 6430-4 "Mégaphorbiaies eutrophes des eaux douces" / ? non HIC	
<i>Urtico dioicae</i> – <i>Convolvuletum sepium</i> Görs & Müller 1969					
<i>Urtico dioicae</i> – <i>Phalaridetum arundinaceae</i> Schmidt 1981					
<i>Calystegio sepium</i> – <i>Angelicetum heterocarphae</i> Géhu & Géhu-Franck 1978		280	E5.4112 - Communautés fluviales à <i>Angelica heterocarpha</i>	6430-5 "Mégaphorbiaies oligohalines"	
<i>Anthriscetum sylvestris</i> Hadač 1978			E5.43 - Lisières forestières ombragées	6430-6 "Végétations des lisières forestières nitrophiles, hydroclines, héliophiles à semi-héliophiles"	
<i>Holco mollis</i> – <i>Pteridion aquilini</i> Passarge (1994) 2002		40	E5.3 - Formations à <i>Pteridium aquilinum</i>		

Habitats de roselières

<i>Glycerietum fluitantis</i> Nowiński 1930	119	517	C3.1 - Formations à héliophytes riches en espèces		
<i>Astero tripolii</i> – <i>Phragmitetum communis</i> Jeschke ex Krisch 1974		467			
<i>Astero tripolii</i> – <i>Phragmitetum communis</i> Jeschke ex Krisch 1974 "faciès feuilles sèches"		454			
<i>Phragmitetum communis</i> Savič 1926		641			
<i>Phragmitetum communis</i> Savič 1926 ("faciès feuilles sèches")		70			
Phragmitaie oligohaline ("Roselière saumâtre" in Géhu & Géhu-Franck 1978?)	390	2132	C3.21 - Phragmitaies à <i>Phragmites australis</i>		
Phragmitaie oligohaline ("Roselière saumâtre" in Géhu & Géhu-Franck 1978?) ("faciès feuilles sèches")		58			
Groupements dominés par <i>Phragmites australis</i>		2443			
Groupements dominés par <i>Phragmites australis</i> ("faciès feuilles sèches")		1330			
Débris de cannes sèches de <i>Phragmites australis</i> ("laisse de mer")		87			
<i>Scirpetum lacustris</i> Chouard 1924		116	C3.22 - Scirpaies à <i>Scirpus lacustris</i>		
<i>Typhetum latifoliae</i> Nowiński 1930		61	C3.231 - Typhaies à <i>Typha latifolia</i>		
<i>Typhetum angustifoliae</i> P.Allorge ex Pignatti 1953		104	C3.232 - Typhaies à <i>Typha angustifolia</i>		
<i>Sagittario sagittifoliae</i> – <i>Sparganietum simplicis</i> Tüxen 1953			C3.241 - Communautés à Sagittaire		
<i>Eleocharitetum palustris</i> Savič 1926		436	C3.24A - Tapis de Scirpe des marais		
<i>Iridetum pseudacori</i> Egger ex Brzeg & M.Wojterska 2001		243	C3.24B - Formations à Iris faux acore		
<i>Equisetetum eleocharitis</i> Nowiński 1930			C3.247 - Communautés à Prêle des eaux		
<i>Glycerietum aquatica</i> Nowiński 1930	307	6037	C3.251 - Glycériaies		
<i>Phalaridion arundinaceae</i> Kopecký 1961		772	C3.26 - Formations à <i>Phalaris arundinacea</i>		
<i>Apio nodiflori</i> – <i>Eleocharitetum amphibiae</i> Géhu & Géhu-Franck 1972		162			
<i>Scirpetum triquetri</i> Zonneveld 1955 corr. et em. Géhu & Biondi 1988		29	C3.27 - Formations halophiles à <i>Scirpus</i> , <i>Bolboschoenus</i> et <i>Schoenoplectus</i>		
<i>Scirpetum maritimi</i> Langendonck 1932	185	2351			
CB du <i>Scirpetum maritimi</i> Langendonck 1932		2026			
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Bolboschoenetum maritimi</i> Delcoigne & Thébaud in Delcoigne & Thébaud 2018					

<i>Bidention tripartitae</i> (W. Koch 1926) Nordhagen 1940		514	C3.5 - Berges périodiquement inondées à végétation pionnière et éphémère		
<i>Chenopodio – Atriplicetum salinae</i> Slavnić (1939) 1948		367			
Fonds vaseux des plans d'eau asséchés	15	1722	C3.6 - Berges nues ou à végétation clairsemée avec des sédiments meubles ou mobiles		
<i>Galio palustris – Caricetum ripariae</i> Bal.-Tul., Mucina, Ellmauer & B. Walln. in G. Grabherr & Mucina 1993	48	962	D5.21 - Communautés de grands <i>Carex</i> (magnocariçaies)		
<i>Caricetum gracilis</i> Almqvist 1929 nom. conserv. propos.		21			

Habitats rudéraux et friches nitrophiles

<i>Brassico nigrae – Carduetum tenuiflori</i> Bouzillé, Foucault & Lahondère 1984 nom. nov. Bioret, Lahondère & Botineau 1993		119	E5.1 Végétations herbacées anthropiques		
<i>Sisymbrium officinalis</i> Tüxen, Lohmeyer & Preising ex von Rochow 1951		45			
<i>Arction lappae</i> Tüxen 1937		70			
<i>Dauco carotae - Melilotion albi</i> Görs 1966	33	131			
<i>Salsolion ruthenicae</i> G. Phil. ex Oberd. 1983		19			
<i>Laguro ovati – Brometum rigidi</i> Géhu & Géhu-Franck 1985		14			
<i>Laguro ovati – Brometum rigidi</i> Géhu & Géhu-Franck 1985 X		284			
<i>Agropyron pungentis</i> Géhu 1968					
<i>Convolvulo arvensis – Agropyron repentis</i> Görs 1966		65			
<i>Sisymbrio officinalis – Hordeetum murinum</i> Braun-Blanq. 1967		43			

Habitats des fourrés et forêts

<i>Solano dulcamarae – Tamaricetum gallicae</i> de Foucault 2008	34	2283	F9.3131 - Fourrés ouest-méditerranéens de Tamaris	92D0-3 "Galeries riveraines à Tamaris"	92D0 "Galeries et fourrés riverains méridionaux (<i>Nerio-Tamaricetea</i> et <i>Securinegion tinctoriae</i>)"
<i>Lonicerion periclymeni</i> Géhu, de Foucault & Delelis 1983 (fourrés pauvres en espèces de <i>Prunus spinosa</i> ou <i>Rubus sp.</i>)	91		F3.1112 - Fourrés à Prunellier et Ronces atlantiques		
<i>Prunus spinosa</i>		774			
<i>Rubus sp.</i>		1868			
<i>Ulici europaei – Prunetum spinosae</i> Géhu & Géhu-Franck 1983		92	F3.15 - Fourrés à <i>Ulex europaeus</i>		
<i>Ulici europaei - Cytisetum scoparii</i> Oberdorfer ex B. Foucault, Lazare & Bioret 2013		32	F3.141 - Formations à Genêt à balais planitiaires et collinéennes		
<i>Salicetum triandro – viminalis</i> (Tüxen 1931) Lohmeyer 1952 ex Moor 1958	174	3626	F9.121 Fourrés à Saule à trois étamines et à Osier blanc		
Bosquets et fourrés dominés par <i>Salix atrocinerea</i>	68	1898	F9.2 - Saussaies marécageuses et fourrés des bas-marais à <i>Salix</i>		
Haies composées principalement d'espèces locales			FA.3 - Haies d'espèces indigènes riches en espèces		
<i>[Fraxinus angustifolia subsp. oxycarpa]</i>		[1872]			
<i>[Quercus robur]</i>		[2671]			
<i>[Robinia pseudoacacia]</i>		[120]			
<i>[Betula pendula]</i>		[30]			
<i>Salicion albae</i> Soó 1930	134	3765	G1.1111 - Saulaies à Saule blanc ouest-européennes	91E0-1 "Saulaies arborescentes à Saule blanc"	91E0 "Forêts alluviales à <i>Alnus glutinosa</i> et <i>Fraxinus excelsior</i> (<i>Alno-Padion</i> , <i>Alnion incanae</i> , <i>Salicion albae</i>)"
<i>Alnenion glutinoso - incanae</i> Oberdorfer 1953	23	425	G1.211 - Bois des ruisseaux et sources à <i>Fraxinus</i> et <i>Alnus</i>	91E0-8 "Aulnaies-frênaies à Laïche espacée des petits ruisseaux"	

<i>Ulmo laevis</i> – <i>Fraxinetum angustifoliae</i> (Breton) Rameau & Schmitt ex J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006	89		G1.22 - Forêts mixtes de <i>Quercus-Ulmus-Fraxinus</i> des grands fleuves	91F0-3 "Chênaies-ormaies à Frêne oxyphyllé"	91F0 "Forêts mixtes de <i>Quercus robur</i> , <i>Ulmus laevis</i> , <i>Ulmus minor</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> ou <i>Fraxinus angustifolia</i> riveraines des grands fleuves (<i>Ulmion minoris</i>)"
<i>[Fraxinus angustifolia subsp. oxycarpa]</i>		[1872]			
<i>Forêts méso-hygrophiles dominées par Quercus robur (incl. Fraxino excelsioris - Quercion roboris Rameau 1996)</i>	269		G1.A1 - Boisements sur sols eutrophes et mésotrophes à <i>Quercus</i> , <i>Fraxinus</i> et <i>Carpinus betulus</i>		
<i>[Quercus robur]</i>		[2671]			
<i>[Robinia pseudoacacia]</i>		[120]			
<i>[Betula pendula]</i>		[30]			
Fourrés d' <i>Ulmus minor</i>		16	G1.A61 - Ormaies à <i>Ulmus minor</i>		
Plantations d'espèces, d'hybrides ou de cultivars du genre <i>Populus</i> à feuilles caduques	136	5402	G1.C1 - Plantations de <i>Populus</i>		
Plantations de Frênes		336	G1.C4 - Autres plantations d'arbres feuillus caducifoliés		
Plantations de conifères du genre <i>Pinus</i>	113	1612	G3.F12 Plantations de Pins indigènes		

Habitats agricoles cultivés et habitats anthropiques

Cultures céréalières	65	1655	I1.1 - Monocultures intensives		
Terres labourées nues		481	I1.51 - Terres labourées nues		
Chemins		278	H5.61 - Sentiers		
Routes		356	J4.2 - Réseaux routiers		
Enrochements		457	J2.53 - Dignes en milieu marin		

2.3.2 Analyse des images satellites Sentinel-2

2.3.2.1 Analyses des images à date unique

Les indices de précision globale des classifications individuelles des images Sentinel-2 pour les 11 dates sélectionnées sont présentés dans la **figure 36**. Les meilleurs résultats sont obtenus avec des images acquises au printemps et en été ($OA > 85\%$). La précision la plus importante a été obtenue avec l'image du 6 juillet 2019 ($OA = 87.28\%$). Les classifications des images de la fin d'hiver et de l'automne présentent des résultats légèrement inférieurs ($80\% < OA < 85\%$). Les classifications les moins performantes sont issues des images de fin d'automne et d'hiver ($OA < 80\%$).

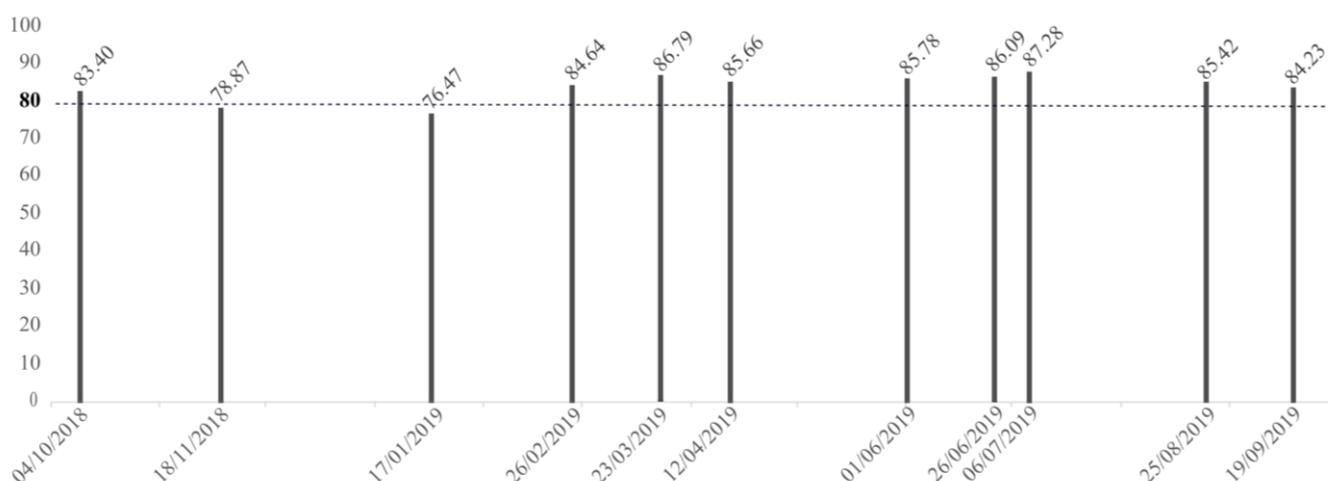


Figure 36. Indices de précision globale des classifications individuelles des images Sentinel-2 pour les 11 dates. En pointillé, le seuil de 80% retenu pour sélectionner les dates les plus performantes

2.3.2.2 Variables sélectionnées pour l'ensemble de données multi-dates

Sur la base des résultats des classifications individuelles, nous avons sélectionné les images des 9 dates dépassant le seuil de précision de 80% (**Fig. 36**). Nous avons retenu pour chacune de ces dates les 5 variables (bandes spectrales et indices de végétation) les plus performantes d'après le MDG (**Tab. 28** et **Annexe 06**). Au total, 6 bandes spectrales différentes et 4 indices de végétation intègrent la série temporelle. Les bandes spectrales B11 et B12 (SWIR) sont systématiquement présentes pour les 9 dates, tandis que les bandes B5 (red-edge), B3 (vert) et B2 (bleu) sont uniquement présentes sur 6, 4 et 2 dates respectivement et la bande B8A (proche infrarouge) uniquement pour une seule date. Concernant les indices de végétation, GNDVI et MTCI interviennent pour 7 et 4 dates respectivement, tandis que NDWI et EVI apparaissent

tous les deux pour 2 dates. Au total, 45 variables ont ainsi été retenues et ont été compilées afin de construire l'ensemble de données multi-dates.

Tableau 28. Liste des 5 variables (bandes spectrales et indices de végétation) les plus performantes d'après le MDG pour chaque date. Le numéro indique l'ordre d'importance de la variable d'après le MDG pour chaque date (pour plus de détails, voir l'annexe 06)

	20181004	20190226	20190323	20190412	20190601	20190626	20190706	20190825	20190919
B11	1	2	2	1	1	1	1	1	1
B12	2	1	1	2	2	3	2	2	2
B5		3	3		4	2	3	3	
GNDVI	5	5	4	4			5	5	5
MTCI		4		3	3	5			
B3	4		5	5					4
NDWI	3								3
B2						4		4	
EVI							4		
B8A					5				

La **figure 37** présente les variations phénologiques saisonnières des principales variables (**Tab. 28**) pour la discrimination des habitats. L'indice GNDVI et les bandes spectrales B2 (bleu) et B3 (vert) permettent une bonne discrimination des habitats A2.2 'Sable et sable vaseux intertidaux' et A2.3 'Vase intertidale' à chaque période de l'année. A l'inverse, les profils phénologiques des autres habitats se démarquent plus difficilement sur l'ensemble de la période étudiée. Globalement, les profils phénologiques sont proches durant la période hivernale et les principales variations de réflectance et d'intensité des indices sont constatées au printemps en été. Plus précisément, ce sont les décalages temporels dans les réponses spectrales qui permettent la distinction des habitats. Par exemples, les habitats A2.523 'Prés salés ras méditerranéens à *Juncus*, *Carex*, *Hordeum* et *Trifolium* saltmeadows' et E5.412 'Mégaphorbiaies occidentales némorales rivulaires dominées par *Filipendula*' montrent des profils proches sur certaines bandes (B11 et B12) et certains indices (NDWI et EVI) mais présentent des pics à différentes dates (26 juin 2019 pour A2.523 et 25 août 2019 pour E5.412) en relation avec des périodes de fauche décalées dans le temps.

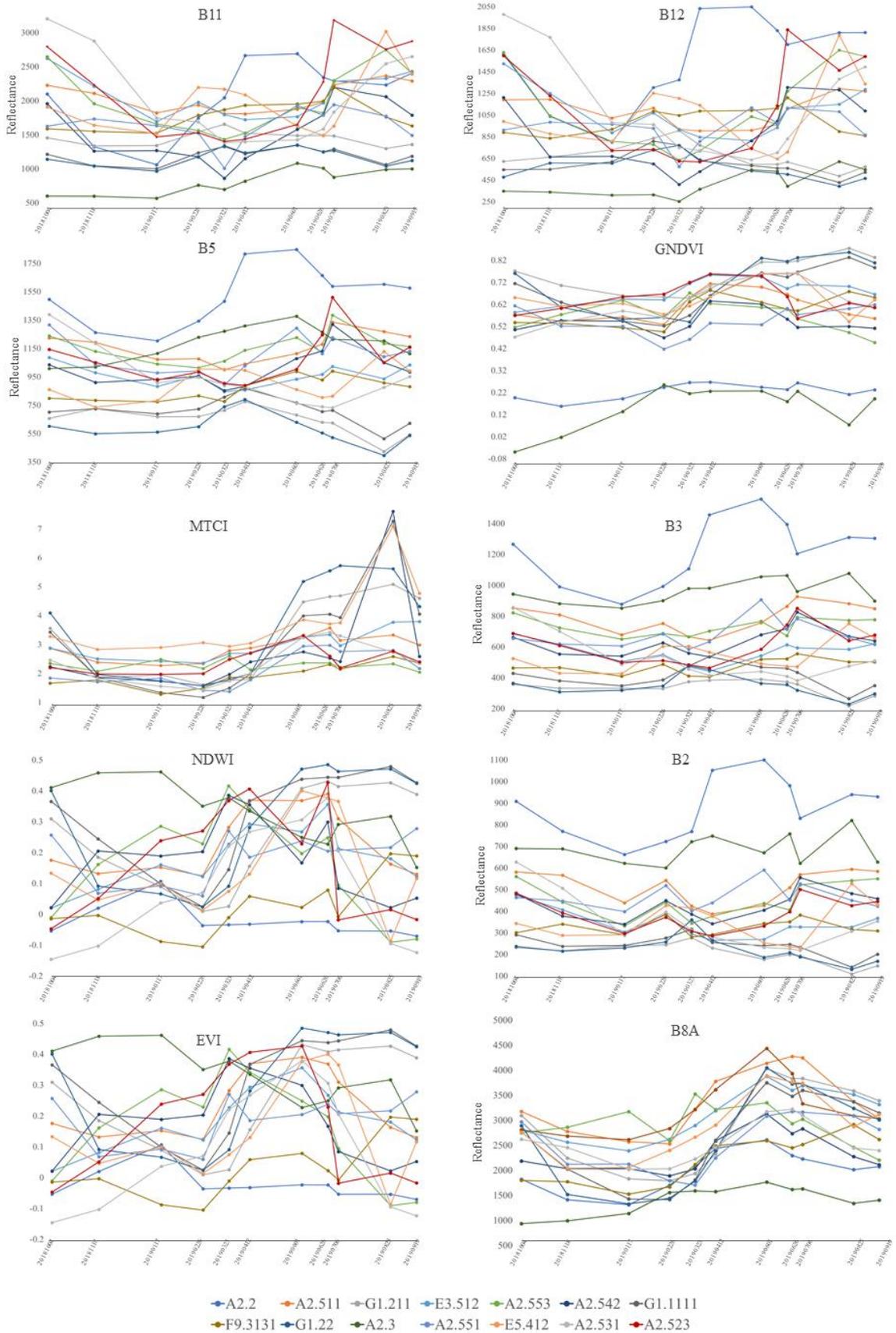


Figure 37. Variations phénologiques saisonnières des variables les plus importantes (Tab. 28) pour la discrimination des habitats du site d'étude. Seuls les profils spectraux des habitats EUNIS caractérisant des habitats d'intérêt communautaire ont été représentés. Les courbes sont tracées à partir de la moyenne de tous les pixels de formation de chaque habitat

2.3.2.3 Classification multi-dates

Les résultats sont présentés à l'échelle des habitats EUNIS, des habitats des 'Cahiers d'habitats' et des habitats EUR28, après le rattachement des unités phytosociologiques correspondant à une même catégorie d'habitat, en suivant les correspondances du [tableau 27](#). Les trois matrices de confusion exposant les résultats de la classification multi-dates d'images à l'échelle des trois référentiels d'habitats (EUNIS, 'Cahiers d'habitats' et EUR28) sont présentées dans le [tableau 29](#), [tableau 30](#) et [tableau 31](#). Pour finir, la carte des habitats (EUNIS / EUR28) issue de la classification de l'ensemble de l'image est présentée dans la [figure 38](#).

L'évaluation générale du modèle montre des résultats très satisfaisants avec une précision globale de 98.7% et un coefficient Kappa de 0.99 pour les trois échelles d'habitats utilisées.

A l'échelle des habitats EUNIS la précision du producteur est de 100% pour 19 habitats sur les 39 qu'intègre la typologie retenue pour les images satellites. Les autres habitats présentent des erreurs modérées permettant d'obtenir une précision du producteur supérieure à 90%, à l'exception des habitats EUNIS D5.21 'Communautés de grands Carex (magnocariçaies)', E3.512 'Prairies acidoclines à Molinie bleue' et F9.2 'Saussaies marécageuses et fourrés des bas-marais à *Salix*' possédants respectivement 87.5%, 75% et 89.7% de PA. Ces résultats indiquent que ces habitats ont tendance à être sous-représentés dans la carte prédictive des habitats ([Fig. 38](#)). De la même manière, les précisions de l'utilisateur sont très satisfaisantes avec 21 habitats à 100% d'UA, tandis que les autres habitats présentent toujours un niveau de précision supérieur à 90% d'UA. Ces légères confusions entraînent une sur-représentation des habitats dans la carte prédictive des habitats ([Fig. 38](#)).

A l'échelle des 'Cahiers d'habitats', 5 habitats sur 13 présentent une précision du producteur de 100%, comme le 1310-4 'Pelouses rases à petites annuelles subhalophiles' et le 92D0-3 'Galleries riveraines à Tamaris'. Les autres habitats ont tous une précision PA supérieure à 90%, excepté le 6410-6 'Prés humides et bas-marais acidiphiles atlantiques' avec seulement 75% de PA. Les précisions de l'utilisateur indiquent également de bons résultats avec 8 habitats à 100% d'UA, tandis que les autres habitats sont tous supérieurs à 90% d'UA.

A l'échelle des habitats EUR28, les statistiques sont également très satisfaisantes avec 4 habitats à 100% de PA, telles que le 1130 'Estuaires', 4 habitats avec une valeur de PA supérieure à

90%, comme le 1330 'Prés salés atlantiques (*Glauco-Puccinellietalia maritimae*)' ou le 1410 'Prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)' et 1 habitat à 75% de PA (6410 'Prairies à *Molinia* sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (*Molinion caeruleae*)'). Toutes les précisions de l'utilisateur sont supérieures à 90% dont 5 atteignent 100% d'UA.

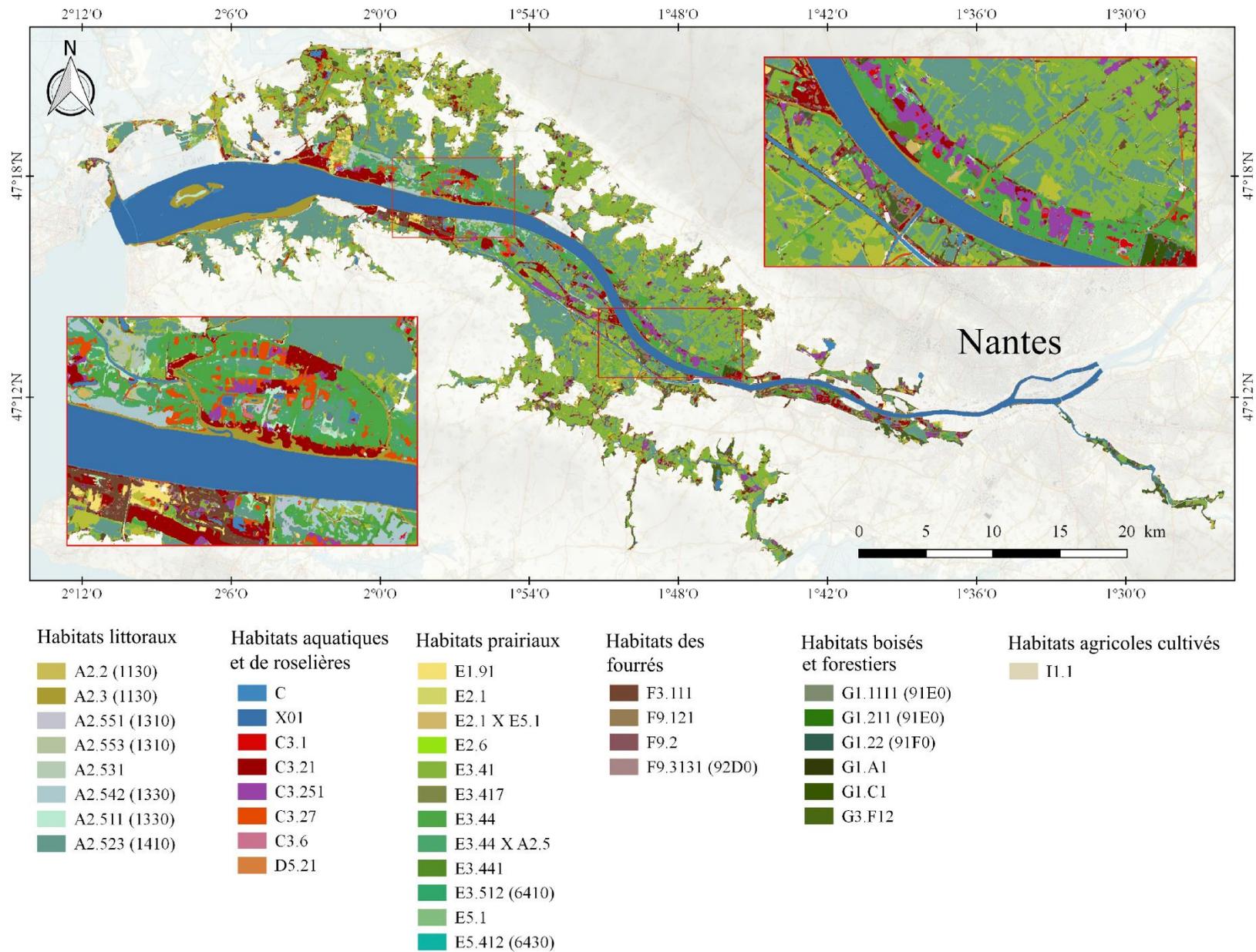


Figure 38. Carte prédictive de la répartition des principaux habitats du site Natura 2000 ‘Estuaire de la Loire’ issue de la classification de l’ensemble de données multi-dates. Les codes correspondent aux identifiants des habitats EUNIS et les correspondances avec les habitats EUR28 sont indiqués entre parenthèse. Pour le détail des intitulés des habitats, voir le tableau 27

L'examen visuel de la carte finale (Fig. 38) permet d'évaluer qualitativement le niveau de concordance par rapport à la réalité de terrain. De manière générale, la répartition des unités cartographiées est cohérente avec l'organisation générale des habitats connus sur l'estuaire de la Loire. Les habitats littoraux se répartissent de part et d'autre du fleuve sur les parties aval du site Natura 2000, les plus soumises aux influences océaniques. Sur ces secteurs, les prairies subhalophiles thermo-atlantiques (EUNIS A2.523 ; EUR28 1410) couvrent de vastes surfaces de manière homogène. Plus en amont, elles se développent également en de nombreux secteurs sous la forme de patchs en mélange avec d'autres habitats. Au total, cet habitat couvre 4 491 ha sur l'ensemble de la zone d'étude (Tab. 32). Les roselières sont fréquentes à proximité du fleuve, dans les zones régulières submergées par les marées. Parmi les roselières, l'habitat C3.21 'Phragmitaies à *Phragmites australis*' est dominant et régulièrement réparties de l'aval vers l'amont (980 ha). L'habitat C3.27 'Formations halophiles à *Scirpus*, *Bolboschoenus* et *Schoenoplectus*' colonise les secteurs avals (538 ha) tandis que l'habitat C3.251 'Glycériaies', peu tolérant au sel, lui succède en remontant vers l'amont (711 ha). Les habitats prairiaux couvrent également des surfaces importantes, dont les prairies atlantiques et subatlantiques humides (E3.41) représentent l'habitat le plus cartographié (5 427 ha). Les habitats prairiaux ont une répartition essentiellement à l'amont et sur les marges du site, c'est-à-dire dans les secteurs les moins soumis aux intrusions salines. Les fourrés et les forêts sont plus rares et se cantonnent le plus souvent sur les secteurs les plus amonts du site Natura 2000, en raison notamment de l'intolérance au sel de la majorité de ces habitats.

Tableau 32. Surfaces des habitats EUNIS cartographiées à partir de la classification des images Sentinel-2

Code EUNIS	Surface (ha)	Code EUNIS	Surface (ha)	Code EUNIS	Surface (ha)
E3.41	5 426.9	A2.511 (1330)	278.5	D5.21	37.4
A2.523 (1410)	4 491.0	A2.542 (1330)	231.5	G1.C1	30.7
X01	4 412.9	G1.1111 (91E0)	215.6	A2.2 (1130)	24.5
E2.1	1 915.8	F9.2	158.5	E5.1	19.1
E3.44	1 084.5	E3.441	157.8	G1.211 (91E0)	14.6
C3.21	980.3	E1.91	101.3	E5.412 (6430)	13.7
C3.251	711.4	F9.121	91.6	E2.6	10.0
F3.111	702.2	G3.F12	81.6	E3.512 (6410)	7.8
A2.3 (1130)	674.1	A2.553 (1310)	81.5	E3.417	5.8
C3.27	538.1	C3.1	55.1	A2.531	5.3
C	429.5	A2.551 (1310)	48.1	C3.6	3.8
G1.A1	340.1	F9.3131 (92D0)	44.7	I1.1	3.7
E3.44 X A2.5	329.3	G1.22 (91F0)	39.4		

2.3.3 Analyse des images aéroportées hyperspectrales et LiDAR

2.3.3.1 Précisions des classifications Random Forest

La qualité générale des modèles RF (OA et Kappa) pour les 3 ensembles de données analysés (Test 1, Test 2 et Test 3), est présentée dans le [tableau 33](#).

Tableau 33. Niveaux de précision (OA et Kappa) pour les trois ensembles de données analysés (Test 1, Test 2 et Test 3)

	Test 1	Test 2	Test 3
OA	80.7	86.6	94.5
Kappa	0.80	0.86	0.94

Les résultats montrent que les précisions globales (OA) sont satisfaisantes avec des valeurs supérieures à 80% pour chaque analyse (les valeurs de Kappa indiquent des résultats similaires à celle de l'OA). L'image Test 1 montre la précision de classification la plus faible (OA = 80,7%). L'apport des indices hyperspectraux et des statistiques descriptives (Test 2) a permis d'améliorer les résultats avec un OA de 86,6%, soit une progression de 5,9% de la précision globale. Finalement, l'image composée par l'ensemble des variables (Test 3) a donné le meilleur résultat de classification avec un OA de 94,5%. Ce résultat correspond à une amélioration de 7,9% d'OA par rapport à l'image Test 2 et une augmentation de 13,8% d'OA par rapport à l'image Test 1.

Les matrices de confusion résultant des classifications RF de ces 3 images sont présentées dans l'[annexe 07](#). Les informations contenues dans les matrices sont résumées à partir des précisions PA et UA pour chaque classification dans le [tableau 34](#) et représentés par classe de précision dans la [figure 39](#).

Tableau 34. Présentation des précisions du producteur (PA) et des précisions de l'utilisateur (UA) pour les trois images analysées (Test 1, Test 2 et Test 3). Les variations des valeurs de PA et UA entre les tests sont présentées dans les colonnes 'Delta'

ROIs	Nb pixels	Test 1		Test 2		Test 3		Delta T1>T2		Delta T2>T3		Delta T1>T3	
		PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA	PA	UA
Rivage sablonneux	2308	99.7	99.9	99.9	100	99.9	100	0.2	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0
Débris coquilliers	26	96.2	100	96.2	100	96.2	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Rivages boueux	8006	99.7	98.9	100	99.2	100	100	0.2	0.4	0.0	0.7	0.3	1.1
<i>Astero tripolii – Suaedetum maritimae</i>	240	76.7	92.9	79.2	92.7	90.0	96.4	2.5	-0.2	10.8	3.7	13.3	3.5

<i>Astero tripolii</i> – <i>Suaedetum maritimae</i> faciès à <i>Tripolium pannonicum</i>	217	70.5	74.6	80.2	90.2	82.9	95.2	9.7	15.5	2.8	5.1	12.4	20.6
<i>Salicornion europaeo</i> – <i>ramosissimae</i>	585	93.0	83.8	96.6	88.0	97.3	91.9	3.6	4.2	0.7	3.9	4.3	8.1
<i>Parapholido strigosae</i> – <i>Hordeetum marini</i>	2859	97.4	94.4	98.3	96.4	98.5	98.6	0.8	2.0	0.2	2.2	1.1	4.2
<i>Puccinellietum maritimae</i>	2134	91.4	90.2	93.9	93.6	96.9	97.3	2.4	3.4	3.0	3.7	5.4	7.1
<i>Halimionetum portulacoidis</i>	10	10.0	100	30.0	100	60.0	100	20.0	0.0	30.0	0.0	50.0	0.0
<i>Juncetum gerardii</i>	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Groupement à <i>Plantago maritima</i>	16	18.8	75.0	62.5	100	75.0	100	43.8	25.0	12.5	0.0	56.3	25.0
<i>Oenanthe lachenalii</i> – <i>Juncetum maritimi</i>	18	5.6	33.3	5.6	100	27.8	83.3	0.0	66.7	22.2	-16.7	22.2	50.0
<i>Junco gerardi</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i>	1155	69.9	82.3	78.5	90.8	90.8	95.5	8.7	8.4	12.3	4.7	21.0	13.1
<i>Loto tenuis</i> – <i>Trifolion fragiferion</i>	80	45.0	66.7	60.0	90.6	81.3	95.6	15.0	23.9	21.3	5.0	36.3	28.9
<i>Atriplicion littoralis</i>	126	78.6	84.6	81.7	92.8	95.2	96.0	3.2	8.2	13.5	3.2	16.7	11.4
<i>Agropyron pungentis</i>	3175	92.5	90.6	92.7	92.6	98.2	97.0	0.2	2.0	5.5	4.4	5.7	6.4
<i>Carici divisae</i> – <i>Lolietum perennis</i>	2142	37.2	68.4	40.0	80.3	64.6	92.2	2.8	11.9	24.6	11.9	27.4	23.8
<i>Trifolio maritimi</i> – <i>Oenanthe silaifoliae</i>	22667	88.4	74.2	92.7	77.7	96.4	90.1	4.3	3.5	3.7	12.5	8.0	15.9
<i>Alopecurion utriculati</i>	4035	75.1	78.2	83.1	88.2	89.7	95.2	8.1	10.0	6.5	7.0	14.6	17.0
<i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i>	5879	59.7	69.0	68.4	79.6	86.5	91.5	8.7	10.6	18.1	11.9	26.8	22.5
<i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthe fistulosae</i>	125	27.2	60.7	50.4	87.5	79.2	92.5	23.2	26.8	28.8	5.0	52.0	31.8
<i>Honckenyetum latifoliae</i>	30	86.7	83.9	100	88.2	100	88.2	13.3	4.4	0.0	0.0	13.3	4.4
<i>Euphorbio paraliae</i> - <i>Ammophiletum arenariae</i>	7	14.3	100	71.4	100	85.7	100	57.1	0.0	14.3	0.0	71.4	0.0
Grpt. des dunes embryonnaires à <i>Elymus</i> × <i>acutus</i> et <i>E. farctus</i>	85	44.7	67.9	70.6	88.2	80.0	85.0	25.9	20.4	9.4	-3.2	35.3	17.1
Grpt. des dunes embryonnaires à <i>Elymus</i> × <i>acutus</i> et <i>E. farctus</i> "ouvert"	24	95.8	92.0	95.8	95.8	95.8	100	0.0	3.8	0.0	4.2	0.0	8.0
<i>Euphorbio portlandicae</i> - <i>Helichryson stoechadis</i>	14	21.4	50.0	42.9	100	50.0	100	21.4	50.0	7.1	0.0	28.6	50.0
<i>Ranunculo circinatis</i> – <i>Elodeetum nuttallii</i>	31	100	96.9	100	100	100	100	0.0	3.1	0.0	0.0	0.0	3.1
<i>Potametum pectinatis</i>	1222	99.8	99.5	100	99.6	100	99.7	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.2
<i>Lemnetum trisulcae</i>	89	97.8	97.8	100	100	100	100	2.2	2.2	0.0	0.0	2.2	2.2
<i>Lemnion minoris</i>	125	100	100	98.3	100	99.2	100	-1.7	0.0	0.8	0.0	-0.8	0.0
Grpt à <i>Nuphar lutea</i>	13	92.3	100	76.9	100	92.3	100	-15.4	0.0	15.4	0.0	0.0	0.0
<i>Ranunculetum baudotii</i>	228	98.7	97.4	100	100	100	100	1.3	2.6	0.0	0.0	1.3	2.6
Grpt à <i>Ludwigia grandiflora</i> et Grpt à <i>Ludwigia peploides</i>	778	98.8	97.2	99.7	97.7	99.9	98.2	0.9	0.5	0.1	0.5	1.0	1.0
Plans d'eau douce ou saumâtre superficielle et réseau de canaux	2022	100	100	100	100	100	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
La Loire soumise à la marée	13372	100	100	100	100	100	100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Prairies fauchées	1537	99.6	96.8	100	98.5	100	99.7	0.4	1.7	0.0	1.2	0.4	2.9
<i>Thero</i> – <i>Airion</i>	279	93.2	89.7	95.7	92.1	98.6	94.8	2.5	2.4	2.9	2.8	5.4	5.2
<i>Polygono arenastri</i> – <i>Coronopodium squamati</i>	89	79.8	97.3	80.9	100	89.9	100	1.1	2.7	9.0	0.0	10.1	2.7
<i>Cynosurion cristati</i>	4134	74.5	75.9	81.4	85.0	97.1	95.4	7.0	9.1	15.7	10.4	22.7	19.5
<i>Cynosurion cristati</i> X <i>Sisymbrietea officinalis</i>	793	73.8	76.7	77.8	88.5	98.9	99.1	4.0	11.9	21.1	10.6	25.1	22.4
<i>Cynosurion cristati</i> "fauché"	636	49.1	71.9	67.6	88.8	76.4	95.1	18.6	17.0	8.8	6.3	27.4	23.2

Prairies permanentes fortement fertilisées ou réensemencées	1474	76.9	80.0	88.6	94.4	89.3	96.8	11.7	14.5	0.7	2.4	12.4	16.9
<i>Lolio perennis</i> – <i>Plantaginion majoris</i>	230	82.2	85.9	90.4	86.0	93.9	97.3	8.3	0.0	3.5	11.3	11.7	11.4
<i>Bromion racemosi</i>	939	55.5	66.3	65.4	82.4	84.7	95.6	9.9	16.1	19.3	13.1	29.2	29.3
<i>Senecioni aquatici</i> – <i>Oenanthetum mediae</i>	12618	77.0	67.5	82.5	72.9	93.6	88.3	5.5	5.4	11.1	15.4	16.6	20.8
<i>Hordeo secalini</i> – <i>Lolietum perennis</i>	9946	75.8	69.5	80.4	74.4	92.0	90.2	4.6	4.9	11.6	15.9	16.2	20.8
<i>Oenanthion fistulosae</i>	1356	55.8	67.4	65.3	85.9	83.5	91.8	9.4	18.5	18.2	5.9	27.7	24.4
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthetum fistulosae</i>	4776	73.9	75.0	73.7	84.8	94.8	94.2	-0.2	9.8	21.0	9.4	20.8	19.1
<i>Gratiolo officinalis</i> – <i>Oenanthetum fistulosae</i>	146	44.5	60.7	68.5	94.3	85.6	96.2	24.0	33.6	17.1	1.8	41.1	35.4
<i>Junco acutiflori</i> – <i>Cynosuretum cristati</i>	86	17.4	78.9	46.5	100	79.1	98.6	29.1	21.1	32.6	-1.4	61.6	19.6
<i>Ranunculo repentis</i> – <i>Cynosurion cristati</i>	318	84.9	92.5	69.5	94.2	81.9	97.1	-15.4	1.8	12.4	2.8	-3.0	4.6
Prairies humides dominées par <i>Juncus effusus</i>	1088	84.7	88.1	91.3	89.8	95.6	94.6	6.5	1.7	4.3	4.8	10.8	6.6
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthetum</i> (faciès à <i>Juncus effusus</i>)	195	10.3	35.1	16.9	82.5	52.3	89.5	6.7	47.4	35.4	7.0	42.1	54.4
<i>Cirsio dissecti</i> – <i>Scorzoneretum humilis</i> (faciès à <i>Juncus acutiflorus</i>)	101	71.3	83.7	66.3	83.8	94.1	99.0	-5.0	0.0	27.7	15.2	22.8	15.2
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthetum fistulosae</i> (faciès à <i>Juncus acutiflorus</i>)	81	4.9	57.1	63.0	96.2	87.7	98.6	58.0	39.1	24.7	2.4	82.7	41.5
<i>Junco acutiflori</i> – <i>Cynosuretum cristati</i> (faciès à <i>Juncus acutiflorus</i>)	129	18.6	66.7	45.7	96.7	95.3	99.2	27.1	30.1	49.6	2.5	76.7	32.5
Prairies humides dominées par <i>Juncus inflexus</i>	569	25.8	59.0	54.1	76.8	83.8	87.8	28.3	17.8	29.7	11.0	58.0	28.8
Facès à <i>Juncus inflexus</i> exclusif	108	73.1	79.0	57.4	86.1	91.7	95.2	-15.7	7.1	34.3	9.1	18.5	16.2
CB de l' <i>Oenanthion fistulosae</i>	1218	69.6	77.1	78.4	83.3	88.4	91.7	8.8	6.2	10.0	8.4	18.8	14.6
CB du <i>Bromion racemosi</i>	4011	79.6	75.4	92.2	84.5	96.5	94.4	12.6	9.1	4.3	9.9	16.9	19.0
Groupement hygronitrophile à <i>Festuca arundinacea</i>	379	19.8	49.7	41.7	72.5	55.7	84.7	21.9	22.8	14.0	12.3	35.9	35.1
<i>Pulicario dysentericae</i> – <i>Juncetum inflexi</i>	12	0.0	0.0	33.3	100	16.7	100	33.3	100.0	-16.7	0.0	16.7	100.0
<i>Potentillo anserinae</i> – <i>Alopecuretum geniculati</i>	978	69.5	77.5	80.4	88.0	85.3	93.9	10.8	10.5	4.9	5.9	15.7	16.4
CB du <i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthion fistulosae</i>	1998	87.4	81.7	91.2	91.0	96.5	95.1	3.9	9.2	5.3	4.1	9.1	13.4
CB de l' <i>Alopecurion utriculati</i>	1008	79.6	67.4	83.7	85.4	93.1	91.5	4.2	18.0	9.3	6.1	13.5	24.1
<i>Juncion acutiflori</i>	689	35.0	72.4	47.5	91.6	86.8	96.6	12.5	19.2	39.3	5.0	51.8	24.2
<i>Achilleo ptarmicae</i> – <i>Cirsion palustris</i>	339	60.8	75.7	68.1	80.8	90.0	93.3	7.4	5.0	21.8	12.5	29.2	17.5
<i>Convolvulion sepium</i>	60	28.3	81.0	40.0	96.0	61.7	92.5	11.7	15.0	21.7	-3.5	33.3	11.5
<i>Calystegio sepium</i> – <i>Angelicetum heterocarpae</i>	280	40.0	80.6	87.1	98.0	69.6	93.3	47.1	17.4	-17.5	-4.7	29.6	12.7
<i>Holco mollis</i> – <i>Pteridion aquilini</i>	40	42.5	100	77.5	100	75.0	100	35.0	0.0	-2.5	0.0	32.5	0.0
<i>Glycerietum fluitantis</i>	517	83.6	93.3	85.1	94.6	88.6	97.9	1.5	1.3	3.5	3.2	5.0	4.6
<i>Astero tripolii</i> – <i>Phragmitetum communis</i>	467	73.7	81.5	77.1	85.5	88.2	96.9	3.4	4.0	11.1	11.4	14.6	15.4
<i>Astero tripolii</i> – <i>Phragmitetum communis</i> "faciès feuilles sèches"	454	86.6	90.8	92.5	98.6	93.0	96.6	5.9	7.8	0.4	-2.0	6.4	5.8
<i>Phragmitetum communis</i>	641	76.4	68.3	87.7	78.9	99.5	98.5	11.2	10.6	11.9	19.5	23.1	30.1
<i>Phragmitetum communis</i> ("faciès feuilles sèches")	70	62.9	91.7	45.7	97.0	71.4	92.6	-17.1	5.3	25.7	-4.4	8.6	0.9
Phragmitaie oligohaline	2132	74.2	78.1	90.7	90.0	97.0	95.8	16.4	11.9	6.3	5.8	22.7	17.7

Phragmitaie oligohaline ("faciès feuilles sèches")	58	44.8	81.3	60.3	94.6	87.9	96.2	15.5	13.3	27.6	1.6	43.1	15.0
Groupements dominés par <i>Phragmites australis</i>	2443	75.1	78.5	84.8	87.1	95.7	93.9	9.7	8.5	10.9	6.8	20.6	15.4
Groupements dominés par <i>Phragmites australis</i> ("faciès feuilles sèches")	1330	93.0	85.7	97.7	89.4	98.0	93.7	4.7	3.7	0.3	4.3	5.0	8.0
Débris de cannes sèches de <i>Phragmites australis</i> ("laisse de mer")	87	74.7	87.8	82.8	93.5	92.0	96.4	8.0	5.7	9.2	2.9	17.2	8.5
<i>Scirpetum lacustris</i>	116	95.7	97.4	96.6	96.6	98.3	100	0.9	-0.8	1.7	3.4	2.6	2.6
<i>Typhetum latifoliae</i>	61	60.7	78.7	83.6	98.1	80.3	94.2	23.0	19.4	-3.3	-3.8	19.7	15.5
<i>Typhetum angustifoliae</i>	104	53.8	65.9	59.6	81.6	92.3	95.0	5.8	15.7	32.7	13.5	38.5	29.2
<i>Eleocharitetum palustris</i>	436	75.0	86.5	77.3	89.9	85.8	96.9	2.3	3.4	8.5	7.0	10.8	10.4
<i>Iridetum pseudacori</i>	243	41.6	82.8	66.3	96.4	74.1	95.7	24.7	13.6	7.8	-0.7	32.5	13.0
<i>Glycerietum aquaticae</i>	6037	95.5	87.0	97.1	88.8	98.5	96.3	1.6	1.9	1.4	7.5	3.0	9.3
<i>Phalaridion arundinaceae</i>	772	37.3	72.0	59.1	86.4	77.7	92.0	21.8	14.4	18.7	5.7	40.4	20.0
<i>Apio nodiflori</i> – <i>Eleocharitetum amphibiae</i>	162	25.9	67.7	36.4	84.3	47.5	89.5	10.5	16.5	11.1	5.2	21.6	21.8
<i>Scirpetum triquetri</i>	29	6.9	66.7	51.7	100	27.6	100	44.8	33.3	-24.1	0.0	20.7	33.3
<i>Scirpetum maritimi</i>	2351	85.5	80.1	89.7	85.6	96.2	94.5	4.3	5.4	6.5	8.9	10.8	14.3
CB du <i>Scirpetum maritimi</i>	2026	84.4	81.0	89.2	85.2	97.0	95.1	4.8	4.2	7.7	9.9	12.6	14.1
<i>Bidention tripartita</i>	514	87.4	92.6	91.1	93.4	95.9	98.0	3.7	0.8	4.9	4.6	8.6	5.4
<i>Chenopodio</i> – <i>Atriplicetum salinae</i>	367	97.8	96.0	99.2	97.3	99.5	100	1.4	1.3	0.3	2.7	1.6	4.0
Fonds vaseux des plans d'eau asséchés	1722	93.8	96.0	96.2	98.2	99.8	98.5	2.4	2.2	3.6	0.2	6.0	2.4
<i>Galio palustris</i> – <i>Caricetum ripariae</i>	962	78.6	78.4	85.3	86.1	93.9	93.9	6.8	7.6	8.5	7.8	15.3	15.4
<i>Caricetum gracilis</i>	21	66.7	100	81.0	94.4	71.4	88.2	14.3	-5.6	-9.5	-6.2	4.8	-11.8
<i>Brassico nigrae</i> – <i>Carduetum tenuiflori</i>	119	0.8	20.0	18.5	100	37.0	97.8	17.6	80.0	18.5	-2.2	36.1	77.8
<i>Sisymbrium officinalis</i>	45	11.1	55.6	22.2	100	46.7	100	11.1	44.4	24.4	0.0	35.6	44.4
<i>Arction lappae</i>	70	34.3	80.0	70.0	90.7	85.7	92.3	35.7	10.7	15.7	1.6	51.4	12.3
<i>Dauco carotae</i> - <i>Melilotion</i>	131	45.0	80.8	60.3	88.8	74.8	99.0	15.3	7.9	14.5	10.2	29.8	18.2
<i>Salsolion ruthenicae</i>	19	0.0	0.0	5.3	100	47.4	100	5.3	100.0	42.1	0.0	47.4	100.0
<i>Laguro ovati</i> – <i>Brometum rigidi</i>	14	28.6	57.1	21.4	75.0	64.3	81.8	-7.1	17.9	42.9	6.8	35.7	24.7
<i>Laguro ovati</i> – <i>Brometum rigidi</i> X <i>Agropyron pungentis</i>	284	20.4	75.3	51.1	89.0	76.1	90.8	30.6	13.6	25.0	1.8	55.6	15.4
<i>Convolvulo arvensis</i> – <i>Agropyron repentis</i>	65	12.3	72.7	32.3	72.4	66.2	89.6	20.0	-0.3	33.8	17.2	53.8	16.9
<i>Sisymbrio officinalis</i> – <i>Hordeetum murinum</i>	43	69.8	85.7	83.7	100	93.0	100	14.0	14.3	9.3	0.0	23.3	14.3
<i>Solano dulcamarae</i> – <i>Tamaricetum gallica</i>	2283	86.5	85.1	89.8	86.9	96.8	95.5	3.3	1.8	7.0	8.5	10.3	10.3
<i>Prunus spinosa</i>	774	33.3	77.0	38.8	87.7	80.4	93.7	5.5	10.7	41.6	6.0	47.0	16.7
<i>Rubus</i> sp.	1868	95.7	90.9	94.8	90.5	99.0	99.0	-0.9	-0.4	4.2	8.5	3.3	8.1
<i>Ulici europaei</i> – <i>Prunetum spinosae</i>	92	95.7	96.7	100	92.0	100	97.9	4.3	-4.7	0.0	5.9	4.3	1.2
<i>Ulici europaei</i> - <i>Cytisetum scoparii</i>	32	81.3	100	93.8	100	93.8	100	12.5	0.0	0.0	0.0	12.5	0.0
<i>Salicetum triandro</i> – <i>viminialis</i>	3626	91.3	83.1	97.1	87.9	98.8	94.1	5.8	4.8	1.6	6.2	7.4	11.0
Bosquets et fourrés dominés par <i>Salix atrocinerea</i>	1898	42.8	61.5	55.0	79.7	88.6	89.3	12.2	18.2	33.6	9.6	45.8	27.8
<i>Salicion albae</i>	3765	74.1	69.0	84.1	77.8	96.3	92.6	10.0	8.8	12.2	14.9	22.2	23.7
<i>Alnenion glutinoso</i> - <i>incanae</i>	425	20.0	66.9	27.3	91.3	83.3	95.9	7.3	24.4	56.0	4.6	63.3	29.0
<i>Fraxinus angustifolia</i> subsp. <i>oxycarpa</i>	1872	17.9	56.3	33.9	83.2	73.9	84.6	16.0	26.9	40.0	1.4	56.0	28.3
<i>Quercus robur</i>	2671	56.0	63.5	81.1	85.5	91.9	84.9	25.0	22.0	10.8	-0.6	35.8	21.3

<i>Robinia pseudoacacia</i>	120	16.7	83.3	31.7	97.4	51.7	92.5	15.0	14.1	20.0	-4.9	35.0	9.2
<i>Betula pendula</i>	30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fourrés d' <i>Ulmus minor</i>	16	0.0	0.0	0.0	0.0	12.5	100	0.0	0.0	12.5	100.0	12.5	100.0
Plantations de <i>Populus</i>	5402	83.7	82.5	90.5	88.7	98.6	99.7	6.8	6.1	8.1	11.0	15.0	17.1
Plantations de Frênes	336	16.1	57.4	60.7	87.2	69.6	97.1	44.6	29.7	8.9	9.9	53.6	39.6
Plantations de conifères du genre <i>Pinus</i>	1612	88.8	76.9	94.1	88.1	99.3	97.5	5.3	11.2	5.2	9.4	10.5	20.6
Cultures céréalières	1655	95.4	94.1	97.5	97.9	99.9	99.6	2.1	3.8	2.5	1.8	4.5	5.5
Terres labourées nues	481	99.8	99.6	100	100	100	99.8	0.2	0.4	0.0	-0.2	0.2	0.2
Chemins	278	97.8	98.6	98.6	99.3	98.6	100	0.7	0.7	0.0	0.7	0.7	1.4
Routes	356	96.9	98.9	99.2	99.7	99.2	99.7	2.2	0.9	0.0	0.0	2.2	0.9
Enrochements	457	96.9	97.4	99.1	99.8	99.1	99.3	2.2	2.4	0.0	-0.4	2.2	2.0

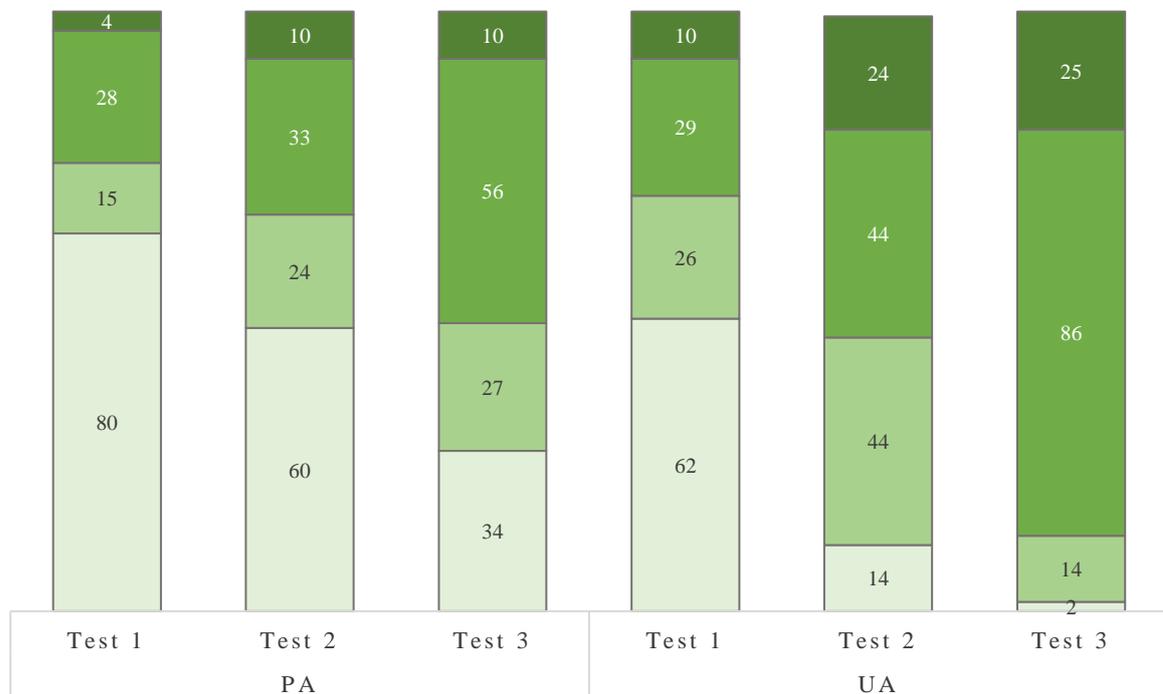


Figure 39. Proportion des différentes classes de PA et UA pour les trois tests. Vert très clair entre 0 et 80%, vert clair entre 80 et 90%, vert foncé entre 90 et 99.9% et vert très foncé PA=100%

La classification de Test 1 génère de nombreuses confusions se traduisant par des valeurs faibles de PA et UA avec respectivement 80 et 62 unités élémentaires présentant une valeur inférieure à 80% de précision [figure 39](#). Pour cette analyse, seules 32 unités ont une valeur de PA supérieures à 90% (principalement les unités relevant des habitats aquatiques, des habitats agricoles anthropiques et, pour partie, des habitats littoraux). Quatre unités affichent une correspondance parfaite (100% de PA) entre les données d'apprentissage et les données modélisées : *Ranunculo circinati – Elodeetum nuttallii*, *Lemnion minoris*, 'Plans d'eau douce ou saumâtre superficielle et réseau de canaux' et 'La Loire soumise à la marée'.

Cette difficulté de séparabilité entre unités élémentaires est liée aux réponses spectrales très proches entre de nombreuses végétations. Ce phénomène peut être illustré en visualisant directement les signatures spectrales de certaines communautés végétales. Par exemple, la **figure 40** présente les spectres de réflectance pour le *Phragmitetum communis*, l'*Astero tripolii* – *Phragmitetum communis* et la Phragmitaie oligohaline. Les spectres de réflectance de ces trois communautés présentent de nombreuses similitudes, avec à chaque fois une moyenne tombant dans l'intervalle à plus ou moins une fois l'écart type des autres communautés.

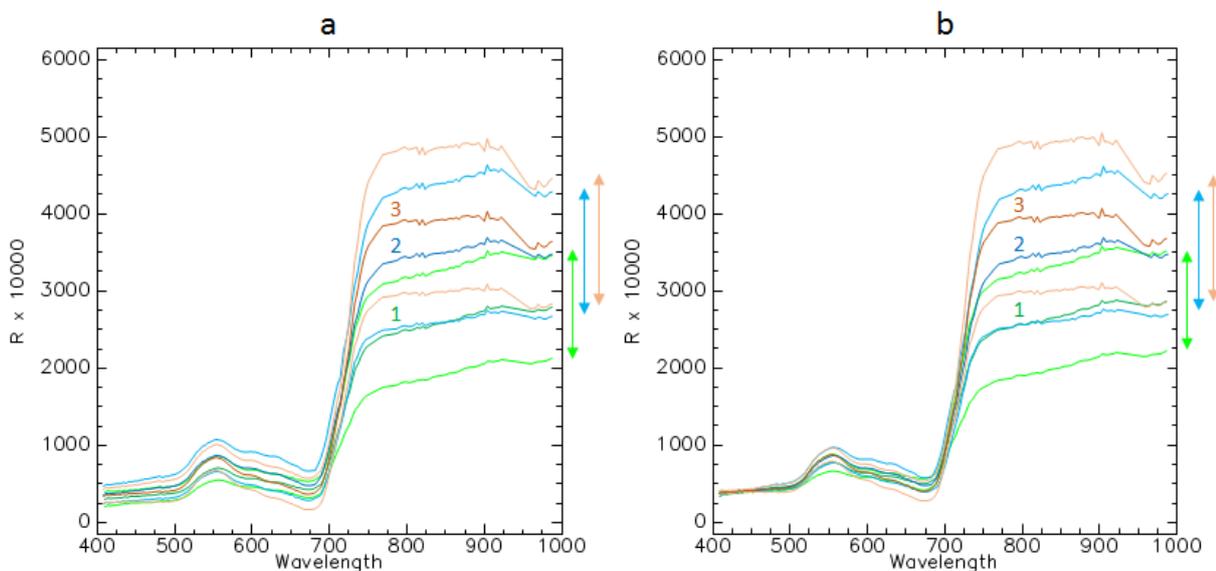


Figure 40. Spectres de réflectance moyens (courbes foncées) encadrés par les écart-types (courbes claires) pour le *Phragmitetum communis* (courbe 1 – avec 4 ROIs et 651 pixels), l'*Astero tripolii* – *Phragmitetum communis* (courbe 2 – avec 7 ROIs et 748 pixels) et la Phragmitaie oligohaline (courbe 3 – avec 12 ROIs et 1 831 pixels). Les doubles flèches verticales indiquent les amplitudes des valeurs de réflectance pour les 3 communautés végétales. Diagramme a : spectres en réflectance brut. Diagramme b : spectres après normalisation du bleu de la végétation

La **figure 41** illustre les spectres de réflectance pour le *Carici divisae* – *Lolietum perennis* et le *Trifolio maritimi* – *Oenanthe silaifoliae*. De la même manière que pour l'exemple précédent, les spectres de réflectance de ces deux associations végétales présentent de nombreuses similitudes. La courbe moyenne (plus ou moins l'écart-type) est identique pour ces deux communautés végétales dans la partie visible du spectre. La principale différence vient de la hauteur du plateau infrarouge mais les deux associations végétales présentent la même profondeur de bande d'absorption de l'eau des feuilles.

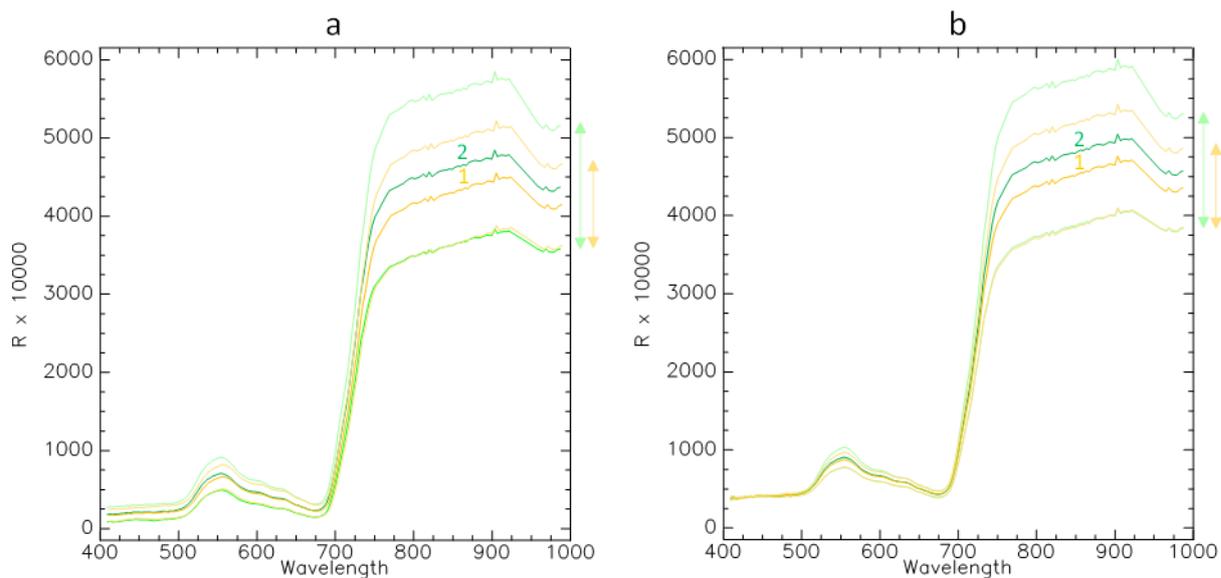


Figure 41. Spectres de réflectance moyens (courbes foncées) encadrés par les écart-types (courbes claires) pour le *Carici divisae* – *Lolietum perennis* (courbe 1 – avec 23 ROIs et 2 162 pixels) et le *Trifolio maritimi* – *Oenanthetum silaifoliae* (courbe 2 – avec 66 ROIs et 22 849 pixels). Les doubles flèches verticales indiquent les amplitudes des valeurs de réflectance pour les 2 communautés végétales. Diagramme a : spectres en réflectance brut. Diagramme b : spectres après normalisation du bleu de la végétation

Néanmoins, comme le montre la [figure 42](#), certaines unités élémentaires se différencient clairement par leur signature spectrale. C'est le cas par exemple du *Glycerietum aquaticae* et du *Scirpetum lacustris*, deux associations végétales appartenant à la même alliance phytosociologique (*Phragmition communis*).

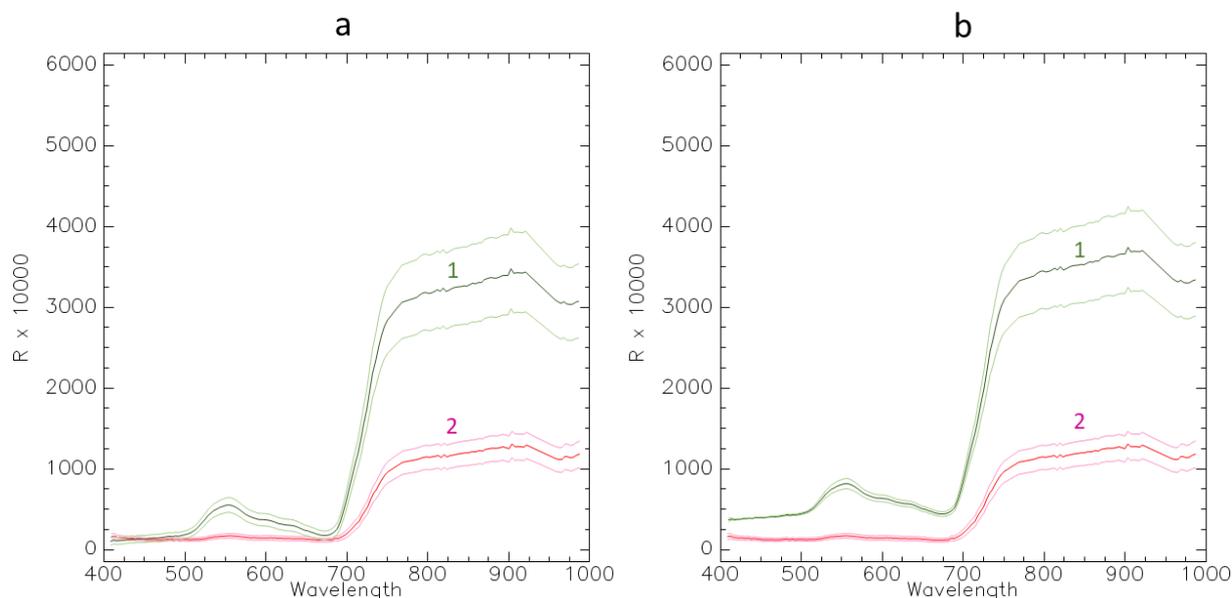


Figure 42. Spectres de réflectance moyens (courbes foncées) encadrés par les écart-types (courbes claires) pour le *Glycerietum aquaticae* (courbe 1 – avec 11 ROIs et 6 118 pixels) et le *Scirpetum lacustris* (courbe 2 – avec 2 ROIs et 106 pixels). Diagramme a : spectres en réflectance brut. Diagramme b : spectres après normalisation du bleu de la végétation.

La classification de Test 2 contribue à limiter le nombre d'unités élémentaires avec des PA et UA inférieurs à 80% (60 unités pour PA et 14 unités pour UA). L'apport des nouvelles variables permet d'obtenir 43 unités présentant un PA supérieur à 90%. Parmi les nouvelles unités qui arrivent à ce niveau de précision, plusieurs concernent des habitats prairiaux et des habitats de roselières. Par exemple, la 'Phragmitaie oligohaline' progresse significativement avec une amélioration de 16.4% entre les deux images (74.2% de PA pour Test 1 et 90,7% de PA pour Test 2). La progression la plus importante concerne l'*Eleocharito palustris* – *Oenanthe fistulosae* (faciès à *Juncus acutiflorus*) qui passe de 4,9% à 63% de PA entre les deux analyses (+58%), témoignant ainsi d'une sensibilité importante aux nouvelles variables de l'image. Désormais, 10 unités élémentaires affichent un PA de 100%, dont notamment l'*Honckenyetum latifoliae* (+13,3%) ou l'*Ulici europaei* – *Prunetum spinosae* (+4,3%).

Finalement, la classification de Test 3 améliore encore d'avantage la précision de la classification pour la majorité des unités élémentaires. Pour cette analyse, plus de la moitié des unités ont une précision PA et UA supérieure à 90% (66/127 pour PA et 125/127 pour UA). Par exemple, le *Typhetum latifoliae* et l'*Eleocharito palustris* – *Oenanthe fistulosae* atteignent ce niveau de précision grâce aux variables apportées par le LIDAR avec respectivement une progression de +32.7% et +21% de PA. La progression la plus importante concerne l'*Alnenion glutinoso* – *incanae* dont l'intégration des variables MNT et HVeg a permis une progression de 56% de PA. Pour cette analyse, le nombre d'unité avec un PA de 100% est similaire à la classification du Test 2.

2.3.3.2 Contribution des différentes variables au succès des classifications

La contribution des différentes variables pour les classifications des 3 images (Test 1, Test 2 et Test 3), d'après le MDG, est présentée dans la **figure 43**. Pour l'image Test 1, les premières variables sont EVI, B11, B12, S2REP, B2 et GNDVI. Pour l'image Test 2 les variables les plus contributives sont B2, IdsWaterVG, NDGI, EVI, TND_Cellulose, SWIR_ect, B12, NDI45 et B11. Enfin, les résultats pour l'image Test 3 font apparaître une contribution très importante des variables dérivées du LIDAR, avec premièrement la topographie (MNT) et deuxièmement la hauteur de la végétation (HVeg), suivis par B11, EVI, B12, MCARI, NDI45 et S2REP.

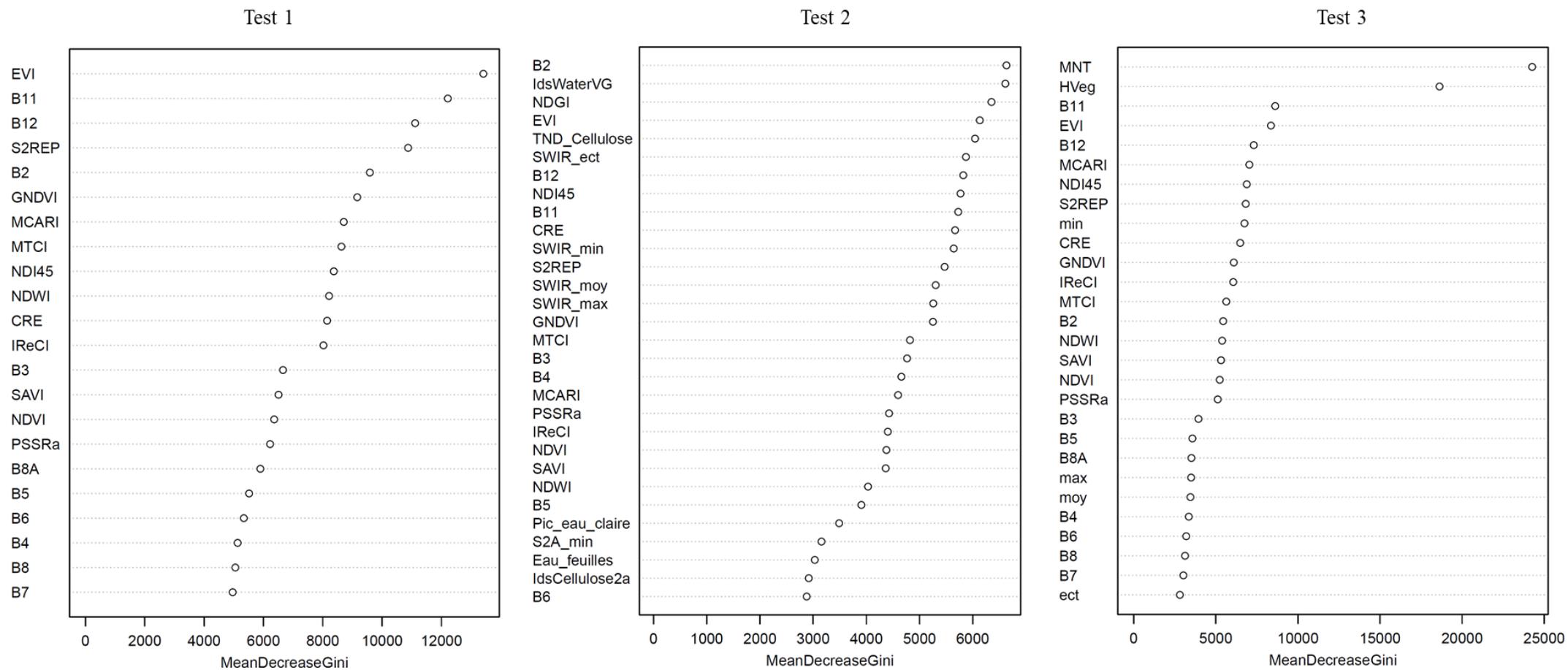


Figure 43. Contribution des différentes variables aux résultats des classifications Random Forest pour les trois ensembles de données Test 1, Test 2 et Test 3, selon la mesure de diminution moyenne de Gini (MeanDecreaseGini)

2.3.3.3 Résultats à l'échelle des typologies d'habitats

L'évaluation de la qualité de la modélisation pour la prédiction des habitats EUNIS, 'Cahiers d'habitats' et EUR28 a été réalisée en agrégeant les unités élémentaires correspondant à une même catégorie d'habitat, en suivant les correspondances du [tableau 27](#). Ce travail a uniquement été effectué à partir de l'image Test 3, c'est-à-dire celle ayant présenté les meilleurs résultats de classifications des unités élémentaires (OA 94.5% - Kappa 0.94).

Les trois matrices de confusion exposant les résultats de la modélisation de l'image Test 3 à l'échelle des trois référentiels d'habitats (EUNIS, 'Cahiers d'habitats' et EUR28) sont présentées dans les [tableaux 35, 36 et 37](#). Pour finir, la carte des habitats (EUNIS / EUR28) issue de la classification de l'ensemble de l'image est présentée dans la [Fig. 44](#).

À l'échelle des habitats EUNIS, plus de la moitié des habitats présentent des précisions du producteur et de l'utilisateur supérieures à 90% (PA : 47 habitats sur 74 et UA : 67 habitats sur 74), dont 9 avec une valeur de PA égale 100% et 16 avec une valeur de UA égale à 100%. La majorité des autres habitats montre des taux de précisions légèrement inférieurs (compris généralement entre 70% et 90%), mais certaines valeurs indiquent des confusions plus importantes, avec notamment 3 habitats en dessous de 50% de PA (A2.5311 'Prés salés atlantiques à *Juncus gerardii*', A2.531A 'Jonchaies atlantiques à *Juncus maritimus*' et G1.A61 'Ormaies à *Ulmus minor*'). À noter que ces derniers sont notamment caractérisés par un faible nombre de pixels d'apprentissages (< à 20 pixels).

À l'échelle des 'Cahiers d'habitats', 13 habitats sur 23 présentent une précision du producteur supérieure à 90% dont 4 affichent une valeur de 100% tels que le 1310-4 'Pelouses rases à petites annuelles subhalophiles' ou le 92D0-3 'Galeries riveraines à *Tamaris*'. Les précisions de l'utilisateur indiquent également de bons résultats avec 19 habitats au-dessus 90% dont 5 à 100%. Néanmoins, certains habitats montrent des confusions plus importantes, comme le 1330-3 'Prés salés du haut schorre' (44.7% de PA) ou le 2130-2 'Dunes grises des côtes atlantiques' (50% de PA).

À l'échelle des habitats EUR28, la majorité des habitats possèdent des précisions PA et UA supérieures à 90%, tels que le 91E0 'Forêts alluviales à *Alnus glutinosa* et *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*)' ou le 1410 'Prés salés méditerranéens

(*Juncetalia maritimi*)'. Les confusions les plus importantes concernent le 2130 'Dunes côtières fixées à végétation herbacée ("dunes grises")' et le 91F0 'Forêts mixtes de *Quercus robur*, *Ulmus laevis*, *Ulmus minor*, *Fraxinus excelsior* ou *Fraxinus angustifolia* riveraines des grands fleuves (*Ulmenion minoris*)' avec respectivement 50% et 73.9% de PA.

couvrir au total plus de 3 400 ha (Tab. 38). Les habitats prairiaux sont également très présents, avec notamment l'E3.41 'Prairies atlantiques et subatlantiques humides' qui est l'habitat le plus cartographié sur la zone d'étude (6 519 ha). Les 'Pâturages permanents mésotrophes et prairies de post-pâturage' (E2.1) et les 'Gazons inondés et communautés apparentées' (E3.44) correspondent plus particulièrement à des prairies pâturées qui se rencontrent régulièrement sur l'estuaire de la Loire avec respectivement 767 ha et 569 ha modélisés. La répartition des roselières et des mégaphorbiaies est essentiellement le long du fleuve ou plus en retrait, au fond de certains marais longuement inondés. La résolution spatiale d'1m permet une représentation très détaillée des habitats des fourrés et forêts, visibles notamment à travers le réseau dense de haies bocagères qui quadrillent les prairies. De la même manière, les habitats aquatiques sont très bien représentés ce qui fait ressortir précisément les nombreux canaux qui parcourent la plaine alluviale et les petits plans d'eau et mares d'abreuvement réparties régulièrement au sein des prairies. Les habitats les moins hygrophiles (telles que l'habitat E1.91 'Pelouses siliceuses d'espèces annuelles naines' ou l'habitat E1.E 'Pelouses xériques piétinées à espèces annuelles') restent localisés aux secteurs les plus élevés de la zone d'étude, situés sur des remblais sableux en bord de Loire ou sur les coteaux qui bordent le site. De ce fait, leurs surfaces restent peu étendues avec 52 ha pour l'E1.91 et 13 ha pour l'E1.E. Les habitats les plus rares sont certains types de prés salés (comme l'A2.5312 'Prés salés atlantiques à *Plantago maritima*' ou l'A2.5271 'Fourrés argentés'), la dune blanche (B1.3211), les formations à *Pteridium aquilinum* (E5.3) et les ormaies à *Ulmus minor* (G1.A61) qui sont tous uniquement représentés par des surfaces inférieures à 0.1 ha. Pour finir, l'examen visuel de la carte montre localement la présence de défauts (pointés par les flèches rouges sur la figure 44), liés aux problèmes de recouvrement de certaines lignes de vol (des coups de vent lors de l'acquisition) qui ont engendré des lacunes dans la mosaïque d'images.

Tableau 38. Surfaces des habitats EUNIS cartographiées à partir de l'image Test 3. Les codes correspondent aux identifiants des habitats EUNIS et les correspondances avec les habitats EUR28 sont indiquées entre parenthèses (les noms des espèces correspondent à des subdivisions de certains habitats). Pour le détail des intitulés des habitats, voir le tableau 27.

Code EUNIS	Surface (ha)	Code EUNIS	Surface (ha)	Code EUNIS	Surface (ha)	Code EUNIS	Surface (ha)
E3.41	6519.4	C1.33 (3150)	196.2	E3.441	42.8	B1.311 (2110)	8.9
X01	4036.2	F9.3131 (92D0)	187.7	E2.6	42.8	C3.24B	8.5
A2.523 (1410)	3419.0	A2.552 (1310)	154.3	H5.61	35.6	G1.C4	6.4
C3.21	866.1	C	145.9	E5.1	33.7	C3.232	6.2
E2.1	767.0	C3.26	121.3	J4.2	29.1	C1.221 (3150)	3.4
<i>Fraxinus sp.</i>	602.0	<i>Ludwigia sp.</i>	110.2	G1.211 (91E0)	27.7	B1.42 (2130)	2.3
E3.44	596.3	C3.6	110.1	C3.1	25.7	C3.231	1.1

<i>Quercus robur</i>	530.9	E3.512 (6410)	108.8	J2.53	23.5	F3.141	0.6
A2.3 (1130)	495.9	D5.21	104.0	E5.412 (6430)	21.9	<i>Robinia pseudoacacia</i>	0.6
E3.44XA2.5	433.8	G1.C1	74.3	E2.8	20.6	F3.15	0.5
C3.27	399.1	A2.542 (1330)	72.5	A2.2 (1130)	19.1	C1.2411	0.3
A2.5319	394.5	E	61.6	E2.2	18.0	?C1.54/?X03?	0.3
A2.511 (1330)	281.5	A2.5512 (1310)	57.1	II.51	17.4	A2.531A (1330)	0.1
F3.1112	258.4	E1.91	52.2	II.1	15.0	A2.5312 (1330)	0.03
G1.1111 (91E0)	246.3	C3.5	50.7	E2.1XE5.1	14.8	B1.3211 (2120)	0.03
F9.2	224.0	G3.F12	48.2	E1.E	12.8	A2.5271 (1330)	0.02
C3.251	214.7	A2.512 (1330)	46.3	E5.4112 (6430)	12.1	E5.3	0.005
E3.417	200.2	C3.24A	45.9	C3.22	11.6	G1.A61	0.003
F9.121	199.2	A2.5513 (1310)	45.5	E3.42	9.5	A2.5311 (1330)	0.0001

2.3.4 Effet du nombre de pixels d'apprentissages sélectionné sur la précision des différentes unités cartographiées

De manière générale, il y a une certaine relation entre le nombre de pixels d'apprentissage et le niveau de précision de la modélisation de chaque habitat (Fig. 45 et Fig. 46). Ainsi, les habitats possédant un grand nombre ROIs obtiennent des taux de précision du producteur très élevés. C'est par exemple le cas de l'habitat A2.523 'Prés salés ras méditerranéens à *Juncus*, *Carex*, *Hordeum* et *Trifolium*' ou l'habitat E3.41 'Prairies atlantiques et subatlantiques humides' qui possèdent le plus de ROIs et obtiennent des PA supérieurs à 95% pour les classifications des images satellites et aéroportées. A l'inverse, les habitats présentant les niveaux de précision du producteur les moins élevés ont régulièrement peu de zones d'apprentissage. C'est par exemple le cas de l'habitat E3.512 'Prairies acidoclines à Molinie bleue' avec 20 pixels d'apprentissage et un PA de 75% pour la classification des images Sentinel-2 (Fig. 45). Les mêmes observations sont également faites sur les résultats de la classification des images aéroportées avec par exemple l'habitat A2.5311 'Prés salés atlantiques à *Juncus gerardii*' avec seulement 4 pixels ROIs et 0% de PA (Fig. 46). Cependant, certains habitats avec peu de zones d'apprentissage sont très bien modélisés en raison de leurs signatures spectrales spécifiques, qui sont très différentes de celles des autres habitats. C'est notamment le cas de l'habitat E5.412 'Mégaphorbiaies occidentales némorales rivulaires dominées par *Filipendula*' pour la classification Sentinel-2 (21 pixels et 100% PA) ou pour l'habitat B1.311 'Dunes embryonnaires atlantiques' (30 pixels et 100% de PA) pour la classification des images aéroportées.

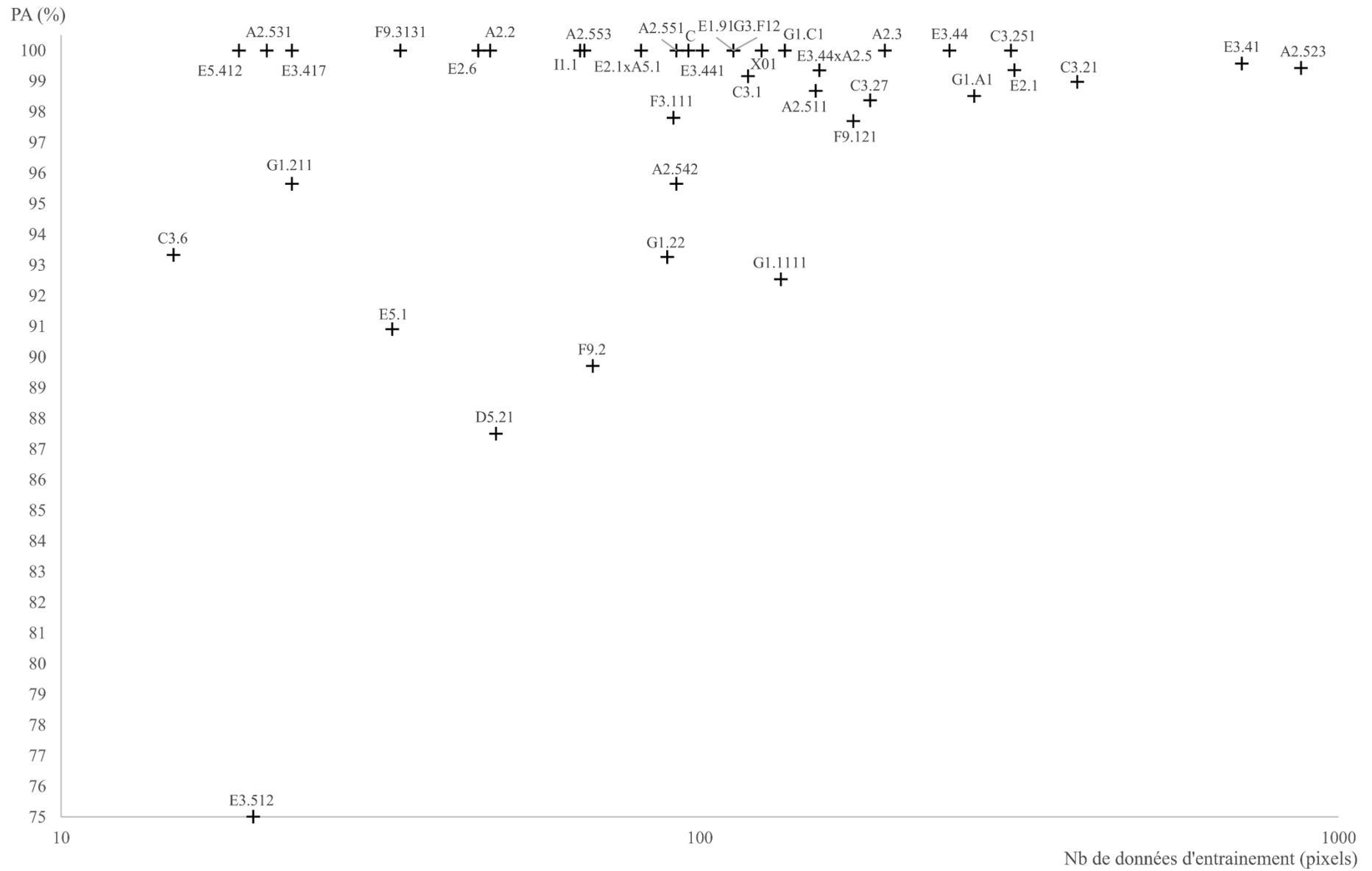


Figure 45. Relation entre le nombre de zones d'entraînement et la précision du producteur (PA) pour les 39 habitats EUNIS cartographiés avec les images satellites Sentinel-2 (l'abscisse est en échelle logarithmique)

2.3.5 Comparaison des différentes approches de cartographies des habitats

La **figure 48** représente la cartographie des habitats EUR28 modélisés à partir des deux types d'images de télédétection (satellite Sentinel-2 et aéroportée hyperspectrale + LiDAR) et la **figure 47** indique leurs superficies cartographiées (selon l'emprise commune des deux cartes).

Globalement, l'examen visuel des cartes permet de constater un bon niveau de concordance entre les classifications des deux images. L'habitat 1130 'Estuaire' qui correspond aux plages et vasières intertidales, apparaît clairement sur les rives de la Loire, en particulier à l'aval de la zone d'étude. Les surfaces cartographiées pour cet habitat sont assez proches selon les deux types d'images, avec 648 ha pour l'imagerie Sentinel-2 et 514 ha avec les données aéroportées. Les prés salés les plus halophiles (habitats 1310 et 1330) sont présents sur les bords de Loire à l'aval de l'estuaire (notamment visibles sur les zooms ouest des cartes - **figure 48**) tandis que les prairies subhalophiles (habitat 1410 'Prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)') sont présentes sur une très grande partie de la zone d'étude. Ces dernières correspondent à l'habitat d'intérêt communautaire le plus étendu sur le site avec 4 452 ha cartographiés avec les images Sentinel-2 et 3 419 ha à partir des images aéroportées. Les habitats dunaires (habitats 2110, 2120 et 2130) ont uniquement été cartographiés à partir des images aéroportées en raison de leur présence très ponctuelle sur l'estuaire de la Loire. Les résultats de la cartographie confirment les faibles superficies occupées par ces habitats avec seulement une dizaine d'hectare de végétation dunaire répertoriée au total. Pour les mêmes raisons, l'habitat aquatique 3150 'Lacs eutrophes naturels avec végétation du *Magnopotamion* ou de l'*Hydrocharition*' n'a pu être cartographié qu'à partir des images aéroportées. Cet habitat, principalement constitué par les réseaux de canaux qui parcourent les marais, couvre plus de 200 ha sur l'ensemble de la zone d'étude. Les résultats de la cartographie de l'habitat 6410 'Prairies à *Molinia* sur sols calcaires, tourbeux ou argilo-limoneux (*Molinion caeruleae*)' montrent des différences importantes entre les images Sentinel-2 (8 ha) et les images aéroportées (109 ha). Ce différentiel élevé entre les superficies cartographiées peut être mis en relation avec les niveaux de confusions importants constatés pour cet habitat (75% et 86.8% de PA respectivement pour les images Sentinel-2 et aéroportées) qui tend à être confondus avec d'autres types de prairies (notamment E3.41 'Prairies atlantiques et subatlantiques humides'). Les mégaphorbiaies (habitat 6430) sont assez rares sur le site avec seulement 14 ha cartographiés avec les images Sentinel-2 et 34 ha avec les données aéroportées. Elles se développent principalement en linéaire le long de la Loire et des étiers à l'amont du site ce qui justifie les superficies plus importantes cartographiées avec

les images aéroportées à très haute résolution spatiale. Pour finir, les habitats d'intérêt communautaire de fourrés et forêts (92D0, 91E0 et 91F0) présentent également d'importantes différences dans leur cartographie selon les types d'images utilisées, avec à chaque fois davantage de surfaces recensées avec les images aéroportées. L'habitat 92D0 'Galeries et fourrés riverains méridionaux (*Nerio-Tamaricetea* et *Securinegion tinctoriae*)' est principalement présent à l'aval de l'estuaire grâce à sa tolérance au sel, tandis que les habitats 91E0 'Forêts alluviales à *Alnus glutinosa* et *Fraxinus excelsior* (*Alno-Padion*, *Alnion incanae*, *Salicion albae*)' et 91F0 'Forêts mixtes de *Quercus robur*, *Ulmus laevis*, *Ulmus minor*, *Fraxinus excelsior* ou *Fraxinus angustifolia* riveraines des grands fleuves (*Ulmenion minoris*)' sont essentiellement visibles à l'amont du site. Par rapport aux résultats de l'analyse des images Sentinel-2, la carte issue de la classification des images aéroportées fait régulièrement apparaître ces habitats sous la forme de réseaux linaires de haies.

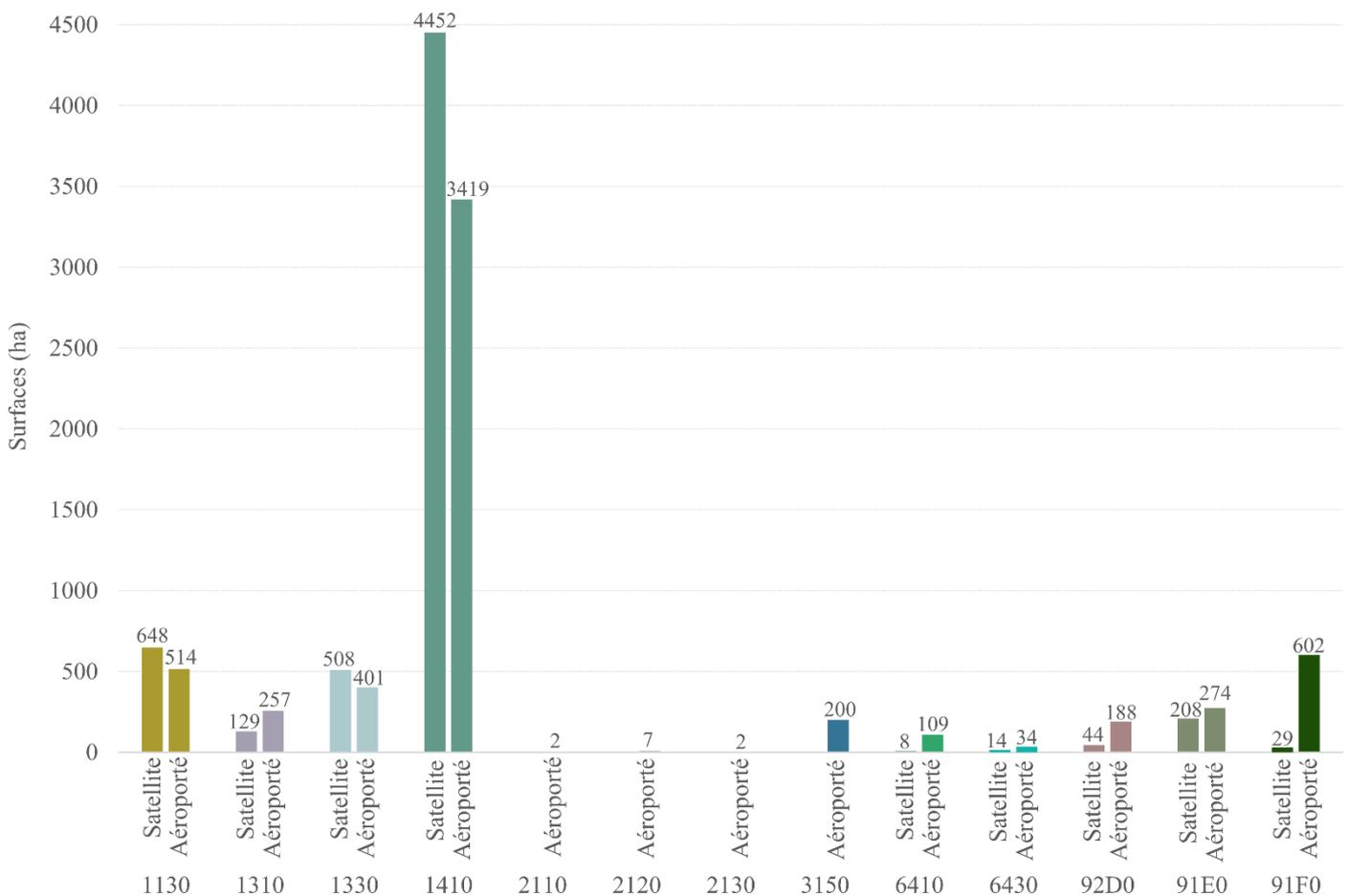


Figure 47. Diagramme des surfaces couvertes par les habitats EUR28 sur les cartes produites à partir des images satellites Sentinel-2 et des données aéroportées (hyperspectral + LiDAR). Les calculs des surfaces ont uniquement été réalisés sur l'emprise commune aux deux types d'image

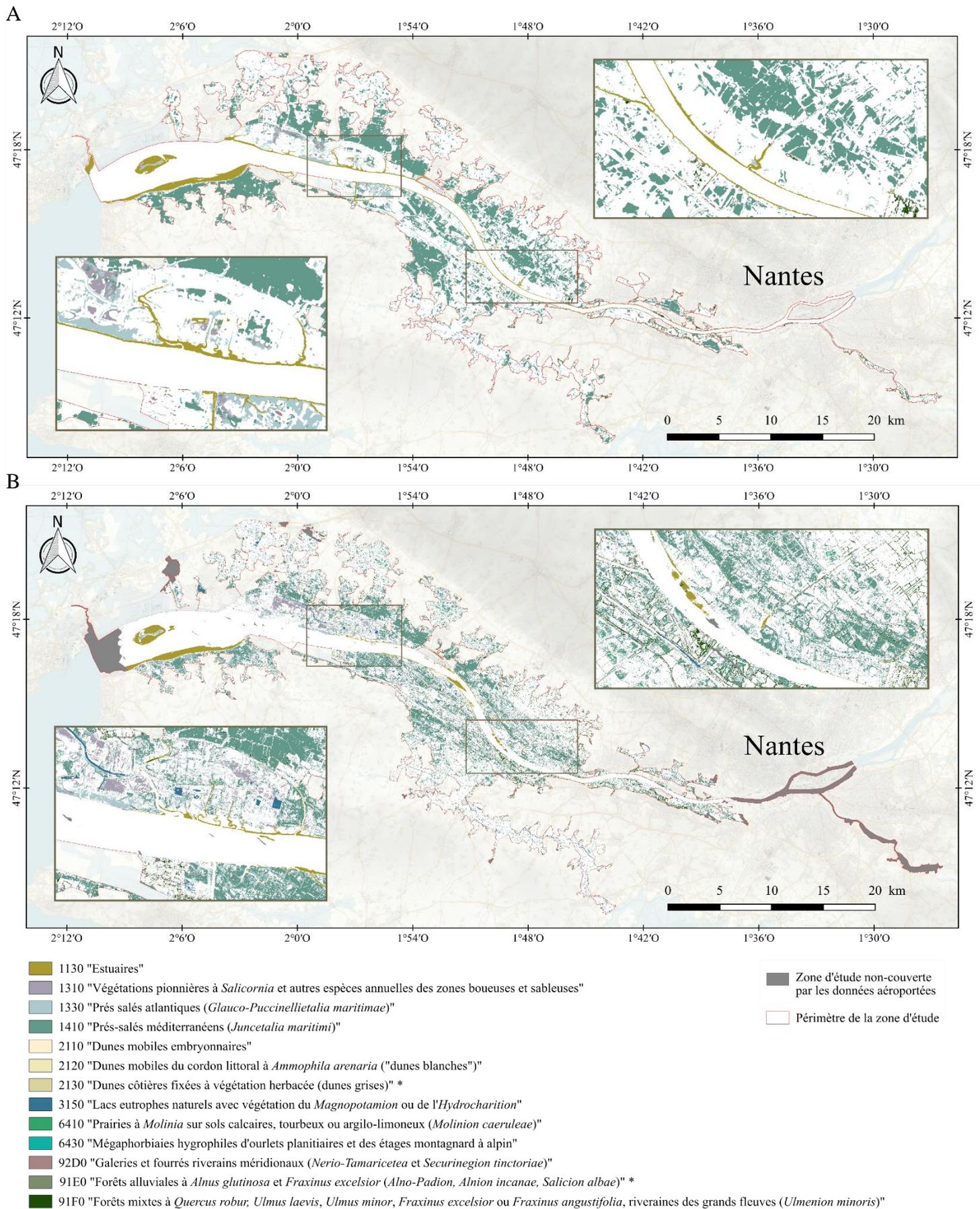


Figure 48. Cartes des habitats d'intérêt communautaire (EUR28) de l'estuaire de la Loire. A) Cartographie issue de la classification multi-dates d'images Sentinel-2. B) Cartographie réalisée par l'analyse des données aéroportées (hyperspectrales + LiDAR). Le symbole '*' indique les HIC prioritaires

La **figure 49** montre une comparaison entre les résultats de la cartographie des habitats d'un secteur de l'estuaire de la Loire (Ile de la Motte) issue (1) de la méthode traditionnelle de terrain ; (2) de la classification des images multi-dates Sentinel-2 et (3) de l'analyse des données aéroportées.

L'analyse visuelle des cartes obtenues par ces trois méthodes différentes fait apparaître pour chacune d'entre-elles la phragmitaie (habitat EUNIS C3.21) comme l'habitat le plus étendu avec une localisation sur une bande s'étendant du nord-ouest au sud-est de l'île. La carte de terrain et la carte réalisée avec les images aéroportées, permettent d'obtenir un niveau de détail supplémentaire qui montre la présence sur cette zone d'autres types de roselières (C3.251 'Glycériaies' et D5.21 'Communautés de grands Carex (magnocariçaies)') ou des mégaphorbiaies (E5.412 'Mégaphorbiaies occidentales némorales rivulaires dominées par *Filipendula*'). A l'inverse, les habitats des fourrés et forêts sont essentiellement cartographiés le long de la rive sud de l'Ile de la Motte. Parmi ceux-ci, l'habitat G1.22 'Forêts mixtes de *Quercus-Ulmus-Fraxinus* des grands fleuves' est dominant sur la carte de terrain, et correspond globalement aux zones cartographiées comme '*Fraxinus*' sur la carte issue de la classification des images aéroportées. Les saulaies blanches (EUNIS G1.1111) sont davantage représentées sur la carte réalisée avec les images Sentinel-2, tout comme les fourrés à *Salix triandra* (EUNIS F9.121) qui ponctuent régulièrement la phragmitaie située au nord sur les 3 cartes.

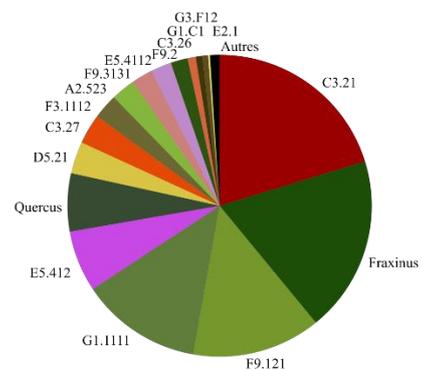
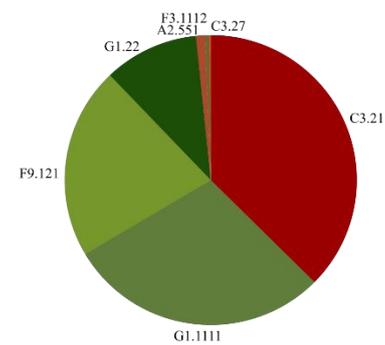
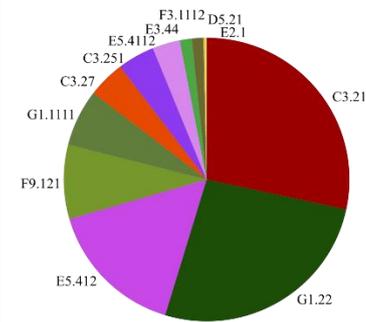
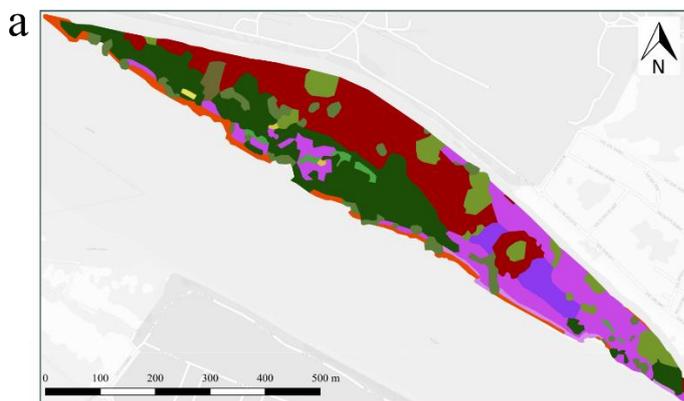
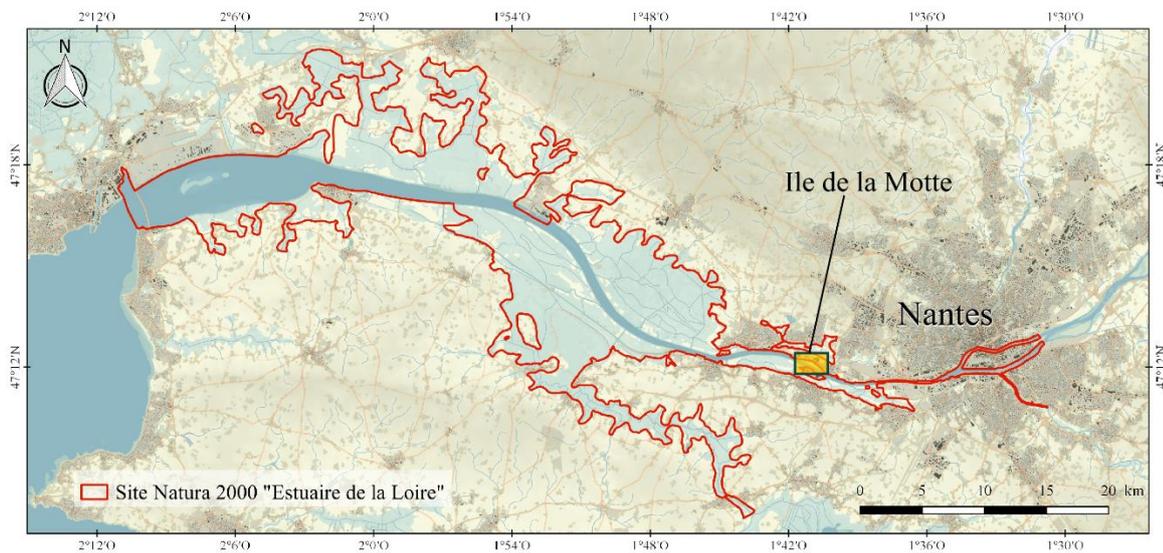


Figure 49. Cartes des habitats de l’Ile de la Motte. a) Cartographie par la méthode classique réalisée par un bureau d’étude en 2016 (Hardy Environnement 2016) ; b) Cartographie issue de la classification multi-dates d’images Sentinel-2 ; c) Cartographie réalisée par l’analyse des données aéroportées (hyperspectrales + LiDAR). Les diagrammes représentent la proportion du site couverte par les différents habitats. Les codes correspondent aux identifiants EUNIS (pour le détail des intitulés complets des habitats, voir le tableau 27)

2.4 Discussion

2.4.1 Influence des différentes dimensions des données de télédétection pour la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire

La qualité des classifications d'images de télédétection dépend notamment des caractéristiques des images utilisées, comme par exemple le nombre de bandes spectrales disponibles, le niveau de résolution spatiale, ou la fréquence d'acquisition du capteur (Legleiter et al. 2002; Ichter et al. 2014; Dronova 2015). Dans notre étude, nous avons travaillé à partir de données de télédétection présentant des caractéristiques complémentaires : des images satellites Sentinel-2 et des images aéroportées hyperspectrales et LiDAR. De cette manière, nos expérimentations nous ont permis de couvrir les principales dimensions offertes par les données de télédétection actuelles, à savoir les différents niveaux (1) de résolution spatiale, (2) de dimension spectrale, (3) la résolution temporelle et (4) la résolution tridimensionnelle.

2.4.1.1 Résolution spatiale

L'utilisation de deux sources d'images avec des résolutions spatiales différentes (acquisition satellitaire avec des pixels de 10m et acquisition aéroportée avec des pixels d'1m) nous a permis de constater l'effet de la taille des pixels sur la sélection des données d'apprentissages. Nos résultats ont notamment fait apparaître les limites de la résolution spatiale des images Sentinel-2 pour envisager une cartographie exhaustive des habitats identifiés sur le site. Plusieurs habitats n'ont pas pu être sélectionnés à l'intérieur de pixels de 100m² car cette résolution est insuffisante pour intégrer les unités typologiques occupant des surfaces réduites. Cela a conduit à n'utiliser qu'une typologie partielle des habitats par rapport à la typologie initiale présentée dans le chapitre 1. Pour l'analyse de ces images, la typologie retenue correspondait à 39 habitats EUNIS sur les 89 habitats recensés, soit 44% de la totalité des habitats recensés. C'est notamment le cas des habitats caractérisés par des végétations aquatiques (par exemple, C1.221 'Couvertures de lentilles d'eau' ou C1.33 'Végétations immergées enracinées des plans d'eau eutrophes'), peu répandues sur le site et occupant de faibles superficies, n'ont pas pu être représentées dans la cartographie finale. De la même manière, plusieurs végétations caractérisant des habitats littoraux (par exemple, l'*Euphorbia portlandicae* - *Helichryson stoechadis* ou l'*Atriplicion littoralis*) sont trop ponctuelles sur l'estuaire de la Loire pour pouvoir constituer des pixels purs de 100m². De plus, cette résolution spatiale n'a pas pu faire apparaître certains détails dans l'organisation spatiale des habitats, comme les réseaux linaires

de haies et canaux. C'est également ce qui a été mis en évidence à travers la comparaison des cartes de l'Île de la Motte, avec la difficulté de représenter certaines mégaphorbiaies et petites roselières au sein de la phragmitaie. Ces observations rejoignent les conclusions de plusieurs études utilisant l'imagerie Sentinel-2 (Immitzer et al. 2016; Calleja et al. 2019; Rapinel et al. 2019) ou de travaux de recherche ayant utilisé d'autres données satellitaires avec des résolutions spatiales limitées comme par exemple Spot-5 (Sellin et al. 2015) ou MODIS (Rapinel et al. 2018a).

A l'inverse, la résolution spatiale d'1m des images aéroportées hyperspectrales et LiDAR a permis d'intégrer la quasi-totalité des unités élémentaires de la typologie initiale (74 habitats EUNIS sur les 89 habitats de la typologie initiale). C'est le cas de plusieurs végétations littorales comme l'*Honckenyetum latifoliae* ou l'*Euphorbio paraliae - Ammophiletum arenariae* qui s'expriment uniquement sur des surfaces réduites sur le site Natura 2000 (Biotope 2007; Chagneau et al. 2010). De la même manière, la précision spatiale des images était suffisante pour sélectionner des pixels d'apprentissage pour les végétations de mégaphorbiaies qui se développent le plus souvent en linéaire le long des cours d'eau comme le *Calystegio sepium - Angelicetum heterocarpae* (De Foucault 2011; Cianfaglione & Bioret 2018). Il était d'autant plus important de sélectionner ces végétations qu'elles caractérisent des habitats relevant de la directive Habitat-Faune-Flore. L'augmentation de la résolution spatiale apportée par les images aéroportées était essentielle pour envisager la cartographie de plusieurs HIC supplémentaires (au total 4 habitats EUR28 de plus qu'avec les images Sentinel-2, soit 13 habitats EUR28 sur 17). Néanmoins, nous n'avons pas pu sélectionner de ROIs pour l'ensemble des unités élémentaires, pour plusieurs raisons :

- L'absence de données suffisamment récentes pour certaines unités typologiques. Cette situation concerne le plus souvent les végétations annuelles pionnières au développement éphémère (par exemple le *Lythro portulae - Damasonietum alismatis* ou les tapis immergés de charophytes). L'expression de ces végétations est très variable d'une année sur l'autre ce qui implique l'utilisation de données très récentes pour la sélection de ROIs lors de la classification des images. De plus, lorsque ces végétations ont été identifiées à partir de relevés phytosociologiques anciens (issues des données bibliographiques) leur présence aujourd'hui ne peut être certifiée. Des prospections de terrain complémentaires seront nécessaires pour ces unités afin de confirmer leur

présence et de collecter des données exploitables comme source d'apprentissage pour la classification des images de télédétection.

- L'existence de communautés végétales avec un développement intervenant sur une autre période de l'année que celle de l'acquisition des images. Comme précédemment, cette situation concerne des végétations annuelles pionnières. C'est par exemple le cas du *Chenopodio chenopodioidis* - *Crypsietum aculeatae* qui s'exprime au sein de marres temporaires asséchées en été. De ce fait, cette communauté végétale n'est généralement observable qu'à partir du mois d'août (Guitton & Terrisse 2015). L'utilisation d'images printanières ne permet pas d'envisager la cartographie de cette communauté végétale. A cette période, leurs localités correspondent à des plans d'eau, parfois couvert de végétations aquatiques (par exemple, le *Ranunculetum baudotii*). Des images acquises à d'autres périodes de l'année sont nécessaires pour cartographier ce type de végétation.
- La présence de végétations s'exprimant sur des surfaces très réduites (< 1m²). Bien que l'utilisation de données aéroportées à la résolution spatiale d'1m ait permis d'augmenter considérablement le nombre d'unités typologiques constituant des pixels purs (en comparaison avec les données satellites Sentinel-2), certains types de végétation n'ont pas pu être sélectionnés à cause de leur développement trop ponctuel. Il s'agit par exemple du *Festucetum littoralis*, limité à la partie supérieure de quelques microfalaises érodées des rives de la Loire, ou du *Sagittario sagittifoliae* – *Sparganietum simplicis* observé uniquement sur le terrain au niveau d'une seule station très ponctuelle.
- L'absence de critères d'identification adaptés à la télédétection pour certains habitats. C'est par exemple le cas de l'habitat EUNIS X03 'Lagunes littorales saumâtres' (correspondant à l'habitat EUR28 1150 'Lagunes côtières') qui correspond à des plans d'eau ayant un fonctionnement lagunaire, c'est-à-dire présentant des apports périodiques d'eau de mer suivi d'un passage par une phase d'hypersalinisation par évaporation (Bensettiti et al. 2004). Ces plans d'eau peuvent potentiellement héberger des communautés végétales aquatiques (par exemple le *Parvopotamo* – *Zannichellietum pedicellatae* ou le *Ruppium maritima*), mais leur présence n'est pas caractéristique de l'habitat, ce qui ne leur confère aucun caractère indicateur pour l'identification de ces lagunes. Le critère d'identification de cet habitat, basé uniquement sur un

fonctionnement hydrologique, ne semble pas adapté à l'analyse d'images annuelles hyperspectrales et LiDAR.

Comme nous l'avons montré, l'utilisation d'images à très haute résolution spatiale (THRS) présente l'avantage d'envisager la réalisation d'une cartographie quasi-exhaustive des habitats de l'estuaire de la Loire, grâce à la possibilité de sélectionner des ROIs pour la plupart des unités élémentaires de la typologie initiale. De plus, ces images permettent une représentation très détaillée de l'organisation spatiale des habitats, avec par exemple, l'intégration de changements d'habitats liés aux variations subtiles de la microtopographie ou selon des intensités de pâturage différentes. Cette précision spatiale était indispensable pour cartographier certains habitats, comme l'habitat 6430-5 'Mégaphorbiaies oligohalines' qui se développe principalement de manière linéaire le long des berges de la Loire (Lacroix et al. 2009). Cet avantage de la THRS a également été démontré dans de nombreuses études, permettant notamment de différencier la végétation jusqu'au niveau d'espèces individuelles (Laba et al. 2008; Yan et al. 2019; Shi et al. 2021).

Cependant, l'utilisation d'images THRS entraîne certaines contraintes qui peuvent affecter les résultats des classifications. En effet, la précision spatiale de l'image provoque très fréquemment une hétérogénéité des réponses spectrales enregistrées pour des pixels correspondant à une même unité typologique. Ces variations locales sont inhérentes à ce type d'image et représentent un problème courant de l'imagerie THRS. Elles peuvent être liées à des différences d'illumination du couvert végétale à cause d'ombres portées (Waser et al. 2014; Mostafa & Abdelhafiz 2017; Prošek et al. 2020) ou apparaître en raison de la diffusion spéculaire du feuillage (Launeau et al. 2017). Ces variations peuvent également traduire des différences d'états physiologiques des espèces végétales (Peñuelas & Filella 1998), ou des stades phénologiques plus ou moins avancés d'une même végétation (comme nous l'avons montré pour les communautés à *Phragmites australis*). Cette hétérogénéité des réponses spectrales est également liée la variabilité intra-unité qui apparaît lorsque les surfaces des unités de végétation sur le terrain sont beaucoup plus grandes que la taille des pixels (Hamada et al. 2007; Zhang & Xie 2013; Dronova 2015). Cette situation s'observe pour les communautés végétales s'exprimant sur plusieurs mètres carrés et composées de nombreuses espèces avec un assemblage parfois en patches. C'est par exemple le cas du *Trifolium maritimi* – *Oenanthe silaifoliae* pour lequel il existe parfois des 'banquettes à Trèfles' correspondant à des faciès à

Trifolium squamosum ou à *T. michelianum* (De Foucault 1984). De ce fait, les réponses spectrales peuvent être différentes en fonction de la plus ou moins grande abondance de certaines espèces au sein des pixels sélectionnés (Millard & Richardson 2015; Rapinel et al. 2018b).

Afin de limiter cette contrainte, nous avons fait le choix de subdiviser les unités typologiques pour tenir compte de certains faciès de la végétation. Grâce à cette approche, nous avons notamment distingué les phragmitaies en pleine croissance (au feuillage vert) de celles encore sèches de l'année précédente (feuillage blanchâtre). Les premières se distinguaient par leur signature spectrale (pic de réflectance dans le vert, plateau infrarouge élevé et bande d'absorption bien marquée à 970 nm liée présence d'eau dans les feuilles) typique d'une végétation saine (Peñuelas et al. 1993; Bannari et al. 1995). A l'inverse, les secondes étaient caractérisées par un spectre très différent avec une réflectance plus marquée dans le visible, liée à la disparition des pigments, et un abaissement du plateau infrarouge à cause de la faible teneur en eau des feuilles. Nous avons démontré avec cet exemple l'intérêt de distinguer certains faciès de la végétation pour que la moyenne des valeurs spectrales des ROIs sélectionnés puisse être significative. C'est également pour cette raison que nous avons préféré sélectionner individuellement des pixels pour les différentes espèces qui composent certaines végétations de fourrés et forêt. Par exemple, pour le fourré à Prunellier et Ronces (habitat EUNIS F3.1112), nous avons distingué les pixels de *Rubus sp.* et les pixels de *Prunus spinosa* lors de la sélection des ROIs. Ces différentes subdivisions peuvent ensuite être rassemblées à l'issue des classifications des images pour retrouver les niveaux hiérarchiques supérieurs de la typologie (unités élémentaires, habitats EUNIS, habitats EUR28...).

Néanmoins, malgré ces prédispositions, il existait des niveaux d'hétérogénéités plus ou moins importants des réponses spectrales selon les unités typologiques. Ce phénomène a entraîné la présence de nombreux pixels 'artéfacts' dans la cartographie des habitats produite avec les images aéroportées hyperspectrales et LiDAR. Ces effets de chatoiement, entraînent un aspect visuel 'poivre et sel' qui est une contrainte régulièrement rencontrée dans les classifications d'images THRS (Bradter et al. 2019; Frati et al. 2020). Pour limiter cet effet, un processus de post-classification basé sur un filtre majoritaire a été utilisé pour éliminer les pixels isolés (outil 'Majority filter' de SAGA sous QGIS (Conrad et al. 2015)).

D'autres méthodes d'analyses pourraient être envisagées pour réduire le bruit et améliorer le niveau de précision des classifications des images THRS. Par exemple, l'utilisation de méthodes de classification basées sur les objets ou approches 'orientée-objet' (OBIA - Object-based Image Analysis) qui est particulièrement adaptée lorsque les pixels des images sont plus petits que les unités à cartographier (Puissant et al. 2014; Rapinel et al. 2015b; Prošek et al. 2020). Avec cette approche, les pixels ne sont pas uniquement classés à partir de leurs valeurs spectrales, mais ils sont également regroupés en objets sur la base de critères de forme, de texture et de voisinage (Blaschke 2010). Les méthodes orientée-objet permettent ainsi de réduire l'effet 'poivre et sel' lié aux variations locales des valeurs spectrales des pixels. Par ailleurs, plusieurs auteurs ont conclu que l'OBIA pouvait permettre d'améliorer la précision des classifications (Kamal & Phinn 2011; Kim et al. 2011). D'autres auteurs ont utilisé des méthodes de rééchantillonnage des pixels vers des dimensions supérieures pour obtenir une meilleure correspondance avec la taille des unités à cartographier. Cette approche a notamment été testée avec succès pour la cartographie de prairies en Grande-Bretagne (Bradter et al. 2019) ainsi que pour la classification de la couverture terrestre d'une ville en Chine (Luo et al. 2015).

2.4.1.2 Résolution spectrale

De nombreuses études ont souligné l'importance des caractéristiques des capteurs quant au nombre de bandes spectrales, leur largeur, et leur emplacement dans le spectre (Stratoulis et al. 2015; Vanden Borre et al. 2017; Onojeghuo & Onojeghuo 2017; Bradter et al. 2019). L'utilisation d'images multispectrales Sentinel-2 et d'images hyperspectrales aéroportées (Test 1 et Test 2) a permis d'évaluer l'effet de différentes résolutions spectrales pour la cartographie des habitats.

Dans un premier temps, nous avons pu constater qu'avec des caractéristiques spectrales similaires, les précisions globales des classifications à dates uniques des images satellites et la classification de l'image aéroportée multispectrale (image Test 1) étaient du même ordre de grandeur. Ainsi les classifications RF des données satellites Sentinel-2 présentaient des précisions globales allant de 76,47% à 87,28% pour les analyses d'images à dates uniques (avec une typologie correspondant à 39 habitats EUNIS sur les 89 identifiés sur le site) tandis que la simulation d'une image Sentinel-2 à la résolution d'1m avec les données aéroportées (74 habitats EUNIS sur les 89 identifiés sur le site) montrait une précision globale de 80,7%.

Dans un second temps, l'utilisation des informations apportées par le MDG a permis de révéler les variables les plus contributives pour les classifications de ces images. Les bandes spectrales B11 et B12 apparaissaient comme très performantes pour les deux types d'images. Ces bandes spectrales situées dans le moyen infra-rouge (SWIR) sont notamment caractérisées par une sensibilité à la teneur en eau des surfaces terrestres (Psomas et al. 2011; Middleton et al. 2012) et aux contenus biochimiques tels que la lignine et la cellulose dans les couverts végétaux (Fourty et al. 1996). Les bandes SWIR se révèlent particulièrement utiles pour la cartographie des zones humides pour lesquelles les communautés végétales sont marquées par des gradients d'inondation (Rapinel et al. 2019). La bande B5, située au début de la courbure du red-edge (704.1 nm), représentait également une variable importante lors des classifications des images satellites. Cette région spectrale est également caractérisée par l'indice S2REP (Sentinel-2 red-edge position) qui est apparu comme très contributif pour la discrimination des habitats avec l'image Test 1. Le red-edge est particulièrement sensible aux variations de la concentration en chlorophylle (Curran et al. 1990; Sims & Gamon 2002; Clevers & Gitelson 2012), et a notamment montré son efficacité pour la discrimination des végétations de prairies (Pinar & Curran, 1996; Shoko & Mutanga, 2017). L'intérêt des régions spectrales SWIR et red-edge pour la cartographie des végétations des zones humides a également été démontré dans plusieurs études précédentes (Dronova et al. 2012; Franke et al. 2012; Dronova 2015). L'indice de végétation EVI est ressorti comme la première variable lors de l'analyse de l'image Test 1. Cet indice a également participé aux bons résultats de la classification de l'image satellite du 06 juillet 2019. L'EVI caractérise le contenu pigmentaire des feuilles avec l'utilisation des bandes B2, B4 et B8 (Cole et al. 2014). De la même manière, la bande B2 (située dans la partie bleu-vert du spectre), qui caractérise la concentration de certains pigments (chlorophylles et caroténoïdes) (Peñuelas & Filella 1998), était une variable importante dans les classifications des images satellites et de l'image Test 1. Le GNDVI (basé sur les bandes NIR (B8) et vert (B3)) s'est également révélé être un indice de végétation très contributif pour la classification des deux types d'images. Il est une variation du NDVI mais s'avère plus sensible aux changements de la teneur en chlorophylle des plantes (Gitelson et al. 1996). Le GNDVI a notamment permis d'assurer une bonne distinction entre les habitats végétalisés et non végétalisés, caractérisés respectivement par des valeurs élevées et des valeurs faibles de l'indice. De manière générale, nous constatons que la plupart des bandes spectrales disponibles avec la constellation Sentinel-2 participent au succès des classifications. Ainsi, nos résultats confirment l'intérêt des différentes régions spectrales ciblées par les concepteurs de Sentinel-2

(EADS Astrium Satellites) pour la cartographie de la végétation (Grabska et al. 2019; Fauvel et al. 2020).

Néanmoins, bien que nos résultats montrent qu'il est possible d'obtenir des classifications assez performantes avec un nombre limité de bandes spectrales, de nombreuses confusions persistent. Elles sont notamment liées à des réponses spectrales très proches entre plusieurs unités élémentaires de la typologie. C'est notamment le cas des différents types de phragmitaies (*Phragmitetum communis*, *Astero tripolii* – *Phragmitetum communis* et Phragmitaie oligohaline) qui présentent des spectres de réflectance très similaires. Cette proximité spectrale s'explique par la composition floristique de ces trois communautés végétales qui est marquée par la très grande dominance de *Phragmites australis* (Dupont 1978; Delcoigne & Thébaud 2018). De la même manière, certaines prairies comme les communautés subhalophiles du *Carici divisae* – *Lolietum perennis* et du *Trifolio maritimi* – *Oenanthetum silaifoliae* possèdent des réponses spectrales quasi-identiques. Ces deux associations végétales partageant un pool d'espèces très important (*Agrostis stolonifera*, *Hordeum secalinum*, *Carex divisa*...) (De Foucault & Catteau 2012). Les différences de composition floristique entre ces deux types de prairies sont liées aux pratiques de gestion : le *Carici divisae* – *Lolietum perennis* est une prairie pâturée qui se distingue du *Trifolio maritimi* – *Oenanthetum silaifoliae* (prairie fauchée) par la régression de certaines espèces comme *Anacamptis laxiflora*, *Lychnis flos-cuculi* ou *Alopecurus pratensis* sous l'effet du pâturage (de Foucault 1984). Ces différences floristiques sont peu marquées sur l'estuaire de la Loire, en raison d'une gestion majoritairement 'mixte' des prairies, associant sur une même parcelle une période de pâturage (avant et/ou après) la fauche printanière (Chambre d'agriculture de Loire-Atlantique et al. 2013). Ces difficultés de séparabilité spectrales pour certains types de végétations entraînent d'importants effets de sur-représentations ou sous-représentations pour de nombreux habitats dans les cartes prédictives. De ce fait, la qualité de ces cartes s'avère peu satisfaisante pour un usage dans le cadre de la gestion du site Natura 2000.

Pour pallier ces difficultés, l'utilisation de données à haute résolution spectrale (images hyperspectrales) s'avèrent le plus souvent nécessaire pour obtenir des signatures spectrales précises des différentes unités à cartographier (Dalponte et al. 2013). Cependant, l'utilisation de données hyperspectrales conduit à obtenir des images très volumineuses avec de nombreuses bandes spectrales fortement corrélées entre elles (Marcinkowska-Ochtyra et al. 2018). Ces images sont affectées par 'la malédiction de la dimensionnalité' ou phénomène de Hughes qui

correspond à la complexité d'extraire des informations essentielles dans des données composées de nombreuses variables présentant une certaine redondance (Bellman 1961; Hughes 1968). Cette caractéristique a notamment pour conséquence d'augmenter la durée d'exécution des algorithmes et potentiellement d'altérer les performances des analyses (Millard & Richardson 2015; Asir et al. 2016; Rana & Venkata Suryanarayana 2020).

Pour réduire la dimensionnalité des deux images VNIR et SWIR acquises sur l'estuaire de la Loire, nous avons choisi de travailler uniquement à partir de 11 indices à bandes étroites. Le calcul d'indices spectraux présentent l'avantage de combiner plusieurs bandes spectrales au sein d'un calcul mathématique qui génère un nombre limité de variables physiquement significatives (Delegido et al. 2011; Roberts et al. 2011). En complément, le calcul de statistiques descriptives a contribué à synthétiser les informations contenues dans ces images en un nombre réduit de variables. De cette manière, nous avons créé l'image Test 2 qui, grâce à l'apport d'informations spectrales supplémentaires, a présenté des résultats supérieurs à Test 1 (avec respectivement 86,6% d'OA et 80,7% d'OA).

Dans le détail, le MDG a fait notamment apparaître une contribution importante de certains indices dérivés des données hyperspectrales :

- l' 'IdsWaterVG' qui très sélectif pour la teneur en eau des feuilles ;
- le 'NDGI' qui évalue la pente du plateau infrarouge et caractérise la texture des feuilles et de leur assèchement ;
- et le 'TND_Cellulose' combinant trois sauts des spectres en marches d'escalier du SWIR vers le NIR et qui est très marqué par la cellulose gorgée d'eau présentant un pic vers 1 081 nm.

En complément, les variables descriptives de l'image SWIR (hors normalisation des indices trop sensibles aux défauts d'acquisition) apparaissaient également comme toutes très contributives :

- le 'SWIR_ect' qui va avoir tendance à être plus élevé en présence de cellulose,
- le 'SWIR_min' qui apporte un contraste entre (1) l'eau libre, avec une réflectance toujours proche de zéro, (2) les sols avec une réflectance intermédiaire dans le moyen infrarouge et (3) la végétation qui est bien visible grâce à la teneur en eau des feuilles.
- le 'SWIR_moy' qui montre également un contraste bien marqué entre les sols, la végétation et l'eau libre,

- le 'SWIR_max' qui apporte de la même manière du contraste entre les grands types de couvertures terrestres (eau libre, sols, végétation), en ciblant davantage les sols nus.

Ainsi, ces observations confirment l'intérêt des variables spectrales situées dans le moyen infra-rouge, dont l'importance avait déjà été mise en évidence avec l'analyse des données Sentinel-2.

Grâce à l'intégration de variables spécifiques dérivées des images hyperspectrales, le niveau de confusion a été considérablement réduit pour de nombreuses unités typologiques, en particulier pour celles caractérisant des habitats prairiaux et des habitats de roselières. Ainsi, notre approche de réduction de la dimensionnalité, basée sur le calcul d'indices spectraux et de statistiques descriptives, apparaît comme un choix pertinent pour améliorer la classification des habitats de l'estuaire de la Loire.

Cependant, d'autres techniques de réduction de la dimensionnalité existent et leur mise œuvre pourrait constituer une perspective à notre travail. Par exemple, certaines études ont utilisé l'Analyse en Composante Principale (ACP) pour transformer les bandes spectrales en de nouvelles composantes décorréélées. Les composantes de l'ACP sont ordonnées en fonction de la proportion de variance qu'elles contiennent (Hotelling 1933; Deng et al. 2008). La transformation des données dans l'analyse comprime les données en éliminant la redondance et les informations non pertinentes. L'utilisation uniquement des premières composantes permet d'intégrer la majorité de la variance cumulée de l'image hyperspectrale. Par exemple, Marcinkowska-Ochtyra et al. (2018) ont appliqué cette technique pour l'analyse d'une image hyperspectrale à 252 bandes acquise dans les Giant Mountains à la frontière entre la République Tchèque et la Pologne. Leur étude a montré qu'une transformation de l'image avec les 40 premières composantes de l'ACP permet de réduire significativement la taille de l'image tout en conservant les informations les plus intéressantes. Ainsi, la comparaison des résultats des classifications de l'image originale (252 variables) et de l'image transformée par l'ACP (40 variables) permet de constater des niveaux de précisions similaires (légèrement supérieurs avec la transformation ACP).

Une autre méthode couramment utilisée pour réduire le nombre de bandes d'une image hyperspectrale est le Maximum Noise Fraction (MNF) qui ordonne les composantes par leur

rapport signal sur bruit (Green et al. 1988; Valero & Ceamanos 2016). Le MNF présente l'avantage de supprimer le bruit inhérent à l'imagerie hyperspectrale (Zhang & Xie 2013). Burai et al. (2015) ont appliqué une transformation MNF sur une image hyperspectrale à 128 bandes acquise sur un marais alcalin en Hongrie. Les auteurs de cette étude ont ensuite comparé les différences de précision entre une classification SVM sur l'ensemble des bandes de l'image originale et une classification sur uniquement les 9 premières bandes MNF. Leurs résultats montrent l'apport de la réduction de la dimensionnalité MNF sur la qualité de la modélisation, avec une amélioration de plus de 5% de la précision globale (OA).

L'algorithme Recursive Feature Elimination (RFE) représente une autre technique de sélection des variables les plus importantes (Asir et al. 2016). Cette approche élimine progressivement les bandes spectrales les moins performantes au cours d'itérations successives de modélisations à partir d'algorithmes d'apprentissage tels que RF ou SVM. Radecka et al. (2019) ont utilisé la méthode RFE pour sélectionner les variables les plus contributives à partir d'un jeu de données combinant une image hyperspectrale et des caractéristiques dérivées de données LiDAR sur des prairies calcaires en Pologne. Cette procédure a permis aux auteurs de retenir seulement 24 variables sur les 177 contenues dans le jeu de données initial. Finalement, l'analyse de cet ensemble optimal de caractéristiques avec RF a permis d'obtenir une classification de plusieurs espèces arbustives et arborées (Kappa : 0,68).

Cependant, malgré le détail de l'information contenu dans l'imagerie hyperspectrale, la séparabilité spectrale des végétations reste délicate dans certains cas. Elles concernent le plus souvent des associations végétales caractérisées par une composition floristique très proches (par exemple entre l'*Astero tripolii* – *Phragmitetum communis* et le *Phragmitetum communis*) ou entre le *Carici divisae* – *Lolietum perennis* et le *Trifolio maritimi* – *Oenanthetum silaifoliae*). L'absence de cortèges floristiques suffisamment différenciés entre ces associations végétales entraîne des réponses spectrales très similaires (même à partir d'images hyperspectrales), témoignant des limites de l'utilisation de données optiques passives pour une cartographie détaillée de la végétation, en particulier à l'échelle de l'association végétale.

2.4.1.3 Résolution temporelle

La contribution de l'effet de la temporalité a pu être évaluée à partir des analyses d'images satellites Sentinel-2. Avec ces images, nous avons notamment montré qu'il était possible

d'obtenir des niveaux de classification satisfaisants en utilisant une seule date d'acquisition, mais avec des précisions variables selon les dates d'acquisition des images. L'analyse des niveaux de précision (OA) obtenus pour 11 dates retenues au cours d'une année nous a permis de déterminer les périodes de l'année les plus favorables pour obtenir une bonne discrimination des habitats. Bien que les différences de précisions globales étaient peu marquées entre les dates ($\Delta=11\%$), nous avons constaté que les images acquises au printemps et en été donnaient les résultats les plus performants. Ainsi, l'image du 6 juillet 2019 affichait les meilleurs résultats avec une précision globale de 87.74%. Cette période de l'année est notamment marquée par des variations phénologiques rapides de la végétation (apparition des feuilles, floraisons) liées à l'augmentation de la durée des jours et des températures (Meier 1997), ainsi que par le retrait des eaux d'inondations hivernales en raison notamment de l'évapotranspiration et la gestion hydraulique des marais (Reed 1993). Durant cette période de croissance maximale de la végétation, l'expression des cortèges pigmentaires des plantes est la plus marquée favorisant la discrimination des habitats (Addabbo et al. 2016).

Cependant, bien que les analyses individuelles d'images aient permis d'obtenir des niveaux de précision intéressants, le traitement d'un ensemble de caractéristiques multi-dates a amélioré considérablement la justesse de la modélisation des habitats avec un OA de 98.8% et un Kappa de 0.99. La PA et l'UA étaient à 100% pour de nombreux habitats témoignant d'une exactitude parfaite entre les données de référence et les données modélisées. Pour les autres habitats, la PA et l'UA étaient toujours très proches de 100% indiquant respectivement de faibles niveaux de sur-représentativité ou de sous-représentativité dans la cartographie finale. Les variations au cours du temps des valeurs de réflectance et d'indices traduisent les changements physiologiques des plantes (composition pigmentaire, structure interne des tissus des plantes) et permettent de différencier les habitats selon leur composition floristique (Cole et al. 2014). Le gain de précision apporté par une classification multi-dates vis-à-vis de classification à dates uniques ont été démontré par de nombreux auteurs (Feret et al. 2015; Belgiu & Csillik 2018; Raab et al. 2018). Par exemple, Rapinel et al. (2019) ont mis en avant l'apport d'une série chronologique Sentinel-2 pour différencier les communautés végétales de marais en fonction des différences de durée des crues et les variations des modalités de gestion (fauche, pâturage). De la même manière, l'évolution de ces paramètres au cours de notre période d'étude a contribué au succès de la classification des habitats de l'estuaire de la Loire. Ainsi, l'analyse d'une série temporelle d'images Sentinel-2 permet de compenser la faible résolution spectrale de ces images en comparaison de données hyperspectrales (Fauvel et al. 2020).

2.4.1.4 Dimension tridimensionnelle

L'acquisition de données LiDAR nous a permis d'obtenir des informations précises sur la topographie du site d'étude (MNT) ainsi qu'une connaissance fine des différentes hauteurs de la végétation (HVeg). La précision de cette dernière variable est liée à la combinaison du MNC (utilisé classiquement dans le cadre d'études forestières) avec la largeur du retour d'onde, qui s'est avéré indispensable pour la détection des végétations basses. L'intégration du MNT et de HVeg avec les données dérivées de l'image hyperspectrale a donné l'image Test 3. La classification RF de cette dernière image a fait progresser de manière significative les résultats par rapport aux analyses d'images basées uniquement sur des variables spectrales (respectivement +7.9% et +13.8% d'OA par rapport aux images Test 2 et Test 1). Le MDG a révélé la contribution largement supérieure des deux variables dérivées du LiDAR par rapport aux variables spectrales, avec en première position le MNT, suivi de HVeg.

L'apport de ces caractéristiques tridimensionnelles a amélioré la précision de classification de nombreuses unités typologiques, comme des roselières (*Typhetum latifoliae*), des prairies (*Eleocharito palustris* – *Oenanthetum fistulosae*) ou des forêts (*Alnenion glutinoso* – *incanae*). Les végétations de la plaine alluviale de l'estuaire de la Loire sont notamment régies par des gradients d'inondations qui conditionnent leur répartition selon les variations topographiques (Dupont et al. 1983; Magnanon 1991). Une connaissance fine des variations d'altitude constitue une donnée essentielle pour discriminer les différentes communautés végétales et plusieurs auteurs ont montré l'intérêt d'utiliser un MNT pour la cartographie de la végétation (Moeslund et al. 2011; Rapinel et al. 2015a; Richardson & Millard 2018; Ward et al. 2013). L'apport de la variable MNT dans l'image Test 3 a contribué à améliorer la discrimination de certaines unités typologiques présentant des réponses spectrales proches, mais marquées par des positionnements topographiques différents. De plus, de nombreuses communautés végétales se distinguent par leurs différences de hauteurs de végétation, allant des prés salés et pelouses de quelques centimètres de haut (*Parapholido strigosae* – *Hordeetum marini*, *Puccinellietum maritimae*), aux roselières et mégaphorbiaies s'élevant à 2-3 mètres (*Astero tripolii* – *Phragmitetum communis*, *Calystegio sepium* – *Angelicetum heterocarpae*), jusqu'aux fourrés et forêts dépassant les 5 mètres de hauteur (*Solano dulcamarae* – *Tamaricetum*, *Salicion albae*). La variable HVeg dérivées du LiDAR s'est avérée précieuse pour mieux distinguer les différentes unités typologiques. Les données sur la hauteur de végétation ont également été utilisées avec succès par Mücher et al. (2015) pour la cartographie d'habitats de landes et de

forêts aux Pays-Bas, ou pour individualiser des roselières au Royaume-Uni par [Onojeghuo & Blackburn \(2011\)](#). Les données LiDAR présentent également l'avantage de réduire les erreurs de classifications liées à la présence d'ombres portées sur les images hyperspectrales ([Wu et al. 2014](#); [Liu et al. 2017](#)). Ces informations étaient particulièrement importantes pour la classification de nos images en raison des variations importantes de l'éclairage solaire lié à des périodes de vols s'étalant du matin jusqu'à l'après-midi. L'ensemble de ces observations témoigne de l'intérêt d'associer des données LiDAR avec des données hyperspectrales pour la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire et rejoint les conclusions d'études comparables soulignant les limites des cartographies n'utilisant que des données optiques passives ([Fieber et al. 2013](#); [Luo et al. 2015](#); [Prošek et al. 2020](#)).

2.4.2 Influence des vecteurs d'acquisition des données

Dans le cadre de nos expérimentations, nous avons travaillé à partir d'images provenant de deux vecteurs d'acquisitions différents (le satellite et l'avion) nous permettant d'évaluer les avantages et les inconvénients liés à ces plateformes.

L'utilisation des données satellites Sentinel-2 a permis d'obtenir plusieurs images sans nuages, régulièrement réparties au cours d'une année de végétation. Cet avantage est lié à la fréquence de revisite élevée des deux satellites de la constellation Sentinel-2 (5 jours à l'équateur) qui augmente la probabilité d'acquisition de scènes sans nuages ([Drusch et al. 2012](#); [Vrieling et al. 2018](#)). Ces caractéristiques ont été utilisées pour réaliser une classification multi-dates d'images qui a montré des résultats très performants. La constitution de séries temporelles denses est facilitée par l'imagerie satellitaire, dont l'intérêt pour la cartographie de la végétation a été démontré par de nombreux auteurs ([Kolecka et al. 2018](#); [Fauvel et al. 2020](#); [Fenske et al. 2020](#)). De plus, la grande superficie couverte par les dalles de donnée Sentinel-2 a nécessité uniquement l'utilisation de deux images pour couvrir l'ensemble du site Natura 2000. Ces caractéristiques, partagées par de nombreux capteurs satellites, permettent facilement de travailler sur de grands territoires en limitant les opérations de mosaïquage d'images, parfois associées à des variations de conditions atmosphériques ou d'angles de prise de vue qui peuvent entraîner des erreurs de classifications ([Onojeghuo & Onojeghuo 2017](#); [Wittke et al. 2019](#)). Un autre avantage apporté par l'utilisation des images Sentinel-2 est la possibilité de travailler directement sur des images prétraitées. Actuellement, les images sont disponibles dans un

niveau de prétraitement 2A qui intègre notamment les corrections géométriques et atmosphériques (Louis et al. 2019). Un autre intérêt essentiel aux données Sentinel-2 est leur mise à disposition gratuitement par l'Agence Spatiale Européenne grâce à la politique d'ouverture des données adoptée pour le programme Copernicus pour un accès facilité à l'ensemble des utilisateurs (Drusch et al. 2012).

L'ensemble de ces caractéristiques a contribué à produire une carte des principaux habitats du site Natura 2000, de manière rapide et à moindre coût. Cependant, l'une des principales limites constatées était la résolution spatiale trop grossière qui s'avérait insuffisante pour intégrer les unités typologiques occupant des surfaces réduites. L'utilisation de données satellitaires avec une très haute résolution spatiale pourrait être envisagée pour pallier ces difficultés. C'est le cas par exemple de QuickBird (2,4 m en multispectral - 0,6 m en panchromatique), Worldview-2 (2 m en multispectral et 0,5 en panchromatique), kompsat-2 (4 m en multispectral et 1 en panchromatique) ou Pléiades (2 m en multispectral et 0,5 en panchromatique). Laba et al. (2008) ont montré le potentiel de QuickBird pour la cartographie de plusieurs espèces de zones humides telles que *Trapa natans*, *Phragmites australis*, et *Lythrum salicaria*. Les images Worldview-2 ont été utilisées pour la cartographie de la végétation de marais littoraux par Rapinel et al. (2014) et par Strasser & Lang (2015) pour la cartographie de forêts alluviales en Autriche. Plus récemment, les images Pléiades ont été utilisées pour la cartographie de végétations aquatiques (Espel et al. 2020), de prés salés (Yeo et al. 2020) ou de marais inondés (Murgues et al. 2014). Bien que ces études ont pu montrer des résultats intéressants pour la cartographie de végétations spécifiques, leur résolution spectrale limitée (entre 4 et 8 bandes) paraît peu compatible pour produire une cartographie détaillée d'un ensemble complexe de végétations aux signatures spectrales très similaires (Dalponte et al. 2013).

L'utilisation d'images aéroportées est une alternative courante à l'imagerie satellitaire. L'avantage d'une acquisition par avion est de pouvoir enregistrer des images à faible altitude, augmentant mécaniquement la résolution spatiale des données acquises. En France, la BD ORTHO® de l'IGN visible et infrarouge (0,5 m de résolution) constitue une source donnée aéroportée multispectrale THRS couramment utilisée, et dont le potentiel pour la cartographie automatique de la végétation a notamment été évalué par Sellin et al. (2015) dans le nord-ouest de la France et testé sur l'estuaire de la Loire en 2012 (SIRS 2012). Néanmoins, la réalisation de campagnes aéroportées est le plus souvent réservée à des études locales nécessitant l'acquisition d'images spécifiques, comme par exemple des données hyperspectrales ou LiDAR

(Dashti et al. 2019; Prošek et al. 2020; Frati et al. 2020). Les résultats de nos expérimentations à partir de ce type d'images ont mis en évidence l'intérêt de combiner des données associant de la haute résolution spatiale, de la haute résolution spectrale et de l'information tridimensionnelle.

Bien que les images aéroportées présentent de nombreuses caractéristiques intéressantes pour la cartographie de la végétation, leur acquisition est soumise à un certain nombre de contraintes :

- Elles constituent une source de données relativement coûteuse, en comparaison à l'imagerie satellitaire (Onojeghuo & Onojeghuo 2017). Ainsi, dans le cadre de ce projet, le coût complet de l'acquisition s'est élevé à 28 848 € T.T.C. Ce prix intégrait l'ensemble des frais liés à la mission (préparation du vol, installation du matériel, survol du site, extraction des données...). Le coût d'une acquisition aéroportée est principalement lié à la durée du vol qui dépend de la superficie et de la configuration de la zone d'étude (Sławik et al. 2019). L'utilisation d'un avion léger (ULM) est une alternative intéressante par rapport à l'avion avec une heure de vol à 200 € au lieu de 1000 € (com. pers. Launeau). Pour limiter les coûts, le survol de l'estuaire de la Loire a été optimisé afin de réduire au minimum le temps d'acquisition. Malgré ces dispositions, la campagne aéroportée a nécessité plus de 10 heures de survol, impliquant une intervention sur 3 jours.
- L'exécution du vol nécessite des conditions météo sans nuages qui sont parfois difficiles à réunir sur plusieurs journées consécutives. Le respect de cet impératif a conduit à annuler la campagne aéroportée de 2018 à cause de l'absence d'une fenêtre météo favorable pendant la période de vol envisagée.
- L'évolution des conditions d'illumination solaire pendant une acquisition sur plusieurs heures entraîne régulièrement des gradients de luminosité entre les lignes de vol et à l'intérieur de celles-ci (Jänicke et al. 2020). L'apparition de ce type d'effets directionnels, à l'origine du blanchiment de certaines lignes de vols, étaient particulièrement visibles sur nos images à cause d'enregistrements effectués du matin à l'après-midi avec un éclairage solaire passant du sud-est au sud-ouest au fil des heures. De plus, ces effets ont été amplifiés en raison de l'orientation des lignes de vols dans un axe nord-ouest/sud-est, en lien avec la stratégie d'optimisation du temps de vol. Ces variations

d'illuminations ont été partiellement corrigées grâce à l'alignement des réflectances dans le bleu (correction rapide). Cependant, une partie de l'hétérogénéité des intensités de réflectance n'a pu être supprimée ce qui a pu nuire à la comparaison spectrale de pixels appartenant à une même unité typologique. Ce problème est à l'origine de certaines erreurs de classification observable sur la carte finale.

- Le mosaïquage de nombreuses lignes de vol (67 pour noter étude) acquises sur plusieurs journées et dans des conditions d'illumination variables est complexe. Des difficultés ont notamment été rencontrées pour la jonction de certaines lignes de vols en raison de la présence d'ombres portées à 90° l'une de l'autre, lié à des images acquises entre le début et la fin de journée du premier et dernier jour.

Enfin, et bien que nous ne l'ayons pas expérimenté au cours de ce projet, le drone constitue un autre vecteur d'acquisition régulièrement utilisé en télédétection. L'utilisation des drones s'est particulièrement développée depuis ces dernières années, notamment pour leur capacité à produire des images avec une résolution spatiale de quelques centimètres carrés (Colomina & Molina 2014; Baena et al. 2017). L'intérêt des images acquises par des drones pour la cartographie a notamment été démontré sur des végétations aquatiques en Suède par Husson et al. (2017) ou sur des végétations arbustives en République tchèque par (Prošek & Šimová 2019). Bien que ces études aient montré des résultats encourageants pour l'identification de certaines végétations spécifiques, l'utilisation d'images de drone donne parfois des résultats peu performants. En effet, le plus souvent, les capteurs embarqués sur les drones ne permettent qu'une acquisition d'images avec un nombre limité de bandes spectrales. Ces caractéristiques sont la plupart du temps insuffisantes pour la cartographie des habitats de zones humides constituées de communautés végétales floristiquement proches (Hladik et al. 2013). Cependant la technologie des drones connaît un développement rapide, avec la possibilité aujourd'hui d'équiper ces appareils de capteurs LiDAR, multispectrales ou hyperspectrales. L'imagerie hyperspectrale issues de drones est une technologie encore récente dont l'application pour la cartographie des zones humides a notamment été évaluée par Ma et al. (2016) en Chine ou Li et al. (2017) à Hong Kong. L'acquisition de ce type données reste limitée en raison du poids des capteurs hyperspectraux et de leur capacité réduite d'enregistrement (Dronova et al. 2021). De plus, l'utilisation des drones en télédétection est restreint à des territoires peu étendus en raison de leur faible autonomie de vol (Colomina & Molina 2014).

2.4.3 Contribution de la richesse des données de terrain

L'utilisation d'un nombre important de données de terrain apparaît essentielle pour assurer des niveaux de précisions élevés dans la classification des images de télédétection (Calleja et al. 2019; Yeo et al. 2020). Plusieurs auteurs insistent sur la nécessité d'utiliser de nombreux relevés pour établir une typologie complète des habitats (Chytrý et al. 2016; Rodwell et al. 2018). Pour nos analyses, nous nous sommes appuyés sur un important jeu de données de relevés phytosociologiques pour entraîner l'algorithme RF pour la classification des images. L'utilisation de nombreux relevés de terrain s'est avérée indispensable pour localiser et échantillonner précisément les zones d'apprentissage afin d'optimiser les classifications des images (Millard & Richardson 2015). Grâce à la richesse des données de terrain, le nombre de ROIs sélectionnés était d'autant plus élevé que l'habitat était répandu sur le site, ceci afin d'améliorer sa caractérisation et d'apprécier sa variabilité (Colditz 2015; Raab et al. 2018).

D'une manière générale, nous avons constaté une relation entre le nombre de données d'apprentissage sélectionnées pour chaque type d'habitats et la qualité de leur prédiction (PA), que ce soit avec les données satellitaires ou avec les données aéroportées. Ainsi, les unités élémentaires caractérisées par de nombreux ROIs affichaient la plupart du temps des valeurs très élevées de PA tandis que les unités avec seulement quelques pixels ROIs étaient généralement moins bien cartographiées. Ces observations sont conformes aux résultats d'études précédentes qui ont démontré que les petites classes ont tendance à être mal classées (Sun et al. 2009; Grabska et al. 2019). Pour améliorer ces résultats, il serait nécessaire de faire des relevés de terrain complémentaires afin de sélectionner davantage de polygones d'entraînement pour les unités avec peu de ROIs. Cependant, les habitats concernés correspondent la plupart du temps à des végétations rares à l'échelle de l'estuaire de la Loire, s'exprimant seulement sur de faibles surfaces (par exemple : A2.5271 'Fourrés argentés' ou B1.42 'Dunes grises fixées gasconnes').

2.5 Conclusion

En raison de la très grande superficie de l'estuaire de la Loire (22 000 ha) et de sa configuration (marais inondables, nombreux canaux), l'utilisation de méthodes de télédétection apparaissait comme un moyen efficace pour réaliser la cartographie des habitats du site Natura 2000. Deux sources d'images aux caractéristiques différentes et complémentaires ont été évaluées à travers ce projet : des images multispectrales satellitaires (Sentinel-2) et des images aéroportées hyperspectrales et LiDAR.

Nos résultats suggèrent que la résolution spectrale des images Sentinel-2 est adaptée pour la cartographie des habitats, en particulier pour les zones humides, et nous constatons qu'un nombre limité de bandes spectrales judicieusement positionnées à travers les différentes régions du spectre électromagnétique (visible, red-edge, proche infra-rouge et moyen infra-rouge) permet d'obtenir des classifications très performantes. Plus précisément, nous avons démontré l'intérêt d'une classification multi-dates qui compense cette faible résolution spectrale par l'intégration de la dynamique phénologique de la végétation au cours des saisons (Fauvel et al. 2020). Cet avantage est rendu possible grâce à la fréquence élevée de revisite des satellites Sentinel-2 qui assurent une acquisition régulière d'images au cours de l'année (Drusch et al. 2012). Cependant, la résolution spatiale de ces images reste insuffisante pour intégrer de nombreux habitats présents uniquement sur de faibles surfaces et de manière ponctuelle. Dans cette étude, seuls 39 habitats EUNIS sur les 89 habitats recensés ont pu être cartographiés. Par conséquent, l'utilisation de ces images ne doit être envisagée que pour la cartographie des habitats d'une superficie supérieure à 100m². Néanmoins, nous avons établi, à partir des correspondances typologiques, la cartographie de 9 habitats EUR28, représentant au total 6 165 ha soit 26% de la surface totale du site d'étude. Parmi tous les habitats, l'HIC 1410 'Prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)' est le plus recouvrant (4 491 ha, 19% de la superficie totale du site). De manière générale, nos résultats montrent que les données Sentinel-2 sont adaptées à la production de cartes des habitats exploitables à l'échelle du 1 : 25 000.

L'utilisation des images aéroportées avec une résolution spatiale d'1m a permis de sélectionner des données d'apprentissage pour la quasi-totalité des habitats identifiés dans la typologie (74 habitats EUNIS sur les 89 habitats recensés). De plus, ces données en THRS garantissent une représentation très précise de l'organisation spatiale des habitats avec la possibilité de faire apparaître les réseaux de haies, les canaux et les végétations rivulaires telles que les

mégaphorbiaies (par exemple, l'HIC 6430-5 'Mégaphorbiaies oligohalines'). L'intérêt de la richesse spectrale des images hyperspectrales a été démontré notamment grâce à la possibilité de calculer des indices à bandes étroites. Par leur capacité à discriminer plus finement les végétations aux réponses spectrales proches, les indices hyperspectraux ont amélioré la précision des classifications de nombreux habitats par rapport à l'analyse basée uniquement sur les caractéristiques spectrales des capteurs Sentinel-2 (Haest et al. 2017; Bradter et al. 2019; Dashti et al. 2019). De plus, l'intégration de la dimension 3D (LiDAR à retour d'onde complet) a permis d'augmenter significativement la justesse de la modélisation des habitats. L'apport de ces nouvelles variables (MNT et HVeg) a assuré une meilleure discrimination des unités élémentaires qui se distinguent selon leur positionnement topographique (conditionnant les facteurs humidité et salinité) (Rapinel et al. 2015a) ainsi que par leur hauteur de végétation (des pelouses rases aux végétation forestières) (Shi et al. 2021). Ainsi, grâce à l'utilisation d'images aéroportées hyperspectrales et LiDAR nous avons pu cartographier précisément 13 habitats EUR28 couvrant une superficie totale de 6 009 ha. Comme pour les résultats obtenus avec les images Sentinel-2, l'HIC 1410 'Prés salés méditerranéens (*Juncetalia maritimi*)' est le plus présent avec 3 419 ha cartographiés, confirmant l'importance du site Natura 2000 pour la préservation de cet habitat. Cependant, cette approche présente un caractère plus expérimental, en particulier concernant l'acquisition et le pré-traitement des données (Sławik et al. 2019; Jänicke et al. 2020). Par conséquent les images analysées dans ce projet, ne couvraient pas l'ensemble de la zone d'étude et possédaient un certain nombre de défauts (liés à la durée et aux conditions de vols, ainsi qu'à des dysfonctionnements de certains capteurs).

La précision des résultats obtenus par les deux approches (satellite et aéroportée) est également liée à l'utilisation d'une typologie très détaillée et caractérisée par de nombreuses données d'apprentissages. Plusieurs auteurs ont démontré la nécessité de disposer de bases de données de terrain importantes et précises pour le calibrage des algorithmes de classification (Millard & Richardson 2015; Rapinel et al. 2019; Yeo et al. 2020). Pour nos expérimentations, nous nous sommes appuyés sur les nombreux relevés phytosociologiques recueillis lors de l'établissement de la typologie (chapitre 1). La majorité de ces relevés provenaient de la bibliographie, ce qui souligne l'importance d'accéder aux données préexistantes sur les territoires pour établir des bases de données d'apprentissage riches (Pérez-Valladares et al. 2019). Ainsi, la centralisation et le partage des relevés de terrain doit être encouragé, notamment à travers la mise en place de bases données communes (Gautreau et Noucher 2013; Wisser 2016), comme par exemple

l'European Vegetation Archive qui réunit des milliers de relevés de végétation à travers l'Europe (Chytrý et al. 2016).

Chapitre 3 : Analyse des usages de la cartographie des végétations et des habitats par les praticiens

Les résultats produits dans cette thèse répondent en premier lieu à l'inventaire et à la cartographie des habitats dans le cadre de la mise en œuvre de la DHFF sur le site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'. Toutefois, les données acquises lors de ce travail (relevés phytosociologiques et cartes thématiques) représentent des sources d'informations potentiellement utiles pour de nombreux autres usages et usagers (Savio et al. 2015). Ainsi, il nous a semblé judicieux d'ouvrir nos recherches sur les attentes des différents acteurs du territoire vis à vis des cartographies des végétations et des habitats. Le travail présenté dans ce chapitre est issu d'une collaboration entre le GIP Loire Estuaire¹⁷ et les laboratoires de recherche LABERS EA3149 (Univ. Brest) et Espaces et SOciétés ESO UMR 6590 (Univ. Rennes) dans le cadre du projet DOSECOLIT - Données Ouvertes Spatiales des ÉCOsystèmes LITtoraux (https://www.mshb.fr/projets_mshb/dosecolit/3590/). Ce partenariat a notamment donné lieu au stage 'Analyse des usages de la cartographie de végétations dans l'estuaire de la Loire entre Nantes et Saint-Nazaire' réalisé par Valentin Urvois (Master 2 – Biologie Écologie Évolution (Univ. Angers) – 2019) sous la direction de Kristell Le Bot (GIP Loire Estuaire). Ce chapitre est constitué par l'article 'Données environnementales et gestion d'un site naturel littoral : Quels productions, usages et partages des cartographies de végétation dans l'Estuaire de la Loire ?' correspondant à la valorisation scientifique de ce partenariat.

¹⁷ Le Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire rassemble les différents acteurs de la Loire, de la Maine à la mer : État, collectivités locales, établissements publics, armateurs, industriels. Parmi les accompagnements de programmes de ses 9 membres, identifiés dans son Plan stratégique 2017-2021, figure la contribution à l'élaboration de la cartographie des habitats du site Natura 2000 « Estuaire de la Loire ». (http://www.loire-estuaire.org/upload/espace/1/institution/PlanStrategique_20172021.pdf)

Données environnementales et gestion d'un site naturel littoral : Quels productions, usages et partages des cartographies de végétation dans l'Estuaire de la Loire ?

Article soumis à la revue VetigO le 25-05-2021

Jérôme Sawtschuk, Univ. Brest, LABERS EA3149, F29238 Brest, France

Mathieu Le Dez, Univ. Nantes, LETG UMR 6554 et Département de Loire-Atlantique

Valentin Urvois, Stagiaire 2019 - Master 2 Biologie Écologie Évolution, Univ. Angers

Boris Mericksay, Univ. Rennes, Espaces et SOciétés ESO UMR 6590.

Kristell Le Bot, GIP Loire Estuaire, Nantes

Résumé

Cette étude interroge les méthodes, typologies, moyens de diffusion et de partage des cartographies de végétation. Différentes sources d'informations sont mobilisées pour décrire les pratiques sur le territoire de l'estuaire de la Loire : une analyse documentaire sur la production et l'usage des cartographies de végétation, une synthèse des demandes de données effectuées auprès d'un organisme ressource et une enquête réalisée auprès des professionnels. Les résultats sont analysés de façon à déterminer si les besoins diffèrent entre les catégories d'acteurs et sont mis en perspective avec les outils de diffusion actuellement disponibles. La synthèse bibliographique a permis de recenser 55 cartes de végétation et d'habitats éditées entre 1979 et 2020. La demande de cartes est croissante et peut être mise en lien avec l'évolution des politiques publiques d'aménagement et la prise en compte grandissante des problématiques environnementales. Les usages principaux concernent la réalisation d'études d'impacts, la gestion des milieux et l'aménagement. La désignation du site Natura 2000 a impulsé la construction d'une connaissance partagée sur ce territoire. Les connaissances de la dynamique des végétations restent encore partielles et requièrent des typologies standardisées pour pouvoir comparer les cartographies entre elles et mieux appréhender les évolutions de l'estuaire. La production et la diffusion de ces documents d'aide à la décision nécessitent des moyens, notamment humains, pour animer un réseau d'échanges de données environnementales entre utilisateurs et producteurs qui ne doit pas se limiter à une plateforme numérique.

3.1 Introduction

3.1.1 Partager les données environnementales, un enjeu pour les acteurs de la gestion du littoral

La question de la gestion des écosystèmes littoraux s'inscrit dans un contexte de renouvellement informationnel et technologique en perpétuelle évolution. Avec le passage progressif de l'informatique au numérique et la montée en puissance des données massives, les pratiques des acteurs se sont considérablement technicisées en mettant au centre des réflexions toujours davantage de données, notamment géographiques. D'un côté, la mise en réseaux des bases de données poussée par l'interopérabilité et les services Web ouvre la voie à de nouvelles logiques de partage des données à l'image des infrastructures de données spatiales, des géocatalogues ou des services Web géographiques (De Longueville 2010; Evangelidis et al. 2014). De l'autre les cadres réglementaires européens (INSPIRE) et nationaux (loi NOTRe, loi pour une république numérique...) contraignent les acteurs publics à normaliser, documenter et ouvrir leurs données relatives à l'environnement selon une logique d'Open data par défaut (Perego et al. 2012; Cho & Cromptoets 2019).

Les données environnementales représentent des ressources informationnelles stratégiques pour l'élaboration et le suivi des politiques publiques et de manière plus globalement un enjeu sociétal majeur à l'heure de la transition socio-écologique. La directive européenne de 2007, dite directive Inspire, vise par exemple à établir une infrastructure d'information géographique pour favoriser la protection de l'environnement. Au préalable, la convention d'Aarhus en 1998 signée par l'union Européenne avait renforcé « le droit d'accès à l'information et de participation au processus décisionnel en matière d'environnement ».

Malgré un cadre législatif contraignant et la mise en place de dispositifs institutionnels facilitant le partage, l'ouverture des données relatives aux écosystèmes, mais aussi à l'agriculture (Wainstain 2021) a encore du mal à trouver écho dans les pratiques des professionnels. Ceci est paradoxal, alors qu'un mouvement de fond (ou de mode ?) s'organise autour de la production et de la structuration des données citoyennes ou participatives qui concentrent de plus en plus l'attention des chercheurs et des pouvoirs publics (Georis-Creuseveau et al. 2018), données qui ne sont pourtant pas toujours les plus faciles à partager (Groom et al. 2017) et dont la légitimité peut être discutée (Amelot et al. 2017). Un argument avancé en faveur des collectes de données

citoyennes serait que la production de données deviendrait trop rare pour fournir les données de terrain nécessaires à la surveillance de la biodiversité (Botella 2019). Les données environnementales produites par les professionnels représentent pourtant aujourd'hui une production importante (Claveras & Gossart 2015) et toujours croissante favorisée par le développement de l'acquisition satellite et aérienne et le renforcement des politiques environnementales.

Cependant, ces données environnementales sont encore très hétérogènes et restent, pour beaucoup, disséminées sans référencement standardisé et souvent assez peu documentées. Sans compter les réticences des acteurs à partager leurs données qu'elles soient motivées par des raisons de propriété ou plutôt de priorité d'exploitation des données, ou bien par le caractère souvent fastidieux des étapes de documentation et de préparation des jeux de données en vue de leur diffusion (Duval et al. 2015). L'ouverture et le partage des données sont pourtant cruciaux pour limiter la redondance des études et pour permettre une connexion à des ensembles plus vastes de données ouvrant des possibilités de nouvelles d'analyses (Gautreau & Noucher 2013).

Dans un contexte de pressions généralisées sur les espaces littoraux (Chadenas et al. 2020), où les données relatives à la biodiversité, à l'occupation des sols ou à l'anthropisation sont devenues incontournables, il est nécessaire d'interroger les pratiques autour de la production, de l'ouverture et du partage des données environnementales par les acteurs professionnels. Les études de cas régionaux apportent à ce sujet des enseignements précieux comme le montre l'étude réalisée par Amelot et al. (2017) sur les données faune à partir de l'étude des ZNIEFF et un atlas contributif en région Aquitaine. Nous proposons dans cette étude de questionner les usages, production et partage des cartes de végétation de l'estuaire de la Loire en aval de Nantes.

3.1.2 La cartographie de la végétation : acquérir, partager et représenter des données pour comprendre les dynamiques environnementales

Parmi les documents mobilisant des données environnementales variées, les cartes de végétation constituent des supports essentiels pour la connaissance, le suivi et la conservation de la nature. Par son caractère intégrateur, la végétation synthétise les conditions de milieu et de fonctionnement du système, permettant notamment de caractériser les habitats naturels, les potentialités biologiques, les états de dégradation ou les évolutions probables d'un territoire

(Frontier & Pichod-Viale 1991; Rameau 2001). En spatialisant les unités de végétation, la cartographie fournit des documents de synthèse explicatif et prospectif (Ozenda 1974; Pedrotti 2013) illustrant les relations entre la végétation et les facteurs écologiques du milieu. Couramment utilisée dans la recherche en écologie des communautés végétales (Olivier et al. 2010; Chalumeau & Bioret, 2013), les cartes de végétations sont des outils majeurs pour l'aide à la planification et à l'aménagement du territoire (Ichter et al. 2012; Savio et al. 2015; Delbosc et al. 2018).

La mise en œuvre d'un réseau d'espaces protégés au niveau national et européen (Réserves Naturelles Nationales et Régionales, Espaces Naturels Sensibles, réseau de sites Natura 2000...) a renforcé la production de données cartographiques sur la végétation et les habitats, nécessaire à la réalisation des plans de gestion et documents d'objectifs (Chiffaut 2006; Souheil et al. 2011). En apportant des éléments d'information sur la distribution et la superficie des habitats, les cartes de végétation participent également à l'évaluation l'état de conservation des habitats dans le cadre de la directive Habitat-Faune-Flore (European Commission 1992) ou pour l'établissement de listes rouges des habitats menacés (Gubbay et al. 2016; Janssen et al. 2016). Les évaluations environnementales représentent aussi des sources de données de plus en plus conséquentes car nécessaires à la mise en œuvre des politiques de protection de l'environnement tel que la doctrine éviter-réduire-compenser et la trame verte et bleue (Sordello et al. 2011). Aujourd'hui, la cartographie de la végétation représente le moyen d'acquisition principal des données de végétations et d'habitats dans les aires protégées (Collaud & Millet, 2020).

Dans cette recherche nous proposons d'explorer les usages, les modes de production et le partage des cartographies de végétation dans l'estuaire de la Loire, espace stratégique à la fois pour les activités économiques (agriculture, pêche, industrielles et portuaires, tourisme...) et pour la biodiversité. La production de cartes de végétation est essentielle pour la compréhension des dynamiques environnementales de l'estuaire de la Loire et pour la gestion des multiples activités qui s'y déroulent. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'une recherche associant des praticiens : le GIP Loire Estuaire, observatoire local de l'environnement, acteur central de la donnée environnementale et le Conseil départemental de Loire-Atlantique, gestionnaire du site Natura 2000 qui travaille actuellement à l'actualisation de la cartographie des habitats du site de l'estuaire de la Loire.

Plusieurs hypothèses de recherche sont posées : les pratiques de cartographies de végétation sont multiples, même à l'échelle locale ; les usages et productions de ces cartographies sont variés et dépendent des attentes de chacun des acteurs ; les cartographies de la végétation et des habitats (Natura 2000) représentent des éléments centraux pour l'aide à la décision (planification) dans l'estuaire de la Loire ; les dimensions partenariale et humaine et les échanges directs entre praticiens sont cruciaux pour le partage et l'usage de ces cartographies ; les cartographies historiques sont faiblement mobilisés.

Pour répondre à ces hypothèses, cette étude mène une réflexion sur l'usage de la cartographie de la végétation, les pratiques, méthodes et typologies de cartographie de la végétation selon le type d'acteur, les moyens de diffusion et de partage des données. Les attentes des différents acteurs du territoire vis-à-vis des cartographies de végétations sont évaluées et mis au regard des informations apportées par les cartographies, notamment celles réalisées dans le cadre de la démarche Natura 2000 qui sont en cours de mise à jour (Savio et al., 2015). Différentes sources d'informations sont mobilisées : une analyse documentaire sur la production et l'usage des cartographies de végétation de l'estuaire de la Loire, une synthèse des demandes de données effectuées au GIP Loire Estuaire entre 2014 et 2018 et une enquête réalisée en 2019 auprès des professionnels de l'estuaire de la Loire sur les usages et les besoins des cartographies de végétation (Urvois 2019). Les résultats sont analysés de façon à déterminer si les besoins diffèrent entre les catégories d'acteurs et sont mis en perspective avec les outils de diffusion actuellement disponibles.

3.2 Matériel et méthode

3.2.1 Analyse de la production des études cartographiques

Depuis les années 1970, l'estuaire de la Loire a fait l'objet de nombreuses études environnementales impliquant pour certaines d'entre-elles la réalisation de cartes de végétation ou d'habitats. Une synthèse bibliographique a été réalisée pour identifier tous les documents concernant la flore, la végétation et les autres études pouvant avoir conduit à la production de cartographies au sein du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire' (Annexe 01). Ces données ont été recueillies auprès des acteurs possédant des bases de données bibliographiques ou en contactant directement les commanditaires des études. Une base de données a été constituée en

renseignant les années de publication des cartes, les informations concernant les types de producteurs (les organismes qui ont réalisés les cartes), les types de commanditaires (les organismes à l'initiative du projet de cartographie) et les typologies utilisées.

3.2.2 Étude des demandes de données et identification des acteurs

Depuis 2014, le GIP Loire Estuaire possède une base de données recensant les demandes de données qui lui sont adressées. Si ces demandes concernent beaucoup des données sur les milieux physiques et l'hydrologie, des données sur les écosystèmes sont aussi demandées. Cette base de données a été retravaillée afin de disposer pour la période 2014-2018 d'une vision globale des données demandées, puis d'une vision plus centrée sur la végétation. La proportion de demandes de données végétation a été calculée, les thématiques associées ont également été relevées. Cette base de données a également permis d'identifier une liste d'interlocuteurs à interroger pour aller plus loin dans l'analyse des usages, liste qui a été complétée par des acteurs du territoire, telles les communes incluses dans le périmètre Natura 2000. Au final, 114 contacts ont été retenus, représentant 104 organismes variés (aménagement, gestionnaires, bureau d'études, experts naturalistes, etc.).

3.2.3 Méthodologie de l'enquête

Pour compléter ces informations un questionnaire a été rédigé, dans le but de recueillir les usages des différents acteurs ([Annexe 08](#)). Il s'inspire de l'enquête de [Savio et al. \(2015\)](#), visant à connaître les besoins des différents acteurs en vue de l'élaboration du programme national de cartographie des habitats terrestres de France (CarHab) ([Olivier et al. 2010](#)). Le questionnaire a été testé au préalable auprès de quelques d'acteurs. Une attention particulière a été portée sur le vocabulaire, afin d'éviter les ambiguïtés. Il a été décidé de traiter la végétation au sens large du terme, c'est-à-dire regroupant la flore, la végétation (grand ensemble de végétaux) et les habitats. Le questionnaire comprend principalement des questions fermées. Il porte d'abord sur la structure du répondant et son activité, puis sur le mode d'acquisition des données (production interne, bibliographie, consultation de plateformes spécialisées, requête Internet, demande à un producteur), leurs finalités, les outils et techniques employés, les formats, typologies et échelles et enfin leurs valorisations et leurs partages. Il a été envoyé aux 114 contacts identifiés au printemps 2019 ([Annexe 09](#)). Parmi ces contacts, 24 ont été sélectionnés, représentatifs des principaux acteurs locaux, pour réaliser un entretien complémentaire d'une heure environ, le

questionnaire servant de trame aux échanges. Les 90 autres ont reçu uniquement le questionnaire par mail. Enfin, le questionnaire a également été mis en ligne sur le site internet du GIP LE¹⁸.

3.2.4 Atelier de restitution

En complément, une réunion de restitution a été organisée le 29 août 2019, afin de présenter les résultats du questionnaire aux acteurs. Ils ont alors été invités à se concerter et débattre sur trois thématiques : les besoins actuels et futurs en termes de données sur la végétation, les méthodes d'acquisition et enfin les moyens de diffusion.

3.3 Résultats

3.3.1 Analyse de la production de cartes de végétation sur l'estuaire de la Loire

La synthèse bibliographique a concerné 99 documents publiés entre 1966 et 2020 et a permis de recenser 55 cartes de végétation et d'habitats éditées entre 1979 et 2020 (voir quelques exemples sur la [figure 50](#)). Pour l'analyse des données, certains types de producteurs et de commanditaires ont été regroupés dans des catégories selon leur domaine d'activité : associations, bureaux d'études, Recherche (universités), collectivités.

L'analyse menée sur les types de producteurs permet de constater que les bureaux d'études en environnement ont réalisé la majorité des études cartographiques sur l'estuaire de la Loire ([Fig. 51-A1](#)). Ils sont intervenus régulièrement entre 1995 et 2020 ([Fig. 51-A2](#)). Viennent ensuite les organismes de recherche (laboratoires universitaires) qui ont effectué 20% des cartographies, principalement entre 1979 et 1995, puis entre 2012 et 2018 ([Fig. 51-A1/A2](#)). Les autres productions se répartissent entre les associations, le Conservatoire du littoral, le GIP Loire Estuaire (GIP LE), le Conservatoire Botanique National de Brest (CBN) et des naturalistes bénévoles ([Fig. 51 A1/A2](#)).

¹⁸ <https://www.loire-estuaire.org/accueil/actualites/4517-101894/usages-de-la-cartographie-de-vegetations>

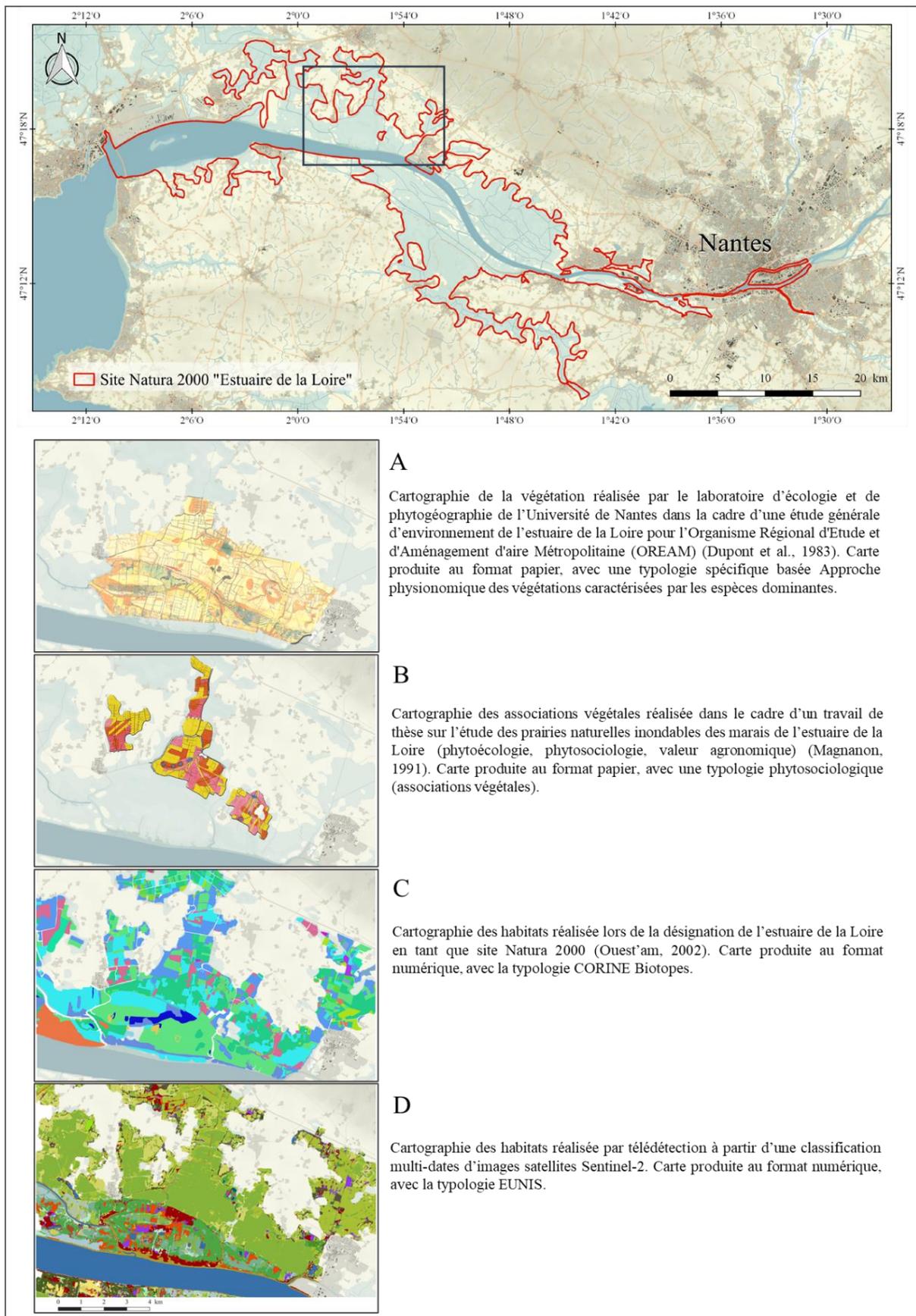


Figure 50. Extraits de cartes de végétations sur le secteur de Lavau-sur-Loire / Cordemais

Concernant les commanditaires, le principal initiateur de cartes de végétation sur l'estuaire de la Loire est le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire (GPM), acteur majeur dans l'aménagement et le développement industrialo-portuaire du territoire. Le GPM a initié 35 % des études, réparties régulièrement entre 1983 et 2020 (Fig. 51 B1/B2). Les autres principaux commanditaires sont le GIP Loire Estuaire à partir des années 2000 (16%), les communes qui interviennent principalement depuis 2015 (11%) et les organismes de recherche essentiellement durant la dernière décennie (9%) (Fig. 51 B1/B2). Les autres commanditaires agissent plus occasionnellement : Conservatoire du Littoral (5%), les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) (5%), le Conseil départemental de Loire-Atlantique (Département) (4%), Electricité de France (EDF) (4%), l'Organisme Régional d'Etude et d'Aménagement d'aire Métropolitaine (OREAM) (4%), les associations (2%), l'Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS) (2%), les naturalistes bénévoles (2%) et TOTAL (2%) (Fig. 51 B1/B2).

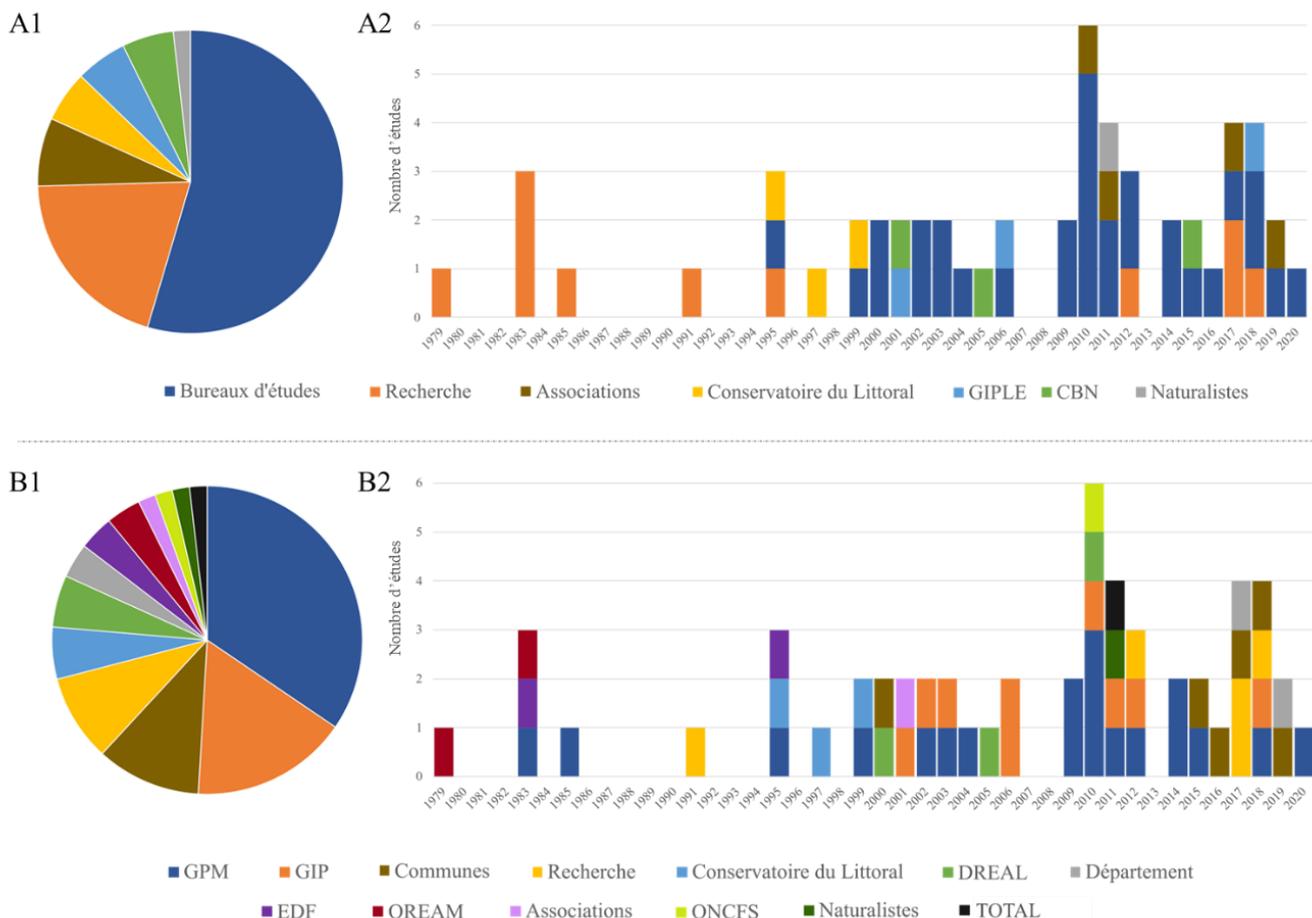


Figure 51. Proportions du nombre d'études avec cartes de végétation réalisées sur l'estuaire de la Loire (Nantes – Saint-Nazaire) selon les catégories de producteurs (A1) et de commanditaires (B1). Le nombre d'études produites en fonction des années de publication est représenté sur les diagrammes (A2) et (B2) respectivement selon les catégories de producteurs et les catégories de commanditaires

Notre analyse permet également d’observer que certains organismes sont à la fois producteurs et commanditaires de leurs études. C’est principalement le cas des organismes de recherche (cinq études), le GIP Loire Estuaire (trois études) ou le Conservatoire du Littoral (trois études). Parmi l’ensemble des études analysées, seules cinq remobilisaient des cartes anciennes couplées à de nouvelles productions de données.

Plus d’un tiers des cartographies de végétation a été réalisé avec une typologie non-standardisée (typologies ‘spécifiques’) (34%) (Fig. 52-A). Cette catégorie regroupe les typologies basées sur la physionomie, les espèces dominantes, ou la valeur agronomique de la végétation. Les typologies non standardisées sont régulièrement utilisées de 1979 à 2020 (Fig. 52-B). Les typologies d’habitats CORINE Biotopes et Natura 2000 sont également fréquentes avec respectivement 24% et 22% des cartes recensées (Fig. 52-A). Leur usage sur l’estuaire de la Loire apparait en 2001 et devient quasi systématique à partir de cette date (Fig. 52-B). Essentiellement représentée à partir des années 2000, la typologie phytosociologique est légèrement moins utilisée (18%) tandis que la classification des habitats du Paléarctique n’est utilisée qu’une seule fois en 1999.

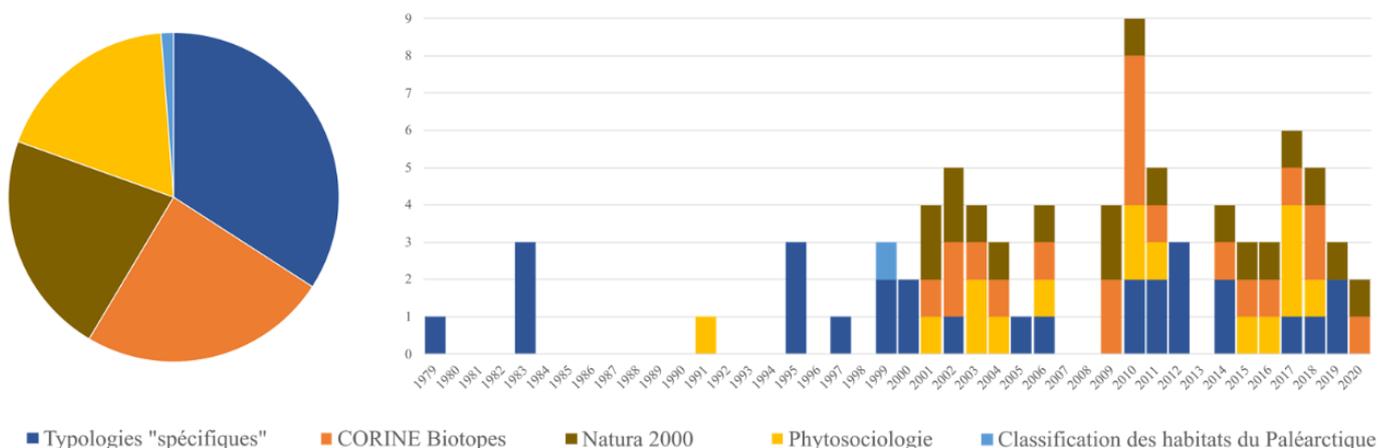


Figure 52. Proportions du nombre de cartes réalisées sur l’estuaire de la Loire selon les typologies utilisées. Le nombre de cartes produites en fonction des années de publication est représentée sur le diagramme selon les typologies recensées

3.3.2 Analyse des demandes de données

Le GIP LE a reçu 316 sollicitations pour des demandes de données ou d’informations sur la période de janvier 2014 à mars 2019. 69 de ces sollicitations concernaient plusieurs demandes de données thématiques, celles-ci ont été individualisées pour l’étude portant le nombre total

de demandes à 416. Une thématique a pu être identifiée pour 362 des demandes. Avec 47 demandes (11,3%) les données concernant la flore arrivent à la quatrième position, après les données sur les milieux physiques (68 ; 18,3%), l'hydrologie (60 ; 16,3%), et la faune (51 ; 14,4%). Les demandes relatives à la thématique 'Milieu physique' concernent la topographie, la bathymétrie ainsi que le Modèle Numérique de Terrain développé par le GIP LE qui est très demandé (47 fois sur les 60 demandes). Concernant le type de demandeur, ce sont essentiellement des collectivités locales qui interrogent le GIP LE avec 96 demandes de données, suivi par des établissements publics (64 demandes) et des associations (51 demandes).

Sur les 47 demandes de données flore, 21 sont associées à des données faunistiques. Seules 7 de ces demandes concernent des données SIG, et 12 des données cartographiques. La majorité des données demandées (25 sur les 47) sont transmises sous forme de publications comprenant des cartes de végétation déjà mises en forme. Les données relatives à la végétation sont également principalement demandées par les collectivités locales (22 demandes) et les établissements publics (9 demandes).

3.3.3 Analyse du questionnaire

Au total, 40 personnes ont répondu au questionnaire sur les 114 personnes ciblées, 22 en face à face ou au téléphone et 18 par mail. Les réponses de deux personnes ont été écartées de l'échantillon à leur demande. Deux tiers des réponses (25) concernent des structures publiques. Le panel d'utilisateurs comprenait 4 aménageurs (Département, industriels), 7 gestionnaires (Office national de la chasse et de la faune sauvage devenue depuis OFB, Conservatoire des espaces naturels), 10 aménageurs et gestionnaires (Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire, syndicats de marais), 14 experts (écologues, bureaux d'étude) et 3 médiateurs en environnement. Ces catégories ont été réalisées en fonction des résultats de la première partie du questionnaire. Les usages principaux des données de végétations concernent la connaissance des études d'impacts (24), puis la gestion des milieux (20) et l'aménagement (17). Les données sont plus rarement utilisées pour la communication (11) ou l'éducation (10).

Les groupes d'acteurs ont été comparés en fonction de leurs réponses, de manière à estimer si certaines activités avaient une influence sur les usages des données de végétation. Les aménageurs et les gestionnaires, travaillant le plus souvent à l'échelle de l'estuaire. Cependant, la majorité d'entre eux ont une activité restreinte à certains secteurs de l'estuaire. Les experts,

publics et privés (7 dans les deux cas), travaillent principalement à l'échelle régionale, voire nationale. Ils font presque autant de production de données que d'analyse et de traitement, et travaillent le plus souvent pour des commanditaires. Il arrive que les gestionnaires produisent eux-mêmes leurs données.

En ce qui concerne la mobilisation des données existantes, les producteurs de données effectuent des recherches au préalable (24 sur les 28). Ceux qui n'effectuent pas ces recherches expliquent, lors des entretiens, qu'ils détiennent déjà les données susceptibles de les intéresser ou qu'ils savent qu'il n'y a pas de production pouvant correspondre à leur besoin sur leur zone d'étude par leur connaissance du territoire. Pour accéder aux données existantes, le contact direct au producteur et l'accès via des ressources bibliographiques de données sont privilégiés par rapport aux plateformes spécialisées et la requête Internet. Pour les modalités d'obtention des données, la plupart des échanges font l'objet de conventions de partenariat ou sont libres de droit. Il arrive que les données soient payantes, mais cela reste assez rare (mentionné 4 fois) et le plus souvent lié au coût de la main d'œuvre nécessaire à l'extraction des bases de données.

Pour les personnes interrogées, les données anciennes étaient essentielles, au moins pour contextualiser l'étude. Cependant, cette notion variait selon les acteurs. Certains remontent jusqu'à des données très anciennes (contenues par exemple dans des herbiers), d'autres seulement quelques années en arrière (dans le questionnaire, les données anciennes qualifiaient les données ayant plus de 3 ans).

Concernant la fréquence d'actualisation souhaitée, deux réponses sont ressorties. Les aménageurs, dans le cadre du suivi de leurs travaux, ont besoin de données annuelles (au moins sur les premières années), tandis que le reste des acteurs jugent qu'un pas de temps de 5 ans serait suffisant pour suivre l'évolution de la végétation sans être biaisé par des événements exceptionnels. Pour ce qui est de l'échelle de restitution des productions cartographiques, l'échelle fine du 1/5000^e est la plus utilisée, elle correspond à celle des cartes Natura 2000.

Les deux tiers des acteurs qui produisent des données les diffusent, ou peuvent les diffuser si la demande leur est faite. Les exceptions se font au niveau des sites sensibles, comme les espaces industriels, ou bien pour les productions trop incomplètes (par exemple des relevés qui ne sont pas exhaustifs) considérées comme peu pertinentes par les producteurs. De leur côté, les acteurs privés (hors industriels) jugent en grande partie qu'il est inutile d'acquérir des données et de ne

pas les diffuser. Les modalités de diffusion varient peu, il s'agit le plus souvent des conventions de partenariat ou bien de la diffusion libre de droit. Cette dernière est désormais une obligation légale pour les études publiques.

Enfin, les acteurs sont unanimes sur le fait qu'une plateforme unique de diffusion serait un plus. Les propositions de plateformes qui pourraient regrouper ces données étaient assez variées, mais elles pointaient toutes dans la direction d'un acteur expert dans le domaine de la végétation. Les acteurs sont partagés sur le type de diffusion. Seul un tiers des répondants pensent que les données fines devaient être en accès libre, alors que la moitié des répondant souhaite limiter la diffusion publique en dégradant la données (rapportées par exemple à l'échelle de la maille 5km x 5km) et en réservant l'accès aux données fines à certains acteurs.

3.4 Discussion

3.4.1 Des cartographies de végétation disponible depuis trois décennies pour mieux comprendre, gérer, protéger et aménager l'estuaire de la Loire

La réalisation de la synthèse bibliographique nous a permis de constater les difficultés que représente la recherche et la collecte des études produites sur l'estuaire de la Loire. Cependant, les bases de données bibliographiques du GIP Loire Estuaire et du CBN de Brest ont représenté des outils précieux pour ce travail en centralisant une partie importante des données recueillies. Nos investigations nous ont ainsi permis de recenser 55 cartes de végétation et d'habitats produites au cours des 50 dernières années, témoignant de l'importance de ce type de données environnementales pour les acteurs intervenant sur l'estuaire de la Loire.

L'analyse de la répartition temporelle de ces études permet de constater une production croissante notamment à partir de la fin des années 1990, qui peut être mise en relation avec les évolutions des politiques d'aménagement et des obligations réglementaires qu'elles impliquent ainsi que le développement d'une politique de gestion des espaces naturels de l'estuaire de la Loire. Entre les années 1970 et le milieu des années 1990, les premières études cartographiques sont principalement réalisées par les laboratoires de recherche universitaire (Université de Nantes) dans le cadre de missions d'expertises pour des organismes en charge du développement économique et de l'aménagement de l'estuaire de la Loire (OREAM, GPM, EDF). Cette période est notamment marquée par d'importants aménagements industrialo-

portuaires, tels que le remblaiement de zones humides pour l'extension de terminaux portuaires (Demaure 1979), des dragages d'approfondissement du lit mineur de la Loire ou le projet d'installation d'une centrale nucléaire (Le Rhun 1986). Les conséquences environnementales de ces aménagements sont importantes et ont largement contribué à une profonde modification des mécanismes complexes qui caractérisent les milieux estuariens (modifications des dynamiques hydro-sédimentaires, diminution des surfaces intertidales (dont des vasières) au profit d'habitats terrestres...). Les cartes de végétation produites lors de cette période avaient pour principaux objectifs de recenser, localiser et alerter sur les enjeux concernant la flore, la végétation ou l'intérêt agronomique des marais estuariens afin de limiter les impacts de futurs projets d'aménagement (Dupont & Leaute 1978; Bioret 1983). Les années 1990 et 2000 sont marquées par un tournant dans la gestion de l'estuaire de la Loire, caractérisées par l'abandon de grands projets d'aménagement (abandon du projet d'aménagement de la centrale nucléaire du Carnet en 1997, abandon du projet de site portuaire de 'Donges-Est' en 2009) et la mise en œuvre de politiques de protection de la nature (site classé en 2002 en tant que grand paysage, désignation du site Natura 2000 en 2004, création de plusieurs ZNIEFF dans les années 1990 et 2000...). Cette transition vers une plus grande prise en considération de l'intérêt écologique de ce territoire s'illustre également par la réaffectation de certaines propriétés du Grand port maritime initialement destinées aux industries vers une vocation d'espaces naturels (Marcadon 2008). Durant ces années, le nombre d'acteurs intervenant dans les domaines de la connaissance et la gestion environnementale de l'estuaire de la Loire augmente (implication du Conservatoire du Littoral sur le territoire à partir de 1994, Création du GIP Loire Estuaire en 1998). Cette période se caractérise logiquement par une augmentation du nombre de cartes de végétation initiées par ces différents organismes, correspondant à une tendance générale observée à l'échelle nationale et européenne, notamment liée à la mise en œuvre de la directive Habitat-Faune-Flore (Evans 2010; Ichter et al., 2012).

Une étude similaire réalisée sur les végétations des falaises littorales bretonnes montre une dynamique comparable : une production de données qui débute dans les années 80, et une augmentation importante de la production de données au début des années 2000 (Le Roy et al. 2019) en lien avec la réalisation de nombreuses opérations de restauration écologique. Les chercheurs sont aussi très impliqués dans cette production de données sur les falaises qui concerne, en revanche, davantage des suivis permanents de placettes que de la cartographie.

3.4.2 Un besoin de connaissance pour la protection des habitats vecteur de collaboration, de partage et d'innovations scientifiques et techniques

Plusieurs études ont été réalisées pour l'identification et la cartographie de l'ensemble des habitats naturels du territoire à travers des études commandées par la DREAL Pays de la Loire et le GIP Loire Estuaire. Ce dernier a joué un rôle majeur dans la production, la centralisation et la diffusion des données environnementales issues de ces études. De manière générale, ces études sont liées à la nécessité de réaliser des inventaires sur la végétation et les habitats pour l'aménagement et la gestion du territoire (études d'impacts avant projets, établissement de plans de gestion d'espaces naturels) ou la mise en place de suivis environnementaux. L'estuaire de la Loire constitue aussi un terrain de recherche pour étudier la diversité phytosociologique des communautés végétales (Magnanon 1991; Cianfaglione 2021) et les dynamiques de la végétation en lien avec les changements environnementaux passés ou à venir (Sawtschuk & Bioret 2012; Le Dez et al. 2017b). La majorité des études cartographiques ont été effectuées par des bureaux d'études en environnement dont l'activité et l'expertise s'est développée à partir des années 1990 à la faveur de la demande croissante en cartographie de la végétation, prenant, en partie, le relais des travaux des organismes de recherche.

La désignation du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire' comme SIC en 2004 a été un élément important pour impulser la construction d'une connaissance partagée sur l'estuaire. La cartographie des habitats réalisée par le bureau d'étude Ouest Aménagement (2003) a été par exemple un document de travail majeur utilisé par l'ensemble des acteurs de l'environnement. Il s'agissait de la première cartographie complète de l'ensemble du site permettant d'avoir une vision globale de la répartition des habitats à l'échelle de l'Estuaire de la Loire. La désignation en 2016 du Conseil départemental de Loire-Atlantique comme opérateur de ce site Natura 2000 permet maintenant de lancer l'animation de ce site et de travailler à la mise à jour des données sur les habitats.

Les partenariats forts existants entre les chercheurs et le GIP Loire Estuaire ont permis d'impulser le travail de réflexion sur l'usage des données environnementales engagé par cette présente étude. De nouveaux partenariats de recherche actions se développent aussi avec la réalisation de la mise à jour de la cartographie des habitats par une méthode innovante utilisant la télédétection dans le cadre d'une thèse CIFRE entre le Conseil départemental de Loire-Atlantique et l'Université de Nantes.

L'accès à la donnée cartographique repose principalement sur des contacts et des liens directs entre les acteurs de l'estuaire. Le passage au tout numérique et aux plateformes de données, bien que demandé, est vu comme un plus mais pas comme un moyen de remplacer ces habitudes de prise de contact directe avec les producteurs de données. Lors de la réunion de restitution de cette étude, une explication a été avancée : le contact direct avec le partenaire qui détient ou produit la donnée est souvent essentiel à la compréhension de la donnée en apportant des informations supplémentaires. Une discussion permet souvent de révéler d'autres données non identifiées et apporte des informations pour contextualiser la donnée (conditions climatologiques, événement ou activités influençant la végétation...) et permet de nouer des nouveaux partenariats. Les dimensions informelles 'humaine' et 'informationnel' de ces réseaux d'échange de données apparaît finalement souvent aussi, voire plus importante, que la donnée en elle-même.

3.4.3 Une connaissance encore partielle de la dynamique des végétations

L'enquête révèle que les utilisateurs ont besoin d'avoir des données mis à jour régulièrement (1 à 5 ans) pour suivre l'évolution de la végétation et comparer avec des données anciennes.

Les cartographies de végétation réalisées à l'échelle de l'estuaire, et même plus localement à partir de relevés de terrain et de photographies aériennes, ne permettent pas d'avoir une vision suffisamment 'objective' de ces changements de végétation. Au niveau des bords de Loire, les phénomènes d'érosion/accrétion naturels, parfois provoqués/amplifiés par des aménagements historiques et plus récent, rendent particulièrement complexe le suivi d'une végétation très dynamique et souvent très difficile d'accès. Des erreurs importantes ont été mises en évidence au niveau de la cartographie des rives d'estuaire dans les cartes anciennes (Sawtschuk & Bioret 2012) liées à l'utilisation de photographie aérienne non contemporaines des relevés terrain, ces erreurs rendent compliqué l'interprétation et l'analyse des dynamiques végétales.

Le GIP Loire Estuaire a mis en place un observatoire des roselières depuis 2006 (GIP 2017) qui se base principalement sur de la photo interprétation d'ortho-photographies. Bien que ces données fournissent des indications globales à l'échelle de l'estuaire, elles ne permettent pas d'évaluer localement les changements des communautés végétales. L'analyse est en effet conditionnée par l'état de la végétation lors de la prise de vue.

Si de nombreux relevés phytosociologiques existent (de Foucault 1984 ; Magnanon 1991 ; Lebret, 2001 ; SCE, 2011) ceux-ci ne sont pas toujours bien géoréférencés rendant compliqué la réalisation de suivi diachronique (n'ayant pas été réalisés avec cet objectif). Globalement, il n'existe que très peu de placettes de suivi permanents des écosystèmes terrestres alors que de nombreuses stations de mesures environnementales sont disponibles au niveau de la qualité de l'eau et des sédiments.

Une initiative avait été lancée en 2001 par le GIP Loire Estuaire pour avoir des sites 'baromètres' de la dynamique de la végétation avec des cartographies plus régulières sur des bandes transversales à la Loire (secteurs de Saint-Etienne-de-Montluc, de Lavau-sur-Loire, Champtoceaux), ce projet n'a pas abouti pour l'instant, les missions du GIP LE ayant quelque peu évolué depuis, avec l'émergence de l'opérateur Natura 2000, entre autres.

L'utilisation de la télédétection pourrait potentiellement apporter des solutions à ces besoins de suivi plus régulier et plus 'objectif' des changements. Un projet a été initié par le Département Loire Atlantique et l'Université de Nantes pour réaliser la mise à jour de la cartographie des habitats du site Natura 2000 de l'estuaire de la Loire à partir de données de télédétection. L'un des principaux objectifs recherchés est de pouvoir limiter les coûts de production en réduisant les temps de prospection sur le terrain et en automatisant la cartographie par l'utilisation d'algorithmes. De plus, l'utilisation de certaines données satellitaires, dont la fréquence d'acquisition est très régulière (par exemple, Sentinel-2), permet d'envisager des suivis très fréquents (annuels ou bisannuels par exemple). En complément à ses approches de cartographies, un réseau de stations de suivis terrain décrivant la dynamique des communautés végétales serait utile, notamment au niveau de secteurs subissant des changements hydro-sédimentaires rapides (par exemple au niveau de secteurs en cours de réestuarisation suite à la suppression/dégradation d'ouvrages hydraulique ou de digues). Ces données terrains sont, de tout façon, nécessaires pour calibrer et vérifier les cartographies automatisées.

La collecte de données sur la dynamique de l'avifaune semble avoir été davantage développée avec de nombreux suivis initiés par des organismes institutionnels dans les années 70, prolongé par la suite par un réseau de naturalistes bénévoles et d'associations (Yésou et al., 2019). La mise en place d'une dynamique similaire serait intéressante pour le suivi de la végétation elle pourrait être coordonnée et animée par des organismes locaux de gestion ou de connaissance. L'idée du recours aux données collaboratives a été évoqué lors de l'atelier de restitution de

l'étude. Un participant avait signalé que le collaboratif pouvait en effet être intéressant, mais à la seule condition, qu'il ne soit pas vu comme une manière d'acquérir de la donnée à bas coût, car cela se ferait, alors, au détriment de la régularité et de la qualité des données.

Enfin, bien que l'une des vocations des cartes de végétation soit le suivi de la dynamique de la végétation et des habitats à partir d'analyses diachroniques, nous constatons que seules quelques études réalisées sur l'estuaire de la Loire réutilisent les données préexistantes. Ce constat est à mettre en relation avec les difficultés d'accès et la méconnaissance des cartes déjà produites, ainsi qu'à l'utilisation fréquente de typologies non-standardisées, difficilement réutilisable ou transposable d'une étude à l'autre.

3.4.4 Des typologies standardisées pour mieux appréhender les évolutions de l'estuaire

Sur notre territoire d'étude, l'utilisation des typologies standardisées (CORINE Biotopes, Natura 2000, typologie phytosociologique) apparaît à partir des années 2000 et correspond à leur développement au niveau national et européen lié notamment à l'adoption de la directive Habitat-Faune-Flore et à la nécessité d'harmoniser les productions cartographiques (Davies & Moss 1998; Davies et al. 2004; Chytrý et al. 2020). Depuis cette période, l'utilisation des référentiels typologiques standardisés est devenue systématique dans la majorité des études produites sur l'estuaire de la Loire. Cette disposition est aujourd'hui nécessaire dans la mise en œuvre de nombreuses études et encouragé par les politiques favorisant l'accessibilité aux données environnementales telle la directive INSPIRE.

Les typologies spécifiques, c'est-à-dire ne faisant pas appel à des typologies standardisées, ont été majoritairement utilisées dans les études cartographiques recensées sur l'estuaire de la Loire. Jusqu'à la fin des années 1990, cette approche s'est imposée par l'absence de référentiels typologiques édités et disponibles pour les producteurs de cartographies de végétations ou d'habitats. On constate néanmoins que durant la période récente, ces typologies développées spécifiquement pour certaines études continuent d'être régulièrement utilisées, permettant de répondre plus particulièrement aux besoins de certains commanditaires, comme par exemple dans le cadre de la cartographie des habitats favorables à l'accueil du *Phragmite aquatique* (Latraube & Mourgaud 2013) ou pour l'inventaire des roselières de l'estuaire de la Loire (GIP LE 2007; GIP LE 2017). Cependant, bien que l'utilisation de typologies spécifiques semble parfois plus adaptée aux besoins de certains commanditaires, elle empêche l'utilisation

d'un langage commun et limite les capacités de partage d'information entre réseaux d'acteurs (Chytrý et al. 2020). L'harmonisation de typologies spécifique vers des typologies standardisées reste parfois possible, mais nécessite souvent une simplification pour limiter les erreurs d'interprétation lors des mises en correspondance (Le Dez et al. 2017b).

3.5 Conclusion

Les cartographies de végétation constituent des outils essentiels pour de nombreux usagers de l'environnement. La demande de cartes est croissante et peut être mise en lien avec l'évolution des politiques publiques et la prise en compte grandissante des problématiques environnementales. Les changements environnementaux devraient s'accroître dans l'avenir (changement climatique, urbanisation, pollutions...) et le suivi des écosystèmes à travers les cartes de végétations se révèle être d'une importance majeure. Il est ainsi primordial d'optimiser leur production, de favoriser leur usage afin d'exploiter et de valoriser au mieux leur capacité d'information.

L'étude de cas présentée dans cet article montre l'importance d'avoir des organismes moteurs pour favoriser l'acquisition de données sur la végétation (notamment les séries temporelles), leurs mutualisations, leur harmonisation, et le développement des partenariats techniques et scientifique. La production et la diffusion des cartes de végétations nécessitent des moyens à la hauteur des enjeux stratégiques que représentent ces documents pour l'aide à la décision. La méconnaissance de la dynamique des écosystèmes peut mener à des erreurs d'appréciation dans la planification de projet d'aménagement, notamment dans des milieux complexes comme les estuaires anthropisés. Par exemple, les projets réalisés dans le cadre d'opérations de restauration écologique s'avèrent compliquées à mettre en œuvre, nécessitant des données fines pour tenter de prévoir les trajectoires à long terme des systèmes écologique et hydro-sédimentaire (abandon d'un projet expérimental de création de vasière sur la rive nord de l'estuaire de la Loire,¹⁹ échec d'un méandre artificiel de l'estuaire de la Seine²⁰).

Les politiques de gestion du littoral doivent désormais prendre en compte l'augmentation du niveau d'incertitude liées au changement climatique : les activités humaines devront davantage

¹⁹ <https://www.loire-estuaire.org/accueil/les-actions/reequilibrage-du-lit-de-la-loire/reequilibrage-du-lit-de-la-loire-de-nantes-a-locean/operation-experimentale-de-creation-de-vasiere>

²⁰ <http://www.normandie.developpement-durable.gouv.fr/les-prairies-subhalophiles-coeur-de-biodiversite-a2754.html>

s'adapter aux dynamiques des milieux naturels plutôt que l'inverse (exemple du projet Adapto du Conservatoire du littoral²¹). Cette politique de recul stratégique avec une multiplication des réestuarisations nécessite un suivi régulier de l'évolution des écosystèmes pour adapter les activités présentes dans les estuaires : agriculture, tourisme, chasse, pêche, gestion et valorisation des espaces naturels (Guilloux & Dargentas 2019; Martin-Brelot & Sawtschuk 2019).

La gestion de ce socio-écosystème estuarien nécessite ainsi une attention permanente pour envisager sereinement le futur de cet espace naturel agricole, encore préservé, entouré de zones industrielles portuaires et urbaines (Nantes et Saint-Nazaire). Le Département de Loire-Atlantique, opérateur du site Natura 2000 et gestionnaire des terrains appartenant au Conservatoire du littoral, joue en partie ce rôle, mais la coordination et la réalisation d'inventaires cartographiques et naturalistes réguliers nécessite des moyens plus conséquents. Un projet de réserve naturelle nationale (RNN) de l'estuaire de la Loire, à l'image de celle qui existe depuis 1997 dans l'estuaire de la Seine, est initié depuis 2009. La mission de préfiguration argumentait en 2016 que « la RNN apporterait une contribution importante à la connaissance, au rééquilibrage du fonctionnement estuarien, à l'anticipation de ses évolutions, à la mise en cohérence des efforts en lien avec les activités socio-économiques »²². L'aboutissement de cette démarche représenterait une belle opportunité pour coordonner la collecte et l'analyse de données cartographiques sur la dynamique des écosystèmes, une réserve ayant les moyens de mettre en place et d'animer un réseau de suivi scientifique.

L'utilisation des cartographies de végétation représente un potentiel important pour travailler sur la modélisation des trajectoires des socio-écosystèmes. Surtout si ces cartographies sont analysées en comparaison d'autres données environnementales et humaines. Des analyses ont ainsi déjà été réalisées sur l'Estuaire de la Loire à partir du croisement de cartographies de végétations de différentes époques (Le Dez et al. 2017b) qui a ensuite été mis en parallèle avec le résultat de la simulation d'un modèle hydro-sédimentaire intégrant les effets du changement climatique (Le Dez et al. 2017a). Ces travaux mettent en évidence que des changements de végétations (progression des végétations des milieux salés) provoqués par les aménagements

²¹ <https://www.lifeadapto.eu/>

²² Extrait du Compte rendu de la Réunion du 5 juillet 2016 du comité de préfiguration sur le projet de réserve naturelle nationale de l'estuaire de la Loire, <http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/projet-de-rnn-de-l-estuaire-de-la-loire-a3809.html>

industriels et portuaires jusque dans les années 1990 dans l'estuaire aval se reproduiront probablement plus en amont, mais cette fois, en lien avec le changement climatique.

Une perspective de ce travail serait d'étendre l'analyse des usages et des productions de données à l'ensemble des données environnementales et socio-économiques. Une meilleure connaissance des données socio-économiques permettrait notamment de mieux comprendre le rôle des activités humaines dans les trajectoires passées, actuelles et futures de l'estuaire. Une analyse spécifique de la perception, du rôle et de l'usage des cartes de végétation comme média dans les processus décisionnels, dans les conflits et leurs résolutions mais aussi pour l'information auprès du grand public permettrait aussi de mieux percevoir le rôle joué par ces documents.

Synthèse et conclusion générale

Le développement de méthodes standardisées pour la cartographie des habitats

Dans un monde en évolution rapide où la pression sur les ressources naturelles est de plus en plus forte, l'utilisation de méthodes de cartographie des habitats rapides, précises et rentables s'avère essentielle pour la mise en place de mesures efficaces de gestion et de conservation des habitats. Actuellement, la méthode traditionnelle de cartographie basée sur les prospections de terrain reste encore largement utilisée (Ichter et al. 2014) en raison notamment de sa simplicité de mise en œuvre et des résultats satisfaisants obtenus pour certaines applications (Lewis et al. 2013; Rhodes et al. 2015). Pourtant, les performances de cette approche sont régulièrement remises en question par de nombreuses études, en particulier lors de son application sur de vastes territoires (Hearn et al. 2011; Ullerud et al. 2018; Eriksen et al. 2019). C'est le constat qui a été fait lors de l'élaboration de la première cartographie des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire', dont les étapes d'inventaire et de spatialisation des habitats s'étaient révélées particulièrement longues et coûteuses. Pour pallier ces difficultés, cette thèse avait pour principal objectif d'expérimenter de nouvelles approches basées sur l'utilisation des nouvelles technologies (Bouzillé 2014; Robin 2015). Plus précisément, nous avons focalisé nos recherches sur l'utilisation de méthodes innovantes répondant aux deux étapes fondamentales de la cartographie : l'identification et la spatialisation des habitats.

Dans un premier temps, nous avons cherché à répondre aux difficultés liées à l'identification des habitats afin de limiter les risques de divergences d'interprétations entre les opérateurs (Oliver et al. 2013; Maciejewski et al. 2020). Nous nous sommes orientés sur l'utilisation de la méthode 'système expert' qui constitue un outil d'identification formalisée des communautés végétales à partir d'un ensemble de règles prédéfinies (par exemple, la présence ou le recouvrement minimal de certaines espèces ou groupes d'espèces) (Tichý et al. 2019). Nous avons développé un système expert des végétations de l'estuaire de la Loire permettant une identification des associations végétales et des alliances, reflétant le lien entre les systèmes de classification phytosociologiques et d'habitats. L'intérêt de cette méthode était de permettre une identification de la végétation en suivant des référentiels typologiques existants afin de proposer une méthode standardisée au niveau national et européen. Par conséquent, l'outil que nous avons développé assure une identification des relevés selon le prodrome des végétations

de France (PVF1 et PVF2) et les typologies d'habitats EUNIS, Cahiers d'habitats et EUR28. Il constitue une véritable clé de détermination automatisée qui garantira à l'avenir une identification identique des végétations et des habitats répondant à la nécessité de méthodes plus objectives et reproductibles.

Dans un second temps, nous avons expérimentés l'utilisation de méthodes de télédétection afin de faciliter le processus de spatialisation des habitats sur l'ensemble du site Natura 2000. Nous avons évalué le potentiel (1) des données satellitaires Sentinel-2 afin de profiter d'images multispectrales acquises régulièrement au cours de l'année et (2) de données aéroportées hyperspectrales et LiDAR pour bénéficier d'images avec une très grande résolution spatiale et spectrale, accompagnées de données tridimensionnelles. Ces sources de données aux caractéristiques différentes ont permis d'élaborer deux cartes des habitats de l'estuaire de la Loire, apportant chacune d'entre-elles des informations complémentaires pour la gestion du site Natura 2000. De manière générale, les résultats obtenus sont cohérents avec la réalité de terrain et les écarts observés entre les cartes traduisent les différences de caractéristiques des images utilisées (résolution spatiale, spectrale, temporelle et tridimensionnelle) ainsi que les incertitudes liées aux transitions très progressives entre les communautés végétales impliquant la présence régulière de zones de transition (Dronova 2015; Rapinel et al. 2018b). À partir de ces cartes, il a été possible de mettre en exergue les enjeux de conservation du site, en particulier ceux liés à la directive Habitat-Faune-Flore, répondant entièrement à l'objectif d'un usage pour l'animation du site Natura 2000. Même si l'ensemble des habitats d'intérêt communautaire n'a pas pu être cartographié, ces cartes permettront de cibler et rendre plus efficace des prospections de terrain complémentaires nécessaires à la spatialisation de certains habitats.

Si les résultats obtenus ont été très précis, c'est en grande partie par la complémentarité des approches méthodologiques que nous avons développées. L'identification précise d'un important jeu de données de relevés phytosociologiques grâce à l'utilisation d'un système expert a constitué une étape indispensable pour assurer un échantillonnage quantitatif et qualitatif de données d'apprentissage pour la cartographie par télédétection. La richesse et la diversité de ces données d'apprentissage, associées à l'utilisation d'images de télédétection aux caractéristiques spectrales, spatiales, temporelles et tridimensionnelles adaptées à l'intégration des propriétés des habitats, à assurer des classifications avec un haut niveau de précision. Finalement, ce travail repose sur la combinaison indispensable entre l'approche de terrain et la

modélisation numérique, soulignant la nécessité d'une bonne transversalité des concepts et des méthodes entre écologues et télédéTECTEURS.

Les résultats de cette thèse s'inscrivent dans des réflexions menées actuellement en France sur le développement de nouvelles méthodes de cartographie des végétations et des habitats sur de grands territoires, tels que le programme CarHAB à l'échelle nationale (Olivier et al. 2010) ou, par exemple, les expérimentations menées au niveau régional dans l'ouest de la France par Sellin et al. (2015). La démarche exposée dans ce mémoire s'intègre en complément de ces programmes en proposant une approche plus fine, située à une échelle locale (au niveau de l'espace naturel), permettant une représentation des habitats avec une précision typologique compatible avec les objectifs de préservation de la biodiversité par les gestionnaires locaux.

De manière générale et jusqu'à récemment, ces approches restaient principalement expérimentales et développées dans le cadre de programmes de recherche. Leur usage pour des applications plus opérationnelles était encore rare et limité en raison notamment des difficultés d'accès aux données et au manque d'expertise de nombreux acteurs dans le traitement et l'analyse de ces données (Baghdadi & Zribi 2016). Aujourd'hui, on observe une nouvelle étape dans le développement et l'application de ces outils technologiques. Tout d'abord, les progrès récents dans les méthodes numériques facilitant l'identification des végétations (système expert, VegKey...) associés à la structuration de bases de données de relevés phytosociologiques à l'échelle nationale ou internationale constituent de grandes avancées pour la réalisation des inventaires et des typologies d'habitats (Chytrý et al. 2016; Agrillo et al. 2018; Chytrý et al. 2020). Ensuite, la progression constante des outils de télédéTECTION, en particulier en matière de capteurs (améliorations permanentes des résolutions spatiale et spectrale, essor des systèmes LiDAR...), de plateformes (satellites, systèmes aéroportés et drones) et de techniques d'analyse d'images (développement de logiciels de traitement, nouveaux algorithmes de classification...). Ces progrès technologiques devraient contribuer dans les années à venir à un usage accru de ces méthodes et outils pour la gestion et la conservation de la nature. D'autant plus que la mise en œuvre de ces démarches de cartographie des habitats est de plus en plus encouragée par l'UE, en particulier pour répondre aux obligations de la DHFF (Ichter et al. 2014).

Des approches de cartographie des habitats accessibles et rentables

La thèse ayant été menée dans un contexte de dispositif CIFRE, il nous semble important dans une perspective d'opérationnalité et de transposabilité de proposer un bilan financier indicatif (Fig. 53). Le graphique résume les dépenses engagées en fonction des 3 grandes étapes du projet correspondant aux 3 chapitres présentés dans ce mémoire : 1) élaboration de la typologie, 2) cartographie par télédétection et 3) analyse des usages des cartes. Au total, la thèse aura représenté un coût de 188 102 €. Les deux phases ayant entraîné les dépenses les plus élevées sont l'acquisition aéroportée des images hyperspectrales + LiDAR (28 848 €) et les pré-traitements de ces images (17 150 €). Ces deux opérations très spécifiques et nécessitant des compétences particulières ont été externalisées : le survol de l'estuaire de la Loire a été effectué par le bureau d'étude GEOFIT Expert et la phase de préparation des images a été réalisée par l'Université de Nantes (OSUNA). Cette dernière prestation a été facturée en frais d'environnement de la thèse CIFRE permettant d'assurer un tarif moins élevé que dans le cadre d'une mission classique. Le coût des autres phases a été calculé en fonction du nombre de jours de travail nécessaire à leur réalisation, sur la base d'un coût journalier de 209,59 €. Au total, l'étape d'élaboration de la typologie a représenté un coût de 70 003 €, avec comme dépenses principales la réalisation de la campagne de relevés de terrain et le développement du système expert. La cartographie par télédétection a nécessité l'engagement de 90 850 €, dont 28 085 € pour l'ensemble des phases liées à l'utilisation des images satellites Sentinel-2 et 62 765 € pour celles associées aux images hyperspectrales + LiDAR. La dernière étape, correspondant à l'analyse des usages des cartes, a représenté un coût de 10 480 € sur le budget de la thèse. Pour cette dernière mission, il est à noter que le travail a été réalisé en collaboration avec d'autres structures (GIP Loire Estuaire, EA 3149 LABERS et UMR 6590 ESO) pour lesquels les dépenses n'ont pas été intégrées dans cette synthèse. Pour finir, le temps consacré aux formations, à la rédaction du mémoire de thèse et aux démarches administratives représente la somme de 16 767 €.

La figure 53 fait également apparaître une évaluation des coûts pour la production de cartographies par télédétection similaires à celles produites pour la thèse, dans le cadre 1) d'une future actualisation de la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire, 2) d'une transposition de la démarche méthodologique sur un autre site Natura 2000 de superficie équivalente.

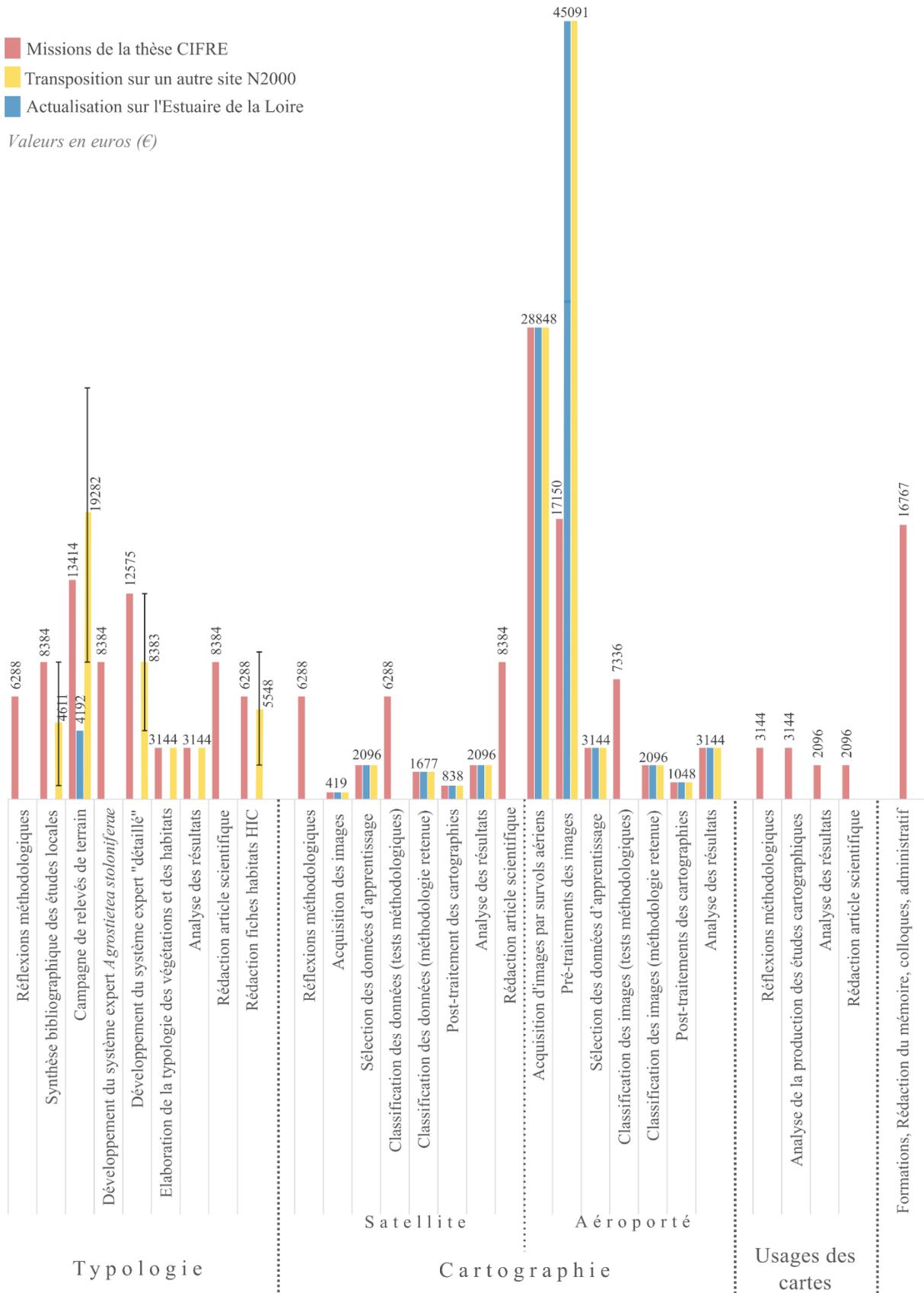


Figure 53. Bilan financier de la thèse (barres rouges) et évaluation des coûts pour une actualisation de la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire (barres jaunes) et dans le cadre de la transposition de la méthode sur un autre site Natura 2000 d'une superficie équivalente (barres bleues). Les barres d'incertitudes indiquent les variations possibles des coûts selon le niveau de connaissance typologique existant sur le site

L'avantage de reproduire la méthodologie (actualisation ou transposition) dans un objectif purement opérationnel est de pouvoir s'affranchir de plusieurs phases du travail effectuées pendant la thèse. D'une part, il s'agit des missions spécifiques au projet de recherche telles que la rédaction d'articles scientifiques ou la réalisation de la partie concernant l'analyse des usages des cartes. D'autre part, les différentes phases de développement méthodologique (réflexions méthodologiques, tests méthodologiques...) liées au caractère expérimental de la thèse, seraient évitées. Ensuite, il est possible de constater que l'estimation des coûts pour l'étape de cartographie est identique, que ce soit dans le cadre de l'actualisation ou la transposition de la démarche sur un autre site. Dans le détail, une approche à partir de l'imagerie satellitaire Sentinel-2 est estimée à 7 126 € tandis que l'utilisation d'images aéroportées hyperspectrales + LiDAR nécessiterait la somme de 83 371 € pour une surface de 24 000 ha. Pour cette dernière approche, le principal poste de dépense est représenté par les pré-traitements des images (45 091 €) qui augmente significativement pour une prestation en dehors du cadre d'une thèse. De manière générale, l'acquisition de données aériennes est reconnue pour être plus coûteuse que l'utilisation de données satellitaires (Dalponte et al. 2012; Luo et al. 2015; Onojeghuo & Onojeghuo 2017). Cependant, la mise en place de partenariats entre plusieurs structures recherchant ce type de données (images hyperspectrales et / ou LiDAR) peut permettre de réduire considérablement les coûts d'acquisition et de pré-traitement des données (Frati et al. 2020).

Finalement, les différences budgétaires entre une actualisation de cartographie et une transposition de la démarche sur un autre site vont apparaître lors de l'étape d'élaboration de la typologie. Pour une transposition, les estimations des coûts de la phase d'acquisition des données et d'élaboration de la typologie peuvent être très variables selon les sites. Ces différences seront liées à la quantité de données de terrain disponibles (relevés phytosociologiques) et au niveau de connaissance existant sur les végétations et les habitats du territoire. Sur un site ayant fait l'objet de nombreuses études, l'étape de synthèse bibliographique prendra davantage de temps (par exemple, 40 jours dans le cadre de ce projet) mais permettra de réduire considérablement le temps dédié aux prospections de terrain et assurera donc une réduction substantielle des coûts. A l'inverse, l'élaboration d'une cartographie sur un site avec pas ou peu de données préexistantes impliquera la réalisation d'une campagne de relevés de terrain plus conséquente et par conséquent des coûts plus élevés (Lewis et al. 2013), estimés supérieurs à 30 000 €. L'effort de prospection de terrain dépendra de la configuration du site (accès, superficie...) (Adam et al. 2010) et de la diversité des habitats

recensés (Benson 1995). Un site difficile à parcourir (présence de canaux, de falaises...) et constitué de nombreux habitats, entraînera des dépenses beaucoup plus élevées qu'un site facile d'accès et présentant un nombre réduit d'habitat. La quantité d'habitats recensés aura également un impact sur le temps d'élaboration du système expert et sur la durée de rédaction des fiches habitats. Pour la reproduction de la démarche dans le cadre de l'actualisation de la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire, les coûts liés à l'étape de typologie seraient considérablement moins élevés (4 192 €), se résumant à la phase de terrain. Cette campagne serait principalement réalisée dans l'objectif d'actualiser les relevés de terrain utilisés comme données d'apprentissage pour les classifications des images de télédétection. Ces nouvelles acquisitions seraient à réaliser en priorité sur les secteurs avec les dynamiques de végétation les plus importantes. A l'inverse, ces prospections permettraient de localiser les secteurs plus stables pour lesquels les relevés des études précédentes seraient encore utilisables comme données d'apprentissage. Ensuite, l'emploi du système expert établi dans le cadre de cette thèse, assurerait une identification instantanée des nouveaux relevés, à la différence du tri chronophage des relevés réalisés manuellement selon la méthode classique. Par conséquent, le temps consacré au développement du système expert lors de la thèse doit être considéré comme un investissement pour les études suivantes. En plus de réduire les coûts, l'utilisation du système expert garantirait un rattachement des relevés de manière identique à la thèse, sans risque de divergence liée au jugement subjectif de l'opérateur (Schaminée et al. 2016; Chytrý et al. 2020).

La figure 54 présente une comparaison de l'ensemble des coûts nécessaires pour l'élaboration d'une cartographie des habitats selon les différentes méthodes (satellite Sentinel-2, aéroportée hyperspectral + LiDAR et méthode traditionnelle de terrain). Les cartes produites dans le cadre de la thèse (satellitaire et aéroportée) reviennent à un montant de 7,84 € / hectare. Cette somme correspond à l'ensemble des frais engagés pour la réalisation de la thèse (188 102 €) divisé par la superficie de la zone d'étude (24 000 ha). Dans le cadre d'une actualisation de la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire, les coûts seraient considérablement réduits en raison 1) du retrait des phases spécifiques à la thèse, et 2) grâce à l'apport des données déjà disponibles (relevés, typologie...) et des outils développés (système expert, scripts de traitement des images...) pendant la thèse. Les estimations produites permettent d'envisager un coût de 47 centimes / ha pour une cartographie avec les images satellite Sentinel-2 et 3,65 € avec les images aéroportées hyperspectrales et LiDAR. Pour une transposition sur un autre site, ces montants

seraient plus élevés à cause de la nécessité d'intégrer les différentes phases d'élaboration de la typologie (synthèse bibliographique, campagne de terrain, élaboration du système expert...).

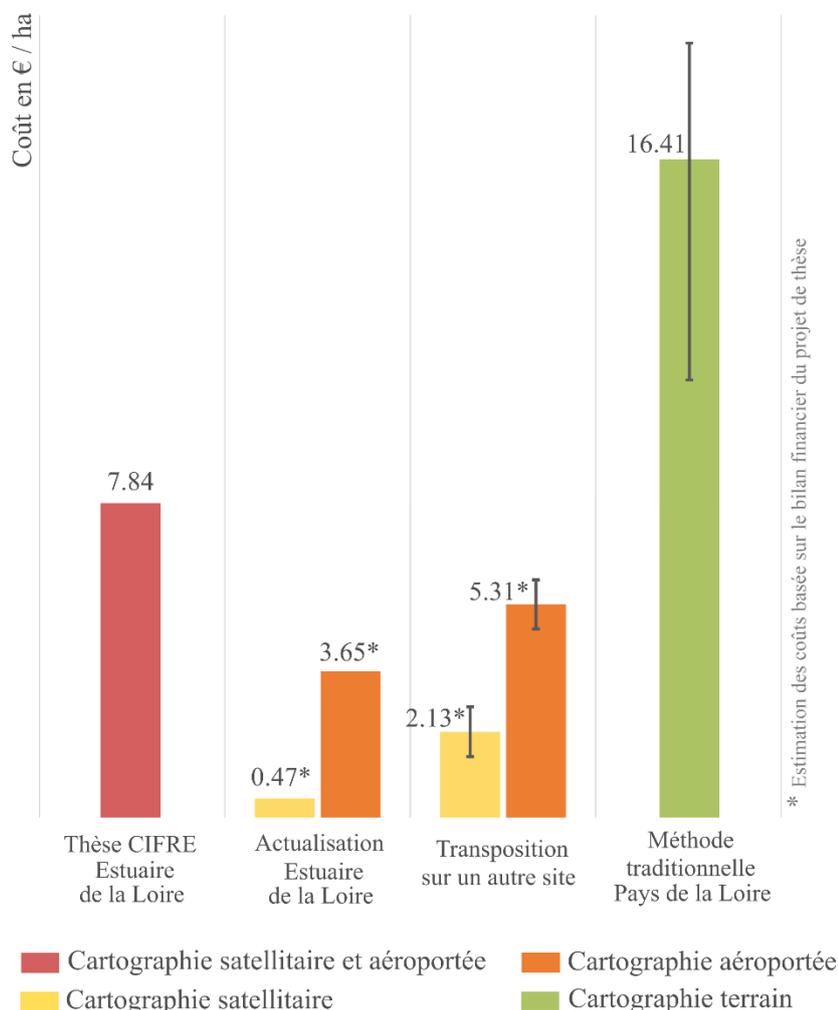


Figure 54. Prix à l'hectare pour la réalisation de cartographies d'habitats. Le coût de la cartographie dans le cadre de la thèse CIFRE intègre l'ensemble des frais engagés pour les 3 ans et 3 mois du doctorat. Le symbole '*' indique l'estimation des coûts pour i) une actualisation future de la carte des habitats de l'estuaire de la Loire (satellite ou aéroportée), ii) une transposition de la méthode sur un autre site Natura 2000 (satellite ou aéroportée). Les barres d'incertitudes indiquent les variations possibles des coûts selon le niveau de connaissance typologique existant sur le site. Le montant présenté pour une approche traditionnelle de cartographie par le terrain a été calculé à partir des coûts réels engagés sur plusieurs sites Natura 2000 récemment cartographiés dans les Pays de la Loire

Les coûts moyens estimés seraient de 2,13 € à partir des images satellite et 5,31 € pour l'utilisation des images aéroportées. Ces montants peuvent varier d'un site à l'autre selon la quantité de données bibliographiques disponibles, la complexité d'accès au site et la diversité des habitats. Pour finir, le prix moyen d'une cartographie par la méthode traditionnelle de terrain a été calculé à partir des coûts réels engagés récemment pour la réalisation de

cartographies sur plusieurs sites Natura 2000 des Pays de la Loire (Tab. 39). Avec cette méthode, le budget s'élève à 16,41 € / ha, soit 3 fois plus chère que le coût estimé avec une approche par télédétection aéroportée hyperspectrale + LiDAR, et 7 fois plus chère qu'avec l'utilisation de l'imagerie satellitaire Sentinel-2. Bien qu'elle soit appréciée pour sa simplicité de mise en œuvre, la méthode classique de terrain est reconnue comme étant extrêmement chronophage et peu adaptée aux grands territoires (Kopeć et al. 2016; Moran et al. 2017). La réalisation de cartographies par voie terrestre peut rester utile sur de petites superficies lorsque les exigences de qualité et de précision sont nécessaires (Luo et al. 2015; Ullerud et al. 2018). De manière générale, ces estimations sont conformes avec les résultats d'études précédentes qui présentent les méthodes de télédétection comme des outils rentables pour la cartographie des habitats (Szuster et al. 2011; Calleja et al. 2019; Marcinkowska-Ochtyra et al. 2019).

Ainsi, nos résultats démontrent qu'il est possible d'obtenir des cartographies d'habitats rapidement et à moindre coût en comparaison avec un travail de terrain réalisé classiquement (Ichter et al. 2014). Notre méthode est transposable sur d'autres sites naturels, au sein ou en dehors du réseau Natura 2000, ce qui a l'avantage de promouvoir une démarche méthodologique commune et standardisée pour la cartographie des habitats.

Tableau 39. Montants engagés pour la cartographie par la méthode classique de sites Natura 2000 en Pays de la Loire (source : DREAL Pays de la Loire)

Site Natura 2000	Superficie (ha)	Coût total (€)	Coût / ha (€)
Basses vallées Angevines	9 210	100 000	10,86
Lac de Grandlieu	6 292	119 000	18,91
Marais Breton (LIFE Sallina)	8 740	142 000	16,25
Marais de l'Erdre	2 565	45 000	17,54
Marais de Mès et Guérande (hors marais salant)	2 509	48 450	19,31
Marais de Mès et Guérande (LIFE Sallina)	2 650	45 000	16,98
Marais de Talmont	2 010	35 000	17,41
Vallée de la Loire de Nantes aux Ponts de Cé	16 522	231 000	13,98

Une réponse à la nécessité croissante de données cartographiques sur les habitats

Afin d'évaluer l'intérêt du développement de nouvelles démarches de cartographie des habitats, une analyse de leur production et de leurs usages a été effectuée à l'échelle de l'estuaire de la Loire. Ces investigations ont révélé que les acteurs utilisant les cartes de végétation et d'habitats sont nombreux et que leurs besoins sont importants. Plus précisément, nous avons constaté une demande croissante de données en matière de connaissance de la biodiversité, de son état, de son évolution ainsi que des pressions qui s'exercent sur elle. Ces observations ont pu être mises en relation avec l'évolution des politiques publiques et la nécessité d'une meilleure prise en considération de la préservation des milieux naturels. Ainsi, les informations apportées par la cartographie des habitats peuvent apporter des réponses à de nombreuses problématiques :

(1) Programme Natura 2000 : Grâce à la localisation des HIC, la cartographie des habitats constitue un support d'aide à la décision et à la planification de la gestion des sites Natura 2000 (MAEC²³, charte Natura 2000, études d'incidence). De plus, les informations concernant la réparation des habitats peuvent être croisées avec des couches de données sur la localisation des espèces végétales et animales rares et menacées afin de contribuer à une meilleure intégration des enjeux de conservation floristiques et faunistiques, en particulier ceux relevant de la DHFF. Par ailleurs, les méthodes développées dans cette thèse (système expert et télédétection) faciliteront le suivi sur le long terme des habitats à partir de cartographies produites régulièrement (tous les 3 ou 4 ans selon les types d'habitats) répondant ainsi aux articles 11 et 17 de la DHFF sur la surveillance et l'évaluation de l'état de conservation des HIC (Delbosc et al. 2021a). Plus précisément, notre méthode pourrait être adoptée pour évaluer la distribution et les superficies des habitats à l'échelle européenne, deux paramètres définis par la DHFF pour évaluer l'état de conservation des HIC (Gigante et al. 2016; Bijlsma et al. 2019). L'ensemble de ces résultats participera pleinement aux exigences européennes dans le cadre du rapportage requis par l'Europe pour chaque état membre.

(2) Support pour les politiques publiques : La cartographie des habitats peut participer à un objectif de désignation et de réévaluation d'aires protégées. A partir de la définition et la hiérarchisation des zones à forts enjeux de conservation, il est possible de mieux appréhender la délimitation écologique et paysagère des espaces naturels (réserves naturelles, ZNIEFF...).

²³ *Mesures Agro-Environnementales et Climatiques : pour le maintien de pratiques agricoles favorables aux habitats et espèces d'intérêt communautaire*

La cartographie des habitats peut également intervenir dans la définition des connectivités écologiques dans le cadre de la Trame verte et bleue pour maintenir une fonctionnalité écologique des territoires. Plus largement, une des perspectives seraient de caractériser et de cartographier les pressions s'exerçant sur les milieux naturels (mesures de l'évolution de l'étalement urbain, de la fragmentation des milieux naturels, ou encore de la conquête de la forêt au détriment de milieux ouverts à forts enjeux de biodiversité) pour hiérarchiser les facteurs de dégradation. La meilleure prise en compte des enjeux de conservation se traduirait par la localisation des secteurs à éviter et à compenser dans les projets d'aménagements (politique ERC – éviter, réduire compenser) et peut répondre à la politique de zéro artificialisation nette des sols (www.loire-atlantique.fr/terres-a-menager).

(3) Observations des changements globaux : La cartographie régulière des habitats de l'estuaire de la Loire est d'autant plus importante que les changements environnementaux et d'usages observés sur ce site sont rapides et devraient s'accroître avec les conséquences du changement climatique (Le Dez et al. 2017a; Quinio et al. 2020). Des analyses diachroniques des cartes des habitats en incluant des données d'usages de sols pourraient être réalisées en vue d'évaluer l'impact des changements qui s'opèrent sur le site.

Ainsi, en produisant des données cartographiques à l'échelle de l'ensemble de l'estuaire de la Loire, ce travail réalisé dans le cadre de la démarche Natura 2000 pourra être réutilisé par de nombreux autres praticiens pour différents usages. La valorisation de ces données auprès des différents acteurs locaux contribuera à assurer une vision partagée des enjeux de préservation de la biodiversité et participera à favoriser des objectifs de gestion concertés autour de ce territoire.

Bibliographie

- Adam E, Mutanga O, Rugege D (2010) Multispectral and hyperspectral remote sensing for identification and mapping of wetland vegetation: A review. *Wetl Ecol Manag* 18:281–296. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9169-z>
- Addabbo P, Focareta M, Marcuccio S, et al (2016) Contribution of Sentinel-2 data for applications in vegetation monitoring. *Acta IMEKO* 5:44–54
- Agrillo E, Alessi N, Jiménez-Alfaro B, et al (2018) The use of large databases to characterize habitat types: the case of *Quercus suber* woodlands in Europe. *Rend Lincei* 29:283–293. <https://doi.org/10.1007/s12210-018-0703-x>
- Amelot X, Couderchet L, Noucher M (2017) Données institutionnelles et données contributives sur la biodiversité, quelle légitimité ? Mappemonde. <https://doi.org/10.4000/mappemonde.2861>
- Asir D, Appavu S, Jebamalar E (2016) Literature Review on Feature Selection Methods for High-Dimensional Data. *Int J Comput Appl* 136:9–17. <https://doi.org/10.5120/ijca2016908317>
- Baena S, Moat J, Whaley O, Boyd DS (2017) Identifying species from the air : UAVs and the very high resolution challenge for plant conservation. 1–21. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188714>
- Baghdadi N, Zribi M (2016) Observation des Surfaces Continentales par Télédétection : techniques et méthodes. Iste éditions. Tome 1, pp.73-133.
- Bannari A, Morin D, Bonn F, Huete AR (1995) A review of vegetation indices. *Remote Sens Rev* 13:95–120. <https://doi.org/10.1080/02757259509532298>
- Bardat J, Bioret F, Botineau et al (2004) Prodrôme des végétations de France. Paris, Muséum d'Histoire Naturelle, 171 p.
- Basilico L, Gaudillat V, La Rivière M, et al (2020) Typologies, cartographie, données : Les habitats, objets vivants mieux identifiés. Les Rencontres N°75 Oct. 2020, OFB. Synthèse du séminaire national co-organisé par l'UMS PatriNat et l'unité Flore et Végétation de l'Office français de la biodiversité (OFB), avec le soutien du ministère de la Transition écologique (MTE) et du Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), les 30 et 31 janvier 2020 à Paris
- Becker BL, Lusch DP, Qi J (2007) A classification-based assessment of the optimal spectral and spatial resolutions for Great Lakes coastal wetland imagery. *Remote Sens Environ* 108:111–120. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.005>
- Belgiu M, Csillik O (2018) Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis. *Remote Sens Environ* 204:509–523. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.005>
- Belgiu M, Drăguț L (2016) ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Random forest in remote sensing : A review of applications and future directions. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 114:24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, et al (2012) Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol Lett* 15:365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>

- Bellman R (1961) *Adaptive control Processes : A guided tour*, Princeton University Press.
- Benot ML, Mony C, Merlin A, et al (2011) Clonal Growth Strategies Along Flooding and Grazing Gradients in Atlantic Coastal Meadows. *Folia Geobot* 46:219–235. <https://doi.org/10.1007/s12224-010-9082-5>
- Bensettiti F (coord.) (2001) *Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 1 : Habitats forestiers, volume 1 & 2*. Paris : La Documentation Française. 339 p. – 423 p.
- Bensettiti F, Gaudillat V, Haury J, et al (2002) *Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 3 : habitats humides*. Paris : La Documentation Française. 457 p.
- Bensettiti F, Bioret F, Roland J, et al (2004) *Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 2 : Habitats côtiers*. Paris : La Documentation Française. 399 p.
- Bensettiti F, Boulet B, Chavaudret-Laborie C, et al (2005) *Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 4 : Habitats agropastoraux, volume 1 & 2*. Paris : La Documentation Française. 445 p.
- Benson JS (1995) Sampling, strategies and costs of regional vegetation mapping. *The Globe*, (43), 18-28.
- Bijlsma RJ, Agrillo E, Attorre F, et al (2019) Defining and applying the concept of Favourable Reference Values for species habitats under the EU Birds and Habitats Directives : examples of setting favourable reference values. Wageningen: Wageningen Environmental Research, 2019. 219 p. (Wageningen Environmental Research report; 2929). <https://doi.org/10.18174/468534>
- Biondi E, Blasi C, Allegranza M, et al (2014) Plant communities of Italy: The Vegetation Prodrôme. *Plant Biosyst - An Int J Deal with all Asp Plant Biol* 148:728–814. <https://doi.org/10.1080/11263504.2014.948527>
- Bioret F (1983) Étude de la végétation du site du Carnet. Laboratoire d'écologie et de phytogéographie, U.E.R des sciences de la nature, Université de Nantes, Contrat de Recherche EDF n°ZT3715, 75 p.
- Bioret F, Gaudillat V, Royer JM (2013) The Prodrôme of French vegetation: a national synsystem for phytosociological knowledge and management issues. *Plant Sociol* 50:17–21
- Biotop (2007) Document d'objectifs des sites Natura 2000 « Estuaire de Loire » (SIC FR5200621 et ZPS FR5210103). DREAL Pays de la Loire. 370 p.
- Biotop (2010) Plan de gestion sur les espaces naturels du secteur aval de Priory (44) - Diagnostic écologique faune / flore / milieux naturels et contexte socio-économique. GPMNSN 142p.
- Bivand R, Keitt T, Rowlingson B (2015) Rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. Retrieved from <http://CRAN.R-project.org/package=rgdal>
- Blaschke T (2010) Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 65:2–16. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>
- Bonari G, Fernández-González F, Çoban S, et al (2021) Classification of the Mediterranean lowland to submontane pine forest vegetation. *Appl Veg Sci* 24:. <https://doi.org/10.1111/avsc.12544>
- Bonnet S, Toromanoff F, Bauwens S, et al (2013) *Principes de base de la télédétection et ses potentialités*

- comme outil de caractérisation de la ressource forestière–II. LiDAR aérien. Forêt Wallonne 28–41
- Bonneuil C, Frescoz JB (2016) L'événement Anthropocene. La Terre, l'histoire et nous. Points. 332 p.
- Botella C (2019) Méthodes statistiques pour la modélisation de la distribution spatiale des espèces végétales à partir de grandes masses d'observations incertaines issues de programmes de sciences citoyennes. Thèse de doctorat, Université de Montpellier, 262 p.
- Boutelier P (1979) Le rôle des roselières dans l'estuaire de la Loire, Thèse de 3ème cycle, Univ. de Nantes, Institut des Sciences de la Nature – Département des Sciences de la Terre. 129p.
- Bouzillé JB (1980) La végétation du Marais Breton (Vendée et Loire-Atlantique) Aspect floristique et dynamiques. Bull. SBCO n°12 pp.30-36
- Bouzillé JB (2014) Connaissance de la biodiversité végétale – Démarches et outils technologiques. Ted et Doc. Lavoisier. Paris, 304 p.
- Bouzillé JB, Bonis A, Thébaud G, et al (2017) Le traitement des données du prodrome des végétations de France via la base de données nationale VegFrance. Documents phytosociologiques - Actes du colloque de Saint-Mandé 2012 - Prodrome et cartographie des végétations de France. Vol. 6 pp.33-43
- Bouzillé JB, Kernéis E, Bonis A, Touzard B (2001) Vegetation and ecological gradients in abandoned salt pans in western France. *J Veg Sci* 12:269–278. <https://doi.org/10.2307/3236611>
- Bradter U, O'Connell J, Kunin W, et al (2019) Classifying grass-dominated habitats from remotely sensed data: the influence of spectral resolution, acquisition time and the vegetation classification system on accuracy and thematic resolution. *Sci Total Environ* 134584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134584>
- Braun-Blanquet J, Tüxen R (1952) *Irische Pflanzengesellschaften*. Beibl. Veröff. Geobot. Inst. Rübel Zurich
- Braun-Blanquet J (1965) *Plant sociology. The study of plant communities*. Hafner, New York, NY, US
- Brook B, Sodhi N, Bradshaw C (2008) Synergies among extinction drivers under global change. *Trends Ecol Evol* 23:453–460. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.03.011>
- Bunce RGH, Bogers MMB, Evans D, et al (2013) The significance of habitats as indicators of biodiversity and their links to species. *Ecol Indic* 33:19–25. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.07.014>
- Burai P, Deák B, Valkó O, Tomor T (2015) Classification of herbaceous vegetation using airborne hyperspectral imagery. *Remote Sens* 7:2046–2066. <https://doi.org/10.3390/rs70202046>
- Burkart M, Dierschke H, Hölzel N, et al. (2004) Synopsis der Pflanzengesellschaften Deutschlands. Heft 9. *Molinio-Arrhenatheretea* (E1). Teil 2: *Molinietalia*. Futter- und Streuwiesen feucht-nasser Standorte und Klassenübersicht *Molinio-Arrhenatheretea*. Göttingen: Floristisch-Soziologische Arbeitsgemeinschaft.
- Calleja F, Ondiviela B, Galván C, et al (2019) Mapping Estuarine Vegetation Using Satellite Imagery: The case of the invasive species *Baccharis halimifolia* at a Natura 2000 site. *Cont Shelf Res*. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.01.002>

- Carson R (1962) *Silent spring*. Boston, CA: Houghton Mifflin Company.
- Catteau E, Buchet J, Camart C et al (2021) *Végétation du nord de la France - Guide de détermination*. Biotope Éditions, ISBN : 978-2-36662-252-2 400 pages
- Ceballos G, Ehrlich PR, Raven PH (2020) Vertebrates on the brink as indicators of biological annihilation and the sixth mass extinction. *Proc Natl Acad Sci* 117:13596–13602. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922686117>
- Chadenas C, Andreu-Boussut V, Barthon C, et al (2020) La gouvernance des espaces protégés: vers un partage de la nature ? *Vertigo*. <https://doi.org/10.4000/vertigo.27491>
- Chagneau D, Lachaud A, Teulade L et al (2011) Évolution de la flore et de la végétation du Banc de Bilho (estuaire de la Loire). *Bulletin de la Société des Sciences Naturelles de l'Ouest de la France*, T.33 (4) - pp.195-205
- Chalumeau A, Bioret F (2013) *Méthodologie de cartographie phytosociologique en Europe : approches symphytosociologique et géosymphytosociologique. Synthèse bibliographique. Rapport Institut de Géoarchitecture, Université de Bretagne occidentale, Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie*, 124 p.
- Chenaval N, Lorillière R, Dugué H, et al (2011) Phénologie et durée de halte migratoire de quatre passereaux paludicoles en migration post-nuptiale en estuaire de la Loire. *Alauda*, no 79, pp. 149-156
- Cherrill A (2016) Inter-observer variation in habitat survey data: investigating the consequences for professional practice. *J Environ Plan Manag* 59:1813–1832. <https://doi.org/10.1080/09640568.2015.1090961>
- Cherrill A (2014) The occurrence, causes and consequences of inter-observer variation in identification of vegetation types and recommendations for improvements to standard ecological survey methods. Harper Adams University, Edgmond, UK, 16 p.
- Chiffaut A (2006) *Guide méthodologique des plans de gestion de réserves naturelles*. MEED - ATEN, Cahiers techniques n°79, Montpellier, 72 p.
- Cho G, Cromptvoets J (2019) The INSPIRE directive: some observations on the legal framework and implementation. *Surv Rev* 51:310–317. <https://doi.org/10.1080/00396265.2018.1454686>
- Chytrý M (Ed.) (2011) *Vegetace České republiky 3. Vodní a mokřadní vegetace. Vegetation of the Czech Republic 3. Aquatic and wetland vegetation*. Academia Praha
- Chytrý M, Hennekens SM, Jiménez-Alfaro B, et al (2016) European Vegetation Archive (EVA): an integrated database of European vegetation plots. *Appl Veg Sci* 19:173–180. <https://doi.org/10.1111/avsc.12191>
- Chytrý M, Tichý L (2003) *Diagnostic, constant and dominant species of vegetation classes and alliances of the Czech Republic: a statistical revision*. Brno: Masaryk University Brno, 2003. 231 pp. *Folia Fac. Sci. Nat. Univ. Mas. Brun., Biol.* 108. ISBN 80-210-3221-9
- Chytrý M, Tichý L, Hennekens SM, et al (2020) EUNIS Habitat Classification: Expert system, characteristic species combinations and distribution maps of European habitats. *Appl Veg Sci* avsc.12519. <https://doi.org/10.1111/avsc.12519>

- Chytrý M, Tichý L, Holt J, Botta-Dukát Z (2002) Determination of diagnostic species with statistical fidelity measures. *J Veg Sci* 13:79–90. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02025.x>
- Cianfaglione K (2021) Plant Landscape and Models of French Atlantic Estuarine Systems. Extended Summary of the Doctoral Thesis. *Transylvanian Rev Syst Ecol Res* 23:15–36. <https://doi.org/10.2478/trser-2021-0002>
- Cianfaglione K, Bioret F (2018) Autoecological and Synecological Resilience of *Angelica heterocarpa* M.J. Lloyd, Observed in the Loire Estuary (France). *Geogr Chang Veg Plant Funct Types - Geobot Stud* 333–346
- Clair M, Gaudillat V, Herard K (2005) Cartographie des habitats naturels et des espèces végétales appliquée aux sites terrestres du réseau NATURA 2000. Guide méthodologique, MNHN et Fédération des Conservatoires Botaniques Nationaux, 66 p.
- Clair M, Gaudillat V, Michez N et al (2019) HABREF v5.0, référentiel des typologies d’habitats et de végétation pour la France. Guide méthodologique. Rapport UMS PatriNat (AFB-CNRS-MNHN), Paris, 95 p.
- Claveras GC, Gossart C (2015) Enjeux et perspectives des données environnementales massives. *Terminal*. <https://doi.org/10.4000/terminal.1062>
- Colditz R (2015) An Evaluation of Different Training Sample Allocation Schemes for Discrete and Continuous Land Cover Classification Using Decision Tree-Based Algorithms. *Remote Sens* 7:9655–9681. <https://doi.org/10.3390/rs70809655>
- Cole B, Mcmorrow J, Evans M (2014) Spectral monitoring of moorland plant phenology to identify a temporal window for hyperspectral remote sensing of peatland. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 90:49–58. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.01.010>
- Collaud R, Millet J (2020) Inventaire et cartographies en France métropolitaine dans le réseau des CBN, Fédération des CBN – Office français de la biodiversité, Séminaire national sur les habitats – Typologies, cartographies et données : état des lieux des connaissances et des besoins, et perspectives, 30 et 31 janvier 2020, Paris, <http://seminaire-habitats.mnhn.fr/seminaire-2020/>
- Colomina I, Molina P (2014) Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 92:79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Congalton RG (1991) A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens Environ* 37:35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)
- Congalton RG, Green K (2019) *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data*. CRC Press
- Conrad O, Bechtel B, Bock M, et al (2015) System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci Model Dev* 8:1991–2007. <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>
- Corbane C, Lang S, Pipkins K, et al (2015) Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status - New opportunities and challenges. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 37:7–16. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.11.005>
- Costa JC, Neto C, Aguiar C, et al (2012) Vascular plant communities in Portugal (continental, the Azores and Madeira). *Global Geobotany*. ISSN 2253-6523. 2

- Crutzen PJ (2002) Geology of mankind. *Nature* 415:23–23. <https://doi.org/10.1038/415023a>
- Curran PJ, Dungan JL, Gholz HL (1990) Exploring the relationship between reflectance red edge and chlorophyll content in slash pine. *Tree Physiol* 7:33–48. <https://doi.org/10.1093/treephys/7.1-2-3-4.33>
- Dalponte M, Bruzzone L, Gianelle D (2012) Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data. *Remote Sens Environ* 123:258–270. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.013>
- Dalponte M, Bruzzone L, Vescovo L, Gianelle D (2009) The role of spectral resolution and classifier complexity in the analysis of hyperspectral images of forest areas. *Remote Sens Environ* 113:2345–2355. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.06.013>
- Dalponte M, Ørka HO, Gobakken T, et al (2013) Tree species classification in boreal forests with hyperspectral data. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 51:2632–2645. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2216272>
- Dashti H, Poley A, Glenn NF, et al (2019) Regional Scale Dryland Vegetation Classification with an Integrated Lidar-Hyperspectral Approach. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs11182141>
- Daudon M (1998) Opération locale Agriculture-Environnement des marais de la rive nord de l'estuaire de la Loire (Loire-Atlantique), Eude botanique préalable. LPO, DIREN Pays-de-Loire, 68 p.
- Davies C, Moss D (1998) EUNIS Habitats Classification. Final report to the European Topic Centre on Nature Conservation. Copenhagen: European Environment Agency
- Davies C, Moss D, Hill M (2004) EUNIS habitat classification revised 2004. In: Report to the European Topic Centre on Nature Protection and Biodiversity. European Environment Agency, pp. 307
- De Cáceres M, Chytrý M, Agrillo E, et al (2015) A comparative framework for broad-scale plot-based vegetation classification. *Appl Veg Sci* 18:543–560. <https://doi.org/10.1111/avsc.12179>
- de Foucault B (1984) Systématique, structuralisme et synsystématique des prairies hygrophiles des plaines atlantiques françaises, Thèse, Rouen, 675 p.
- de Foucault B (2011) Contribution au prodrome des végétations de France : les *Filipendulo ulmariae* – *Convolvuletea sepium* Géhu & Géhu-Franck 1987. *J. Bot. Soc. Bot. France*, 53 : 73-137
- de Foucault B, Bioret F (2010) Contribution au prodrome des végétations de France : les *Saginetea maritima* Westhoff et al. 1962. *J. Bot. Soc. Bot. France*, 50 : 59-83
- de Foucault B, Catteau E (2012) Contribution au prodrome des végétations de France: les *Agrostietea stoloniferae* Oberd. 1983. *J. Bot. Soc. Bot. France*, 59: 5–131
- de Foucault B, Bensettiti F, Noble V, Paradis G (2012) Contribution au prodrome des végétations de France: les *Nerio oleandri* – *Tamaricetea africanae* Braun-Blanq. & O. Bolòs 1958. *J. Bot. Soc. Bot. France*, 58: 41–54
- De Longueville B (2010) Community-based geoportals: The next generation? Concepts and methods for the geospatial Web 2.0. *Comput Environ Urban Syst* 34:299–308. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.04.004>
- Delassus L (2009) Caractérisation des végétations de marais salés de Basse-Normandie.

Conservatoire botanique national de Brest / Direction régional de l'environnement de Basse-Normandie, 90 p.

- Delbosc P, Ceccaldi A, Panaïotis C, et al (2018) Unités paysagères fonctionnelles : outil d'aide à la planification territoriale. Vertigo. <https://doi.org/10.4000/vertigo.23657>
- Delbosc P, Lagrange I, Rozo C, et al (2021a) Assessing the conservation status of coastal habitats under Article 17 of the EU Habitats Directive. *Biological Conservation*, 254 (October 2020). doi: 10.1016/j.biocon.2020.108935.
- Delbosc P, Le Dez M, Bouzillé JB, et al (2021b) Numerical classification of French vegetation of *Carici caryophylleae* – *Genistetea lobelii* J.-C. Klein 1972. *Mediterr Bot* 42:e68062. <https://doi.org/10.5209/mbot.68062>
- Delcoigne A, Thébaud G (2018) Contribution au prodrome des végétations de France : les *Phragmito-Magnocaricetea* Klika in Klika & Novak 1941 nom. conserv. *Documents Phytosociologiques*, 3ème série,7: pp.87-178
- Delegido J, Verrelst J, Alonso L, Moreno J (2011) Evaluation of Sentinel-2 Red-Edge Bands for Empirical Estimation of Green LAI and Chlorophyll Content. *Sensors* 11:7063–7081. <https://doi.org/10.3390/s110707063>
- Delpech R (1996) Vocabulaire de phytosociologie et de synécologie végétale, 38 p. La banque des mots, n° 51, Conseil International de la Langue Française
- Demaure JC (1979) Les contraintes écologiques à l'aménagement de l'estuaire de la Loire. *Penn ar bed*, 97, pp. 57-72.
- Deng JS, Wang K, Deng YH, Qi GJ (2008) PCA-based land-use change detection and analysis using multitemporal and multisensor satellite data. *Int J Remote Sens* 29:4823–4838. <https://doi.org/10.1080/01431160801950162>
- Dengler J (2017) Phytosociology. In: *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*. John Wiley & Sons, Ltd, Oxford, UK, pp 1–6
- Dengler J, Bergmeier E, Willner W, Chytrý M (2013) Towards a consistent classification of European grasslands. *Appl Veg Sci* 16:518–520. <https://doi.org/10.1111/avsc.12041>
- Devillers P, Devillers-Terschuren J, Ledant JP (1991) CORINE Biotopes Manual. Vol. 2. Habitats of the European Community. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Devillers P, Devillers-Terschuren J (1996) A Classification of Palaearctic Habitats. Council of Europe. Nature and Environment No. 78, Strasbourg.
- DG Environment (2017) Reporting under Article 17 of the Habitats Directive: Explanatory notes and guidelines for the period 2013–2018. Final version – May 2017. Brussels, 1–188. http://cdr.eionet.europa.eu/help/habitats_art17/index_htm
- Diamond JM (1989) Overview of recent extinctions. In: *Conservation for the Twenty-First Century* (eds Western, D.&Pearl, M.C.). Oxford University Press, Oxford, pp.37–41
- Díaz S, Pascual U, Stenseke M, et al (2018) Assessing nature's contributions to people. *Science* (80-) 359:270–272. <https://doi.org/10.1126/science.aap8826>

- Diekmann M (2003) Species indicator values as an important tool in applied plant ecology – a review. *Basic Appl Ecol* 4:493–506. <https://doi.org/10.1078/1439-1791-00185>
- Dortel F, Geslin J (2016) Liste des plantes vasculaires invasives des Pays de la Loire. Liste 2015. DREAL Pays de la Loire. Brest : Conservatoire botanique national de Brest, 36 p., 3 annexes
- Dortel F, Magnanon S, Brindejone O (2015) Liste rouge de la flore vasculaire des Pays de la Loire – Evaluation des menaces selon la méthodologie et la démarche de l’UICN : Document validé par l’UICN le 21/10/2015 et par le CSRPN le 26/11/2015. DREAL Pays de la Loire / Région des Pays de la Loire. Brest : Conservatoire botanique national de Brest, 53p. & annexes
- Douda J, Boublík K, Slezák M, et al (2016) Vegetation classification and biogeography of European floodplain forests and alder carrs. *Appl Veg Sci* 19:147–163. <https://doi.org/10.1111/avsc.12201>
- Dronova I (2015) Object-based image analysis in wetland research: A review. *Remote Sens* 7:6380–6413. <https://doi.org/10.3390/rs70506380>
- Dronova I, Gong P, Clinton NE, et al (2012) Landscape analysis of wetland plant functional types: The effects of image segmentation scale, vegetation classes and classification methods. *Remote Sens Environ* 127:357–369. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.018>
- Dronova I, Kislik C, Dinh Z, Kelly M (2021) A Review of Unoccupied Aerial Vehicle Use in Wetland Applications: Emerging Opportunities in Approach, Technology, and Data. *Drones* 5:45. <https://doi.org/10.3390/drones5020045>
- Drusch M, Del Bello U, Carlier S, et al (2012) Sentinel-2: ESA’s Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sens Environ* 120:25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Dupont P (1962) La flore atlantique européenne. Introduction à l’étude phytogéographique du secteur ibéro-atlantique. 19 décembre 1960. Thèse de doctorat, Université de Toulouse. Imp. Edouard Privat, Toulouse, France
- Dupont P (1978) La végétation des zones humides bordant l'estuaire de la Loire. Rapport OREAM Nantes/Saint-Nazaire, 250p, 15 cartes et figures
- Dupont P (1986) Principaux aspects de la végétation des zones humides de l’estuaire de la Loire. *Bull la Soc Bot Fr Lettres Bot* 133:41–60. <https://doi.org/10.1080/01811797.1986.10824688>
- Dupont P, Bernard JY, Bioret F (1983) Étude des associations végétales dans les zones humides de l’estuaire de la Loire. Laboratoire d’Écologie et de Phytogéographie, Université de Nantes. 96 p.
- Dupont P, Leaute JP (1979) Le réseau hydrologique et les activités agricoles des zones humides bordant l'estuaire de la Loire. Rapp., contrat OREAM (Minist. Envir.), 167 p., 21 cartes et figures
- Duval L, Hénaff G, Magnanon S (2015) Diffusion des documents et données environnementales au regard de leur statut juridique. *Terminal*. <https://doi.org/10.4000/terminal.1075>
- Ejrnæs R, Bruun HH, Aude E, Buchwald E (2004) Developing a classifier for the Habitats Directive grassland types in Denmark using species lists for prediction. *Appl Veg Sci* 7:71–80. <https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2004.tb00597.x>
- Ellenberg H, Weber HE, Düll R, et al (1991) Ziegerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. *Scripta Geobotanica*, 18,1–248

- Eriksen EL, Ullerud HA, Halvorsen R, et al (2019) Point of view: Error estimation in field assignment of land-cover types. *Phytocoenologia* 49:135–148. <https://doi.org/10.1127/phyto/2018/0293>
- Eriksen EL, Ullerud HA, Halvorsen R, et al (2018) Point of view : error estimation in field assignment of land-cover types Point of view : error estimation in field assignment of land-cover types. 0–14. <https://doi.org/10.1127/phyto/2018/0293>
- ETC-NPB - European Topic Centre on Nature Protection & Biodiversity (2002) Some general principles for biogeographical seminars. A discussion paper for the Scientific Working Group meeting, 16 September 2002. ETC/NPB, Paris, 5 p
- European Commission (1979) Council Directive 79/409/EEC of 2 April 1979 on the conservation of wild birds. *Official Journal L* 103
- European Commission (1992) Council Directive 92/43/EEC of 21 May 1992 on the conservation of natural habitats and of wild fauna and flora. *Official Journal of the European Union* 1992, 206, 7–50
- European Commission (2013) Interpretation Manual of European Union Habitats - EUR 28. Bruxelles, Belgium: European Commission DG Environment Nature
- Evangelidis K, Ntouros K, Makridis S, Papatheodorou C (2014) Geospatial services in the Cloud. *Comput Geosci* 63:116–122. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2013.10.007>
- Evans D (2006) The Habitats of the European Union Habitats Directive. *Biol Environ Proc R Irish Acad* 106:167–173. <https://doi.org/10.3318/BIOE.2006.106.3.167>
- Evans D (2010) Interpreting the habitats of Annex I: Past, present and future. *Acta Bot Gall* 157:677–686. <https://doi.org/10.1080/12538078.2010.10516241>
- Evans D (2012) Building the European Union’s Natura 2000 network. *Nat Conserv* 1:11–26. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.1.1808>
- Ewald J (2003) A critique for phytosociology. *J Veg Sci* 14:291–296. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02154.x>
- Farber SC, Costanza R, Wilson MA (2002) Economic and ecological concepts for valuing ecosystem services. *Ecol Econ* 41:375–392. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00088-5](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00088-5)
- Fauvel M, Lopes M, Dubo T, et al (2020) Prediction of plant diversity in grasslands using Sentinel-1 and -2 satellite image time series. *Remote Sens Environ* 237:111536. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111536>
- Fenske K, Feilhauer H, Förster M, et al (2020) Hierarchical classification with subsequent aggregation of heathland habitats using an intra-annual RapidEye time-series. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 87:102036. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.102036>
- Feret JB, Corbane C, Alleaume S (2015) Detecting the Phenology and Discriminating Mediterranean Natural Habitats with Multispectral Sensors-An Analysis Based on Multiseasonal Field Spectra. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens* 8:2294–2305. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2431320>
- Fernez T, Lafon P, Hendoux F (2015) Guide des végétations remarquables de la région Ile-de-France. Conservatoire botanique national du Bassin parisien, Direction régionale et interdépartementale de

l'environnement et de l'énergie d'Ile-de-France, Paris, 2 vol. : méthodologie, 68 pp. ; manuel pratique, 224 pp.

- Fieber KD, Davenport IJ, Ferryman JM, et al (2013) Analysis of full-waveform LiDAR data for classification of an orange orchard scene. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 82:63–82. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.05.002>
- Flahaut C, Schröter C (1910) Rapport sur la nomenclature phytogéographique. In. IIIe Congrès international de botanique. Wildemann, Bruxelles, 1910. Actes du IIIe Congrès international de botanique. Vol. 1 : Comptes rendus, excursions, etc., p. 131-162
- Fleury D (1974) Etude des sites naturels et des problèmes écologiques sur le cours de la Loire, du confluent de la Vienne à l'embouchure : Qualité de l'eau et pollutions. Rapp., contrat OREAM (Minist. Envir.) 230 p.
- Fourty T, Baret F, Jacquemoud S, et al (1996) Leaf optical properties with explicit description of its biochemical composition: Direct and inverse problems. *Remote Sens Environ* 56:104–117. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00234-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00234-0)
- Frampton WJ, Dash J, Watmough G, Milton EJ (2013) Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 82:83–92. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.007>
- Franke J, Navratil P, Keuck V, et al (2012) Monitoring Fire and Selective Logging Activities in Tropical Peat Swamp Forests. *IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens* 5:1811–1820. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2202638>
- Frati G, Launeau P, Robin M, et al (2020) Coastal Sand Dunes Monitoring by Low Vegetation Cover Classification and Digital Elevation Model Improvement Using Synchronized Hyperspectral and Full-Waveform LiDAR Remote Sensing. *Remote Sens* 13:29. <https://doi.org/10.3390/rs13010029>
- Free G, Bresciani M, Trodd W, et al (2020) Estimation of lake ecological quality from Sentinel-2 remote sensing imagery. *Hydrobiologia* 847:1423–1438. <https://doi.org/10.1007/s10750-020-04197-y>
- Frontier S, Pichod-Viale D (1991) Ecosystèmes : structure, fonctionnement, évolution, Masson, Paris, vol.1, 92 p
- Garcin M, Poisson B, Conil P (2006) Géométrie des formations géologiques de l'estuaire de la Loire, RAPPORT BRGM/RP-54878-FR, Orléans, 82p.
- Gargominy O, Terceirie S, Régner C, et al (2019) TAXREF v13, référentiel taxonomique pour la France : méthodologie, mise en œuvre et diffusion. Muséum national d'Histoire naturelle, Paris. Rapport Patrinat. 63 p.
- Gaudillat V, Argagnon O, Bensettiti F, et al (2018) Habitats d'intérêt communautaire : actualisation des interprétations des Cahiers d'habitats. Version 1, mars 2018. Rapport UMS PatriNat 2017-104. UMS PatriNat, FCBN, MTEs, Paris, 62 p
- Gautreau P, Noucher M (2013) Gouvernance informationnelle de l'environnement et partage en ligne des données publiques. *Netcom* 5–21. <https://doi.org/10.4000/netcom.1234>
- Geffray O, Ménanteau L (2004) Géographie de l'inondation des marais de la basse-Loire: l'exemple de la crue de l'hiver 2000-2001. *Norois* 11–28. <https://doi.org/10.4000/norois.852>

- Géhu JM (2006) Dictionnaire de sociologie et synécologie végétales. Cramer, Berlino-Stoccarda
- Géhu JM, Géhu J (1978) Les groupements à *Angelica heterocarpa* des estuaires atlantiques français. Colloques phytosociologiques, V « La végétation des prairies inondables » (Lille, 1976). pp.359-362
- Georis-Creuseveau J, Noucher M, Gourmelon F (2018) De la production de données d'observation à l'usage d'informations géographiques naturalistes. Cybergeog. <https://doi.org/10.4000/cybergeog.29884>
- Giannetti F, Barbati A, Mancini LD, et al (2018) European Forest Types: toward an automated classification. *Ann For Sci* 75:6. <https://doi.org/10.1007/s13595-017-0674-6>
- Gigante D, Attorre F, Venanzoni R et al. (2016) A methodological protocol for Annex I Habitats monitoring: the contribution of Vegetation science. *Plant Sociology*, 53(2), 77-87.
- Gigante D, Foggi B, Venanzoni R, et al (2016) Habitats on the grid: The spatial dimension does matter for red-listing. *J Nat Conserv* 32:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2016.03.007>
- Gillet F (2000) La phytosociologie synusiale intégrée. Guide méthodologique. Documents du Laboratoire d'Ecologie végétale, Institut de Botanique, Université de Neuchâtel. 68 p.
- GIP Loire Estuaire (2007) Un groupement végétal représentatif : les roselières, Cahiers indicateurs GIP Loire Estuaire, L2.B2, 8 p.
- GIP Loire Estuaire (2012) Submersibilité latérale dans l'estuaire, Cahiers indicateurs GIP Loire Estuaire, L1.D1, 8 p.
- GIP Loire Estuaire (2017) Un groupement végétal représentatif : les roselières, Cahiers indicateurs GIP Loire Estuaire, L2.B2, 8 p
- Gitelson AA, Kaufman YJ, Merzlyak MN (1996) Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sens Environ* 58:289–298. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00072-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7)
- Glemarec E, Delassus L, Goret M, et al (2015) Les landes du Massif armoricain. Approche phytosociologique et conservatoire. Brest : Conservatoire botanique national de Brest. (Les cahiers scientifiques et techniques du CBN de Brest ; 2)
- Godet L, Devictor V (2018) What Conservation Does. *Trends Ecol Evol* 33:720–730. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2018.07.004>
- Gorrod EJ, Keith DA (2009) Observer variation in field assessments of vegetation condition: Implications for biodiversity conservation. *Ecol Manag Restor* 10:31–40. <https://doi.org/10.1111/j.1442-8903.2009.00437.x>
- Grabska E, Hostert P, Pflugmacher D, Ostapowicz K (2019) Forest stand species mapping using the sentinel-2 time series. *Remote Sens* 11:1–24. <https://doi.org/10.3390/rs11101197>
- Green AA, Berman M, Switzer P, Craig MD (1988) A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 26:65–74. <https://doi.org/10.1109/36.3001>
- Groom Q, Weatherdon L, Geijzendorffer IR (2017) Is citizen science an open science in the case of

- biodiversity observations? *J Appl Ecol* 54:612–617. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12767>
- Gubbay S, Sanders N, Haynes T, et al (2016) European Red List of Habitats. Part 1. Marine habitats. Luxembourg : Publications Office of the European Union. 52 p.
- Guillou É, Dargentas M (2019) Représentations des usages et de l'évolution d'un territoire semi-naturel : l'exemple de la rive nord de l'estuaire de la Loire. *Penn ar Bed*, 231-232, pp. 8-13.
- Guinochet (1973) *Phytosociologie*. Masson, Paris, 227 p.
- Guitton H (2019) Catalogue préliminaire des groupements végétaux de Loire-Atlantique. Version 1.0. Agence française pour la biodiversité. Nantes : Conservatoire botanique national de Brest, 270 p.
- Guitton H, Terrisse J (2015) Pelouses annuelles amphibies, eutrophiles et thermophiles à *Crypsis aculeata*, *Crypsis schoenoides* et *Crypsis alopecuroides* des marais littoraux. *Bull Soc bot Centre-Ouest* 294–305
- Guitton H, Thomassin G (2016) Guide de reconnaissance des groupements végétaux des zones humides et aquatiques en Pays de la Loire. Clé de détermination des alliances de zones humides et aquatiques en Pays de la Loire. Agence de l'eau Loire Bretagne / Conseil Régional des Pays de la Loire. Nantes : Conservatoire botanique national de Brest. 48 p.
- Haest B, Vanden Borre J, Spanhove T, et al (2017) Habitat Mapping and Quality Assessment of NATURA 2000 Heathland Using Airborne Imaging Spectroscopy. *Remote Sens* 9:266. <https://doi.org/10.3390/rs9030266>
- Hamada Y, Stow DA, Coulter LL, et al (2007) Detecting Tamarisk species (*Tamarix spp.*) in riparian habitats of Southern California using high spatial resolution hyperspectral imagery. *Remote Sens Environ* 109:237–248. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.003>
- Hardy Environnement (2016) Inventaire et cartographie des groupements végétaux de l'île de la Motte. Nantes Métropole, 39 p.
- Harris A, Charnock R, Lucas RM (2015) Hyperspectral remote sensing of peatland floristic gradients. *Remote Sens Environ* 162:99–111. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.01.029>
- Haury J, Cabral T, Coudreuse J, et al. (2012) Plantes invasives dans les Marais Nord-Loire : bilan et analyse des expérimentations 2011. Agrocampus-Ouest, 53 p.
- Hearn SM, Healey JR, McDonald MA, et al (2011) The repeatability of vegetation classification and mapping. *J Environ Manage* 92:1174–1184. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.021>
- Hennekens SM, Schaminée JHJ (2001) TURBOVEG, a comprehensive data base management system for vegetation data. *J Veg Sci* 12:589–591. <https://doi.org/10.2307/3237010>
- Heywood VH (1995) *The global biodiversity assessment*. United Nations Environment Programme. Cambridge: Cambridge University Press
- Hijmans R.J. 2015. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling. Retrieved from <http://CRAN.R-project.org/package=raster>
- Hill MO (1989) Computerized matching of relevés and association tables, with an application to the British National Vegetation Classification. *Vegetatio* 83:187–194. <https://doi.org/10.1007/BF00031691>

- Hill MO, Mountford JO, Roy DB, Bunce RGH (1999) Ellenberg's indicator values for British plants, vol. 2, ECOFACT, CEH, UK, ISBN 1870393481, 46 p.
- Hladik C, Schalles J, Alber M (2013) Salt marsh elevation and habitat mapping using hyperspectral and LIDAR data. *Remote Sens Environ* 139:318–330. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.003>
- Hotelling H (1933) Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *J Educ Psychol* 24:417–441. <https://doi.org/10.1037/h0071325>
- Hughes G (1968) On the mean accuracy of statistical pattern recognizers. *IEEE Trans Inf Theory* 14:55–63. <https://doi.org/10.1109/TIT.1968.1054102>
- Husson E, Reese H, Ecke F (2017) Combining spectral data and a DSM from UAS-images for improved classification of non-submerged aquatic vegetation. *Remote Sens* 9:1–15. <https://doi.org/10.3390/rs9030247>
- Ichter J, Evans D, Richard D (2014) Terrestrial habitat mapping in Europe: an overview. *Eur. Environ. Agency*. 154 p.
- Ichter J, Savio L, Poncet L (2012) Synthèse des expériences européennes de cartographie de la végétation (Programme CarHAB), SPN-MNHN, MEDDE, Paris, 118 p.
- Immitzer M, Vuolo F, Atzberger C (2016) First Experience with Sentinel-2 Data for Crop and Tree Species Classifications in Central Europe. *Remote Sens* 8:166. <https://doi.org/10.3390/rs8030166>
- IPBES (2019) Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, and H. T. Ngo (editors). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 1148 pages. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
- Jänicke C, Okujeni A, Cooper S, et al (2020) Brightness gradient-corrected hyperspectral image mosaics for fractional vegetation cover mapping in northern California. *Remote Sens Lett* 11:1–10. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2019.1670518>
- Janssen JAM, Rodwell JS, García Criado M et al (2016) European red list of habitats—Part 2. Terrestrial and freshwater habitats. Publications Office of the European Union, Luxembourg
- Jia Q, Cao L, Yésou H, et al (2017) Combating aggressive macrophyte encroachment on a typical Yangtze River lake: lessons from a long-term remote sensing study of vegetation. *Aquat Ecol* 51:177–189. <https://doi.org/10.1007/s10452-016-9609-9>
- Jolivet C, Gurliat P (1995) Etude du Rôle des Genêts (*Crex crex*) sur la rive nord de l'estuaire de la Loire. *Spatule* n°1, pp. 15-33
- Jongman RHG, Múcher CA, Bunce RGH, et al (2019) A Review of Approaches for Automated Habitat Mapping and their Potential Added Value for Biodiversity Monitoring Projects. *J Landsc Ecol* 12:53–69. <https://doi.org/10.2478/jlecol-2019-0015>
- Julve P (2007) Baseflor. Index botanique, écologique et chorologique de la Flore de France. Programme Catminat. Disponible sur <http://philippe.julve.pagesperso-orange.fr/catminat.htm>
- Kaçki Z, Swacha G, Lengyel A, Korzeniak J (2021) Formalized Hierarchically Nested Expert System for Classification of Mesic and Wet Grasslands in Poland. *Acta Soc Bot Pol* 89. <https://doi.org/10.5586/asbp.8941>

- Kalacska M, Chmura GL, Lucanus O, et al (2017) Structure from motion will revolutionize analyses of tidal wetland landscapes. *Remote Sens Environ* 199:14–24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.023>
- Kamal M, Phinn S (2011) Hyperspectral data for mangrove species mapping: A comparison of pixel-based and object-based approach. *Remote Sens* 3:2222–2242. <https://doi.org/10.3390/rs3102222>
- Kapfer J, Hédl R, Jurasinski G, et al (2017) Resurveying historical vegetation data - opportunities and challenges. *Appl Veg Sci* 20:164–171. <https://doi.org/10.1111/avsc.12269>
- Kaplan G, Avdan U (2017) Mapping and Monitoring Wetlands Using SENTINEL-2 Satellite Imagery. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci IV*:271–277
- Kassouk Z, Launeau P, Roy R, et al (2010) Urban Mapping Using Hyperspectral Hypspec Images over Nantes City, Southern France. In *Proceedings of the IASIM-10*, 16. Dublin, Ireland. 18–19 November
- Kervingant G, Sawtschuk J (2019) Dynamiques environnementales de l'estuaire de la Loire. *Penn ar bed*, 231-232 pp. 1-5
- Kim M, Warner TA, Madden M, Atkinson DS (2011) Multi-scale GEOBIA with very high spatial resolution digital aerial imagery: scale, texture and image objects. *Int J Remote Sens* 32:2825–2850. <https://doi.org/10.1080/01431161003745608>
- Kočí M, Chytrý M, Tichý L (2003) Formalized reproduction of an expert-based phytosociological classification: A case study of subalpine tall-forb vegetation. *J Veg Sci* 14:601–610. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02187.x>
- Kolecka N, Ginzler C, Pazur R, et al (2018) Regional scale mapping of grassland mowing frequency with Sentinel-2 time series. *Remote Sens* 10:. <https://doi.org/10.3390/rs10081221>
- Kopeć D, Michalska-Hejduk D, Sławik Ł, et al (2016) Application of multisensoral remote sensing data in the mapping of alkaline fens Natura 2000 habitat. *Ecol Indic* 70:196–208. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.001>
- Kuhn M (2012) *Caret: Classification and Regression Training*. R package version 6.0-88, Available on <http://CRAN.R-project.org/package=caret> (contributions from Jed Wing, Steve Weston, Andre Williams, Chris Keefer, Allan Engelhardt and Tony Cooper)
- Laba M, Downs R, Smith S, et al (2008) Mapping invasive wetland plants in the Hudson River National Estuarine Research Reserve using quickbird satellite imagery. *Remote Sens Environ* 112:286–300. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.05.003>
- Labatut V, Cherifi H (2011) Evaluation of Performance Measures for Classifiers Comparison. *Ubiquitous Comput Commun J* 6:21–34
- Lacroix P, Figureau C, Guitton H, et al. (2009) Bilan des connaissances sur l'Angélique des estuaires (*Angelica heterocarpa* Lloyd) – Conservatoire Botanique National de Brest, Jardin Botanique de Nantes, Nantes Métropole, 26 p.
- Lacroix P, Hardy F, Le Bail J, et al (2010) Aide à la reconnaissance et à l'évaluation de l'état de conservation de l'habitat d'intérêt communautaire des prairies maigres de fauche de basse altitude (code Natura 2000: 6510) en région Pays-de-la-Loire". *Rev For Française*.

<https://doi.org/10.4267/2042/39242>

- Laengner ML, Siteur K, van der Wal D (2019) Trends in the seaward extent of saltmarshes across Europe from long-term satellite data. *Remote Sens* 11:1–25. <https://doi.org/10.3390/rs11141653>
- Lafage D, Bouzillé JB (2010 – 2013) Relevés phytosociologiques sur les prairies inondables de la Vallée de la Loire disponibles dans la base de données du CORELA (BD_Corela) - licence CC-BY-NC-ND (<http://phytosocio.org/#/bdd/utilisation>)
- Lafage D, Sacre S (2016) Plan de gestion des stations-réservoirs en faveur de l'Angelique des estuaires et du Scirpe triquetre sur l'estuaire de la Loire. DREAL Pays-de-la-Loire, 97p.
- Lafon P, Bissot R, Gouel S et al (2019) Catalogue des végétations du Conservatoire botanique national Sud-Atlantique (Aquitaine et Poitou-Charentes). Conservatoire Botanique National Sud-Atlantique. 280 p.
- Lahondère C (1997) Initiation à la phytosociologie sigmatiste. *Bulletin de la Société botanique du Centre-Ouest*. Numéro spécial, (16) : 7-47
- Landucci F, Gigante D, Venanzoni R (2011) An application of the Cocktail method for the classification of the hydrophytic vegetation at Lake Trasimeno (Central Italy). *Fitosociologia* 48:3–22
- Landucci F, Gigante D, Venanzoni R, Chytrý M (2013) Wetland vegetation of the class *Phragmito-Magnocaricetea* in central Italy. *Phytocoenologia* 43:67–100. <https://doi.org/10.1127/0340-269X/2013/0043-0545>
- Landucci F, Šumberová K, Tichý L, et al (2020) Classification of the European marsh vegetation (*Phragmito-Magnocaricetea*) to the association level. *Appl Veg Sci* 297–316. <https://doi.org/10.1111/avsc.12484>
- Landucci F, Tichý L, Šumberová K, Chytrý M (2015) Formalized classification of species-poor vegetation: A proposal of a consistent protocol for aquatic vegetation. *J Veg Sci* 26:791–803. <https://doi.org/10.1111/jvs.12277>
- Latraube F, Mourgaud G (2013) Déclinaison régionale pour les Pays de la Loire du plan national d'actions du phragmite aquatique – 2010-2014. LPO Loire-Atlantique, DREAL Pays de la Loire. 57 p.
- Launeau P, Giraud M, Ba A, et al (2018a) Full-waveform LiDAR pixel analysis for low-growing vegetation mapping of coastal foredunes in Western France. *Remote Sens* 10:. <https://doi.org/10.3390/rs10050669>
- Launeau P, Kassouk Z, Debaine F, et al (2017) Airborne hyperspectral mapping of trees in an urban area. *Int J Remote Sens* 38:1277–1311. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1285080>
- Launeau P, Méléder V, Verpoorter C, et al (2018b) Microphytobenthos Biomass and Diversity Mapping at Different Spatial Scales with a Hyperspectral Optical Model. *Remote Sens* 10:716. <https://doi.org/10.3390/rs10050716>
- Laurent E, Delassus L, Hardegen M (2017) Méthodes d'inventaire et de cartographie des groupements végétaux. Guide méthodologique. Brest : Conservatoire botanique national de Brest, 42 p. + annexes (Programme « Connaissance et cartographie des végétations sur de grands territoires : étude méthodologique »)

- Le Dez M, Sawtschuk J, Bioret F, et al (2017a) Anticiper les impacts du changement climatique dans un milieu naturel soumis à de fortes contraintes anthropiques : l'estuaire de la Loire. *Noroi* 15–28. <https://doi.org/10.4000/noroi.6206>
- Le Dez M, Sawtschuk J, Bioret F (2017b) Les prairies de l'estuaire de la Loire : étude de la dynamique de la végétation de 1982 à 2014. *Mappemonde* 119:1–18. <https://doi.org/10.4000/mappemonde.2097>
- Le Rhun PY (1986) Le risque nucléaire, donnée de l'aménagement du territoire ? L'exemple des projets de centrales nucléaires en Bretagne. *Noroi* 132:591–601. <https://doi.org/10.3406/noroi.1986.4355>
- Le Roy M, Sawtschuk J, Bioret F, Gallet S (2019) Toward a social-ecological approach to ecological restoration: a look back at three decades of maritime cliff-top restoration. *Restor Ecol* 27:228–238. <https://doi.org/10.1111/rec.12849>
- Lebret S (2001) Étude de la végétation et des habitats d'intérêt communautaire de la Loire en aval d'Ancenis, en relation avec la dynamique estuarienne. Rapport DESS Université François Rabelais: GIP Loire Estuaire. 101 p.
- Legleiter CJ, Marcus WA, Lawrence RL (2002) Effects of sensor resolution on mapping instream habitats. *Photogrammetric Eng. Remote Sens.* 68, 801–807
- Lengyel A, Chytrý M, Tichý L (2011) Heterogeneity-constrained random resampling of phytosociological databases. *J Veg Sci* 22:175–183. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2010.01225.x>
- Lengyel A, Landucci F, Mucina L, et al (2018) Joint optimization of cluster number and abundance transformation for obtaining effective vegetation classifications. *J Veg Sci* 29:336–347. <https://doi.org/10.1111/jvs.12604>
- Lewis D, Phinn S, Arroyo L (2013) Cost-effectiveness of seven approaches to map vegetation communities - A case study from Northern Australia's tropical savannas. *Remote Sens* 5:377–414. <https://doi.org/10.3390/rs5010377>
- Li QS, Wong FKK, Fung T (2017) Assessing the utility of UAV-borne hyperspectral image and photogrammetry derived 3d data for wetland species distribution quick mapping. *ISPRS - Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci XLII-2/W6:209–215*. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-209-2017>
- Liaw, A, Wiener M (2002) Classification and Regression by Random Forest. *R News*, 2, 18-22
- Liu X, Hou Z, Shi Z, et al (2017) A shadow identification method using vegetation indices derived from hyperspectral data. *Int J Remote Sens* 38:5357–5373. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1338785>
- Louis J, Pflug B, Main-Knorn M, et al (2019) Sentinel-2 Global Surface Reflectance Level-2a Product Generated with Sen2Cor. In: *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IEEE, pp 8522–8525
- Luisetti T, Turner RK, Jickells T, et al (2014) Coastal Zone Ecosystem Services: From science to values and decision making; a case study. *Sci Total Environ* 493:682–693. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.099>

- Luo S, Wang C, Xi X, et al (2015) Fusion of Airborne Discrete-Return LiDAR and Hyperspectral Data for Land Cover Classification. *Remote Sens* 8:3. <https://doi.org/10.3390/rs8010003>
- Ma Y, Zhang J, Zhang J (2016) Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) hyperspectral remote sensing monitoring key technology in coastal wetland. In: Bao W, Lv Y (eds). p 97962S
- Maciejewski L, Pinto PE, Wurpillot S, et al (2020) Vegetation unit assignments: phytosociology experts and classification programs show similar performance but low convergence. *Appl Veg Sci* 23:698–709. <https://doi.org/10.1111/avsc.12516>
- Magnanon S (1991) Contribution à l'étude des prairies inondables du marais de Donges et l'estuaire de la Loire. *Phyto-écologie, phytosociologie, valeur agronomique*, Thèse, Université de Nantes, 269 p. + annexes
- Magnanon S (1994) Les prairies naturelles inondables des marais de Donges. *Penn Ar Bed* N°155, p.20-38
- Magnanon S, Dupont P, Bioret F (1998) *Angelica heterocarpa* dans l'estuaire de la Loire : répartition, écologie, menaces. Propositions de mesures de gestion. Conservatoire Botanique National de Brest, DIREN Pays de la Loire 25 p + cartes et annexes
- Mallet C, Breta F (2009) Full-waveform topographic lidar : State-of-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 :1–16
- Marcadon J (2008) André VIGARIÉ et l'aménagement de la Basse-Loire : mise en perspective. *Cahiers Nantais* [En ligne], 1 | 2008, mis en ligne le 29 avril 2021, consulté le 28 août 2021. URL : <http://cahiers-nantais.fr/index.php?id=631>
- Marcenò C, Guarino R, Loidi J, et al (2018) Classification of European and Mediterranean coastal dune vegetation. *Appl Veg Sci* 21:533–559. <https://doi.org/10.1111/avsc.12379>
- Marcinkowska-Ochtyra A, Gryguc K, Ochtyra A, et al (2019) Multitemporal Hyperspectral Data Fusion with Topographic Indices-Improving Classification of Natura 2000 Grassland Habitats. *Remote Sens* 1–22. <https://doi.org/10.3390/rs11192264>
- Marcinkowska-Ochtyra A, Zagajewski B, Raczko E, et al (2018) Classification of high-mountain vegetation communities within a diverse Giant Mountains ecosystem using airborne APEX hyperspectral imagery. *Remote Sens* 10:. <https://doi.org/10.3390/rs10040570>
- Marion L et al. (1991) Projet d'application de la directive oiseaux de la CEE à l'estuaire de la Loire, 59 p., cartes, rapport APEEL, DRAE des Pays de la Loire.
- Martin-Brelot H, Sawtschuk J (2019) Quels avenir pour les prairies inondables au nord de l'estuaire de la Loire ? *Penn ar bed*, 231-232, pp. 14-21.
- Maxwell AE, Warner TA, Fang F (2018) Implementation of machine-learning classification in remote sensing: An applied review. *Int J Remote Sens* 39:2784–2817. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1433343>
- Meier U (1997) Growth stages of mono-and dicotyledonous plants. Blackwell Wissenschafts-Verlag.
- Meinard Y, Thébaud G (2019) L'identification syntaxonomique dans les démarches de gestion et/ou de restauration d'espaces naturels en France : pour ou contre ? *Naturae*, 6, 165-173.

- Mesnager C (2015) Plan de gestion de la station réservoir d'Angélique des estuaires (*Angelica heterocarpa* Lloyd) et de Scirpe triquètre (*Scirpus triqueter* L.) du Bras et de l'Etier de Cordemais (Cordemais - 44). EDF. Nantes: Conservatoire botanique national de Brest, 23p. + annexes
- Melin M, Shapiro AC, Glover-Kapfer P (2017) LIDAR for ecology and conservation. WWF Conserv Technol Ser 1:40. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22352.76801>
- Middleton M, Närhi P, Arkimaa H, et al (2012) Ordination and hyperspectral remote sensing approach to classify peatland biotopes along soil moisture and fertility gradients. *Remote Sens Environ* 124:596–609. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.06.010>
- Millard K, Richardson M (2015) On the importance of training data sample selection in Random Forest image classification: A case study in peatland ecosystem mapping. *Remote Sens* 7:8489–8515. <https://doi.org/10.3390/rs70708489>
- Mistarz M, Latour M (2019) État de conservation des habitats des eaux dormantes d'intérêt communautaire. Méthodes d'évaluation à l'échelle des sites Natura 2000. Cahiers d'évaluation. UMS PatriNat – AFB/CNRS/MNHN. 252p.
- Mitsch WJ, Gosselink JG (2000) The value of wetlands: importance of scale and landscape setting. *Ecological Economics* 35, 25-33
- Moeslund JE, Arge L, Bøcher PK, et al (2011) Geographically comprehensive assessment of salt-meadow vegetation-elevation relations using LiDAR. *Wetlands* 31:471–482. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0179-2>
- Mõisja K, Uuemaa E, Oja T (2018) The implications of field worker characteristics and landscape heterogeneity for classification correctness and the completeness of topographical mapping. *ISPRS Int J Geo-Information* 7:. <https://doi.org/10.3390/ijgi7060205>
- Moran N, Nieland S, Tintrup gen. Suntrup G, Kleinschmit B (2017) Combining machine learning and ontological data handling for multi-source classification of nature conservation areas. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 54:124–133. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.009>
- Mostafa Y, Abdelhafiz A (2017) Shadow Identification in High Resolution Satellite Images in the Presence of Water Regions. *Photogramm Eng Remote Sens* 83:87–94. <https://doi.org/10.14358/PERS.83.2.87>
- Mücher CA, Roupioz L, Kramer H, et al (2015) Synergy of airborne LiDAR and Worldview-2 satellite imagery for landcover and habitat mapping: A BIO SOS-EODHaM case study for the Netherlands. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 37:48–55. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.001>
- Mucina L, Bültmann H, Dierßen K, et al (2016) Vegetation of Europe: hierarchical floristic classification system of vascular plant, bryophyte, lichen, and algal communities. *Appl Veg Sci* 19:3–264. <https://doi.org/10.1111/avsc.12257>
- Musseau R, Herrmann V, Bénard S, et al (2014) Ecology of Aquatic Warblers *Acrocephalus paludicola* in a Fall Stopover Area on the Atlantic Coast of France. *Acta Ornithol* 49:93–105. <https://doi.org/10.3161/000164514X682922>
- Naeem S, Bunker DE, Hector A, et al (2009) Biodiversity, Ecosystem Functioning, and Human Wellbeing. Oxford University Press

- Nagendra H, Lucas R, Honrado JP, et al (2013) Remote sensing for conservation monitoring: Assessing protected areas, habitat extent, habitat condition, species diversity, and threats. *Ecol Indic* 33:45–59. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.014>
- Noble IR (1987) The role of expert systems in vegetation science. *Vegetatio* 69:115–121. <https://doi.org/10.1007/BF00038692>
- Oberdorfer E (1983) Klasse: *Agrostietea stoloniferae* Oberd. in Oberd. et al. 67. In: Oberdorfer, E. (Eds.), *Süddeutsche Pflanzengesellschaften. Teil III: Wirtschaftswiesen und Unkrautgesellschaften*. 2. Aufl., pp. 316–345.
- OCDE (2019) Biodiversity: Finance and the Economic and Business Case for Action, report prepared for the G7 Environment Ministers' Meeting, 5-6 May 2019.
- Oliver I, Broese EA, Dillon ML, et al (2013) Semi-automated assignment of vegetation survey plots within an a priori classification of vegetation types. *Methods Ecol Evol* 4:73–81. <https://doi.org/10.1111/j.2041-210x.2012.00258.x>
- Olivier J, Hendoux F, Gaudillat V, et al (2010) Cadre méthodologique pour une cartographie nationale des végétations naturelles et semi-naturelles terrestres en France (2010 2018, et au-delà). FCBN,MNHN-SPN, Cemagref, MEEDDM, Paris, 189p.
- Onojeghuo AO, Blackburn GA (2011) Optimising the use of hyperspectral and LiDAR data for mapping reedbed habitats. *Remote Sens Environ* 115:2025–2034. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.04.004>
- Onojeghuo AO, Onojeghuo AR (2017) Object-based habitat mapping using very high spatial resolution multispectral and hyperspectral imagery with LiDAR data. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 59:79–91. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.03.007>
- Ou W, Gao J, Yang G (2006) Primary Valuation on the Purification Function of Reed Wetland for N, P-A Case Study in the Coastal Yancheng. *Marine science bulletin-tianjin-chinese edition-*, 25(5), 90.
- Ouest Aménagement (2003) Inventaire et cartographie Natura 2000 de la Loire en aval de Nantes, volume 1 : flore et végétation. DREAL Bretagne, 80 p. + cartographies.
- Ozenda P (1974) De la carte de la végétation à une carte de l'environnement, Documents de cartographie écologique. Grenoble, 13, pp. 1-8.
- Pedrotti F (2013) Plant and vegetation mapping. *Geobotany Studies*, Berlin/Heidelberg, Springer Verlag : 1-294
- Peñuelas J, Filella I (1998) Visible and near-infrared reflectance techniques for diagnosing plant physiological status. *Trends Plant Sci* 3:151–156. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(98\)01213-8](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(98)01213-8)
- Peñuelas J, Gamon JA, Griffin KL, Field CB (1993) Assessing community type, plant biomass, pigment composition, and photosynthetic efficiency of aquatic vegetation from spectral reflectance. *Remote Sens Environ* 46:110–118. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90088-F](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90088-F)
- Perego A, Fugazza C, Vaccari L, et al (2012) Harmonization and Interoperability of EU Environmental Information and Services. *IEEE Intell Syst* 27:33–39. <https://doi.org/10.1109/MIS.2012.22>
- Pérez-Valladares CX, Velázquez A, Moreno-Calles AI, et al (2019) An expert knowledge approach for

- mapping vegetation cover based upon free access cartographic data: the Tehuacan-Cuicatlan Valley, Central Mexico. *Biodivers Conserv* 28:1361–1388. <https://doi.org/10.1007/s10531-019-01723-w>
- Peterka T, Hájek M, Jiroušek M, et al (2017) Formalized classification of European fen vegetation at the alliance level. *Appl Veg Sci* 20:124–142. <https://doi.org/10.1111/avsc.12271>
- Pinar A, Curran PJ (1996) Technical Note Grass chlorophyll and the reflectance red edge. *Int J Remote Sens* 17:351–357. <https://doi.org/10.1080/01431169608949010>
- Prošek J, Gdulová K, Barták V, et al (2020) Integration of hyperspectral and LiDAR data for mapping small water bodies. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 92:102181. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102181>
- Prošek J, Šimová P (2019) UAV for mapping shrubland vegetation: Does fusion of spectral and vertical information derived from a single sensor increase the classification accuracy? *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 75:151–162. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.009>
- Psomas A, Kneubühler M, Huber S, et al (2011) Hyperspectral remote sensing for estimating aboveground biomass and for exploring species richness patterns of grassland habitats. *Int J Remote Sens* 32:9007–9031. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.532172>
- Puissant A, Rougiera S, Stumpf A (2014) Object-oriented mapping of urban trees using random forest classifiers. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 26:235–245. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.07.002>
- Pullin AS, Báldi A, Can OE, et al (2009) Conservation Focus on Europe: Major Conservation Policy Issues That Need to Be Informed by Conservation Science. *Conserv Biol* 23:818–824. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01283.x>
- QGIS Development Team (2019) QGIS Geographic Information System (Version 3.4.8). Open Source Geospatial Foundation. URL <http://qgis.org>
- Quinio L, Kervarec F, Chauveau E (2020) La salinité et ses enjeux pour l’agriculture dans l’estuaire de la Loire. *Les Cahiers Nantais* 3–15
- R Development Core Team (2019) R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing
- Raab C, Stroh HG, Tonn B, et al (2018) Mapping semi-natural grassland communities using multi-temporal RapidEye remote sensing data. *Int J Remote Sens* 00:1–22. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1504344>
- Radecka A, Michalska-Hejduk D, Osińska-Skotak K, et al (2019) Mapping secondary succession species in agricultural landscape with the use of hyperspectral and airborne laser scanning data. *J Appl Remote Sens* 13:1. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.13.034502>
- Rameau JC (2001) De la typologie CORINE Biotopes aux habitats visés par la Directive Européenne 92/43. Le réseau Natura 2000 en France et dans les pays de l’Union Européenne et ses objectifs, Coll. Intern. Metz, 5 et 6 décembre 2000, pp. 57-63
- Rana VK, Venkata Suryanarayana TM (2020) Performance evaluation of MLE, RF and SVM classification algorithms for watershed scale land use/land cover mapping using sentinel 2 bands. *Remote Sens Appl Soc Environ* 19:100351. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100351>

- Rapinel S, Bonis A, Taureau F (2015a) Cartographie des végétations herbacées des marais littoraux à partir de données topographiques LiDAR. *Rev Fr Photogramm Teledetect*
- Rapinel S, Clément B, Magnanon S, et al (2014) Identification and mapping of natural vegetation on a coastal site using a Worldview-2 satellite image. *J Environ Manage* 144:236–246. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.027>
- Rapinel S, Dusseux P, Bouzillé JB, et al (2018a) Structural and functional mapping of geosigmeta in Atlantic coastal marshes (France) using a satellite time series. *Plant Biosyst - An Int J Deal with all Asp Plant Biol* 152:1101–1108. <https://doi.org/10.1080/11263504.2017.1418447>
- Rapinel S, Rossignol N, Hubert-Moy L, et al. (2018b) Mapping grassland plant communities using a fuzzy approach to address floristic and spectral uncertainty. *Appl Veg Sci* 1–16. <https://doi.org/10.1111/avsc.12396>
- Rapinel S, Hubert-Moy L, Clément B (2015b) Combined use of lidar data and multispectral earth observation imagery for wetland habitat mapping. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 37:56–64. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.002>
- Rapinel S, Mony C, Lecoq L, et al (2019) Evaluation of Sentinel-2 time-series for mapping floodplain grassland plant communities. *Remote Sens Environ* 223:115–129. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.01.018>
- Reaka-Kudla ML, Wilson DE, Wilson EO (Eds.) (1996) *Biodiversity II: understanding and protecting our biological resources*. Joseph Henry Press
- Reed DJ (1993) Hydrology of temperate wetlands. *Prog Phys Geogr Earth Environ* 17:20–31. <https://doi.org/10.1177/030913339301700102>
- Rhodes CJ, Henrys P, Siriwardena GM, et al (2015) The relative value of field survey and remote sensing for biodiversity assessment. *Methods Ecol Evol* 6:772–781. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12385>
- Richardson M, Millard K (2018) Geomorphic and Biophysical Characterization of Wetland Ecosystems with Airborne LiDAR: Concepts, Methods, and a Case Study. In *High Spatial Resolution Remote Sensing* (pp. 307-345). CRC Press.
- Rivas-Martínez S, Fernández-González F, Loidi J, et al. (2001) *Syntaxonomical checklist of vascular plant communities of Spain and Portugal to association level*. León: Servicio de Publ. de la Univ. de León.
- Roberts D, Roth K, Perroy R (2011) Hyperspectral Vegetation Indices. In: *Hyperspectral Remote Sensing of Vegetation*. CRC Press, pp 309–328
- Robin M (2015) *Intérêt de la télédétection pour la connaissance et la conservation de la biodiversité. Pour une géographie de la conservation*. Biodiversités, natures et sociétés, L'Harmattan, pp.243-262, 978-2-343-06972-2. Paris, France
- Rodriguez-Galiano VF, Ghimire B, Rogan J, et al (2012) An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 67:93–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
- Rodríguez-Rojo MP, Fernández-González F, Tichý L, Chytrý M (2014) Vegetation diversity of mesic

- grasslands (*Arrhenatheretalia*) in the Iberian Peninsula. *Appl Veg Sci* 17:780–796. <https://doi.org/10.1111/avsc.12118>
- Rodríguez-Rojo MP, Font X, García-Mijangos I, et al (2020) An expert system as an applied tool for the conservation of semi-natural grasslands on the Iberian Peninsula. *Biodivers Conserv* 29:1977–1992. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01963-1>
- Rodwell JS (1991-2000) *British Plant Communities Volumes 1-5*. CUP, Cambridge
- Rodwell JS, Dring J, Pignatti S, et al (2002) Phytosociological relationships of EUNIS habitats. Scientific background to the EUNIS habitat classification
- Rodwell JS, Evans D, Schaminée JHJ (2018) Phytosociological relationships in European Union policy-related habitat classifications. *Rend Lincei* 29:237–249. <https://doi.org/10.1007/s12210-018-0690-y>
- Rodwell JS, Morgan V, Jefferson RG, Moss D (2007) The European context of British lowland grasslands. Joint Nature Conservation Committee Report No. 394, Peterborough, UK
- Salisbury FB, Ross CW (1992) *Plant Physiology*; Wadworth: Belmont, CA, USA
- Sankey T, Donager J, McVay J, Sankey JB (2017) UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA. *Remote Sens Environ* 195:30–43. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.007>
- Savio L, Gaudillat V, Poncet L (2015) Enquête sur les besoins en termes de végétation et d’habitats en France. Synthèse et analyse au regard du programme CarHAB. Rapport SPN 2015/34. MNHN-DIREV-SPN, MEDDE, Paris. 90 p. + annexes
- Sawtschuk J, Bioret F (2012) Analyse diachronique de la dynamique spatiale de la végétation de l’estuaire de la Loire. *Photo-interprétation*, 48, 3, pp. 15-28.
- Schaminée JHJ, Chytry M, Dengler J, et al (2016) Development of distribution maps of grassland habitats of EUNIS habitat classification
- Schaminée JHJ, Janssen JAM, Hennekens SM, Ozinga WA (2011) Large vegetation databases and information systems: New instruments for ecological research, nature conservation, and policy making. *Plant Biosyst* 145:85–90. <https://doi.org/10.1080/11263504.2011.602744>
- SCE (2011) Suivi de la végétation acquisition et analyse de données marais du Syl zone test de Saint-Etienne-de-Montluc et Champtoceau. *GIP Loire Estuaire*, 32 p.
- Sellier D (2012) Géomorphologie de l’estuaire de la Loire, éléments de vulgarisation et de patrimonialisation. *Cah Nantais* 1:45–64
- Sellin V, Magnanon S, Gourmelon F, et al (2015) Etude expérimentale en cartographie de la végétation par télédétection. *Cybergeo*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27067>
- Shi Y, Wang T, Skidmore AK, et al (2021) Mapping individual silver fir trees using hyperspectral and LiDAR data in a Central European mixed forest. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 98:102311. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102311>
- Shoko C, Mutanga O (2017) Examining the strength of the newly-launched Sentinel 2 MSI sensor in detecting and discriminating subtle differences between C3 and C4 grass species. *ISPRS J*

- Photogramm Remote Sens 129:32–40. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.04.016>
- Sims DA, Gamon JA (2002) Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens Environ* 81:337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Sissingh G, Tideman P (1960) De Plantengemeenschappen uit de Omgeving van Didam en Zevenaer. *Meded. Landb. Hogesch. Wageningen* 60: 1-30.
- Sławik Ł, Niedzielko J, Kania A, et al (2019) Multiple flights or single flight instrument fusion of hyperspectral and ALS data? A comparison of their performance for vegetation mapping. *Remote Sens* 11:. <https://doi.org/10.3390/rs11080913>
- Smits PC, Dellepiane SG, Schowengerdt RA (1999) Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: A review and a proposal for a cost-based approach. *Int J Remote Sens* 20:1461–1486. <https://doi.org/10.1080/014311699212560>
- Sordello RG, Rogeon R, Touroult J (2011) Contribution à la réflexion sur le suivi et l'évaluation de la Trame verte et bleue - Enjeux nationaux de biodiversité : propositions sur les espèces et les habitats, Rapport MNHN-SPN, 24
- Souheil HL, Germain D, Boivin R, et al (2011) Guide méthodologique d'élaboration des Documents d'objectifs Natura 2000. Atelier Technique des Espaces Naturels, Montpellier, 120 p.
- Stehman S V. (1997) Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy. *Remote Sens Environ* 62:77–89. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00083-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00083-7)
- Stenzel S, Feilhauer H, Mack B, et al (2014) Remote sensing of scattered natura 2000 habitats using a one-class classifier. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 33:211–217. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.012>
- Stevens JP, Blackstock TH, Howe EA, Stevens DP (2004) Repeatability of Phase 1 habitat survey. *J Environ Manage* 73:53–59. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.05.009>
- Stratoulas D, Balzter H, Sykioti O, et al (2015) Evaluating sentinel-2 for lakeshore habitat mapping based on airborne hyperspectral data. *Sensors (Switzerland)* 15:22956–22969. <https://doi.org/10.3390/s150922956>
- Sun Y, Wong AKC, Kamel MS (2009) Classification of imbalanced data: a review. *Int J Pattern Recognit Artif Intell* 23:687–719. <https://doi.org/10.1142/S0218001409007326>
- Swacha G, Kaćki Z, Załuski T (2016) Classification of *Molinia* meadows in Poland using a hierarchical expert system. *Phytocoenologia* 46:33–47. <https://doi.org/10.1127/phyto/2016/0094>
- Szuster BW, Chen Q, Borger M (2011) A comparison of classification techniques to support land cover and land use analysis in tropical coastal zones. *Appl Geogr* 31:525–532. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2010.11.007>
- Theurillat J, Willner W, Fernández-González F, et al (2021) International Code of Phytosociological Nomenclature. 4th edition. *Appl Veg Sci* 24:. <https://doi.org/10.1111/avsc.12491>
- Thomas CD, Cameron A, Green RE, et al (2004) Extinction risk from climate change. *Nature* 427:145–148. <https://doi.org/10.1038/nature02121>

- Tichý L (2002) JUICE, software for vegetation classification. *J Veg Sci* 13:451–453. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2002.tb02069.x>
- Tichý L, Chytrý M (2006) Statistical determination of diagnostic species for site groups of unequal size. *J Veg Sci* 17:809–818. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2006.tb02504.x>
- Tichý L, Chytrý M (2019) Probabilistic key for identifying vegetation types in the field: a new method and Android application. *J Veg Sci* 0–2. <https://doi.org/10.1111/jvs.12799>
- Tichý L, Chytrý M, Botta-Dukát Z (2014) Semi-supervised classification of vegetation: Preserving the good old units and searching for new ones. *J Veg Sci* 25:1504–1512. <https://doi.org/10.1111/jvs.12193>
- Tichý L, Chytrý M, Landucci F (2019) GRIMP: A machine-learning method for improving groups of discriminating species in expert systems for vegetation classification. *J Veg Sci* 30:5–17. <https://doi.org/10.1111/jvs.12696>
- Tichý L, Holt J (2006) JUICE program for management, analysis and classification of ecological data. Veg. Sci. Group, Masaryk Univ. Czech Republic. Available line http://www.sci.muni.cz/botany/juice/JUICEman_all.pdf 72 pp
- Tittensor DP, Walpole M, Hill SLL, et al (2014) A mid-term analysis of progress toward international biodiversity targets. *Science* (80-) 346:241–244. <https://doi.org/10.1126/science.1257484>
- Turner W, Spector S, Gardiner N, et al (2003) Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends Ecol Evol* 18:306–314. [https://doi.org/10.1016/S0169-5347\(03\)00070-3](https://doi.org/10.1016/S0169-5347(03)00070-3)
- Tüxen R, Preising E (1951) Erfahrungsgrundlagen für die pflanzensoziologische Kartierung des westdeutschen Grünlandes. *Angew. Pflanzensoz.* 4: 1-28
- UICN France, FCBN, AFB, MNHN (éds) (2018) La Liste rouge des espèces menacées en France. Chapitre flore vasculaire de France métropolitaine. Paris : UICN France, 32 p. <http://www.cbnbrest.fr/docnum.php?id=68173>
- Ullerud HA, Bryn A, Halvorsen R, Hemsing LØ (2018) Consistency in land-cover mapping: Influence of field workers, spatial scale and classification system. *Appl Veg Sci* 21:278–288. <https://doi.org/10.1111/avsc.12368>
- Urvois V (2019) Analyse des usages de la cartographie de végétations dans l'estuaire de la Loire entre Nantes et Saint-Nazaire. GIP Loire Estuaire, Mém. de stage M2 Biologie Écologie Évolution - Parcours Écologie et éco-ingénierie des zones humides. Université d'Angers, 55 p.
- Valero S, Ceamanos X (2016) Traitement d'images hyperspectrales. In: Observation des surfaces continentales par télédétection optique - Techniques et méthodes, ISTE editi. p 366
- Vanden Borre J, Spanhove T, Haest B (2017) Towards a Mature Age of Remote Sensing for Natura 2000 Habitat Conservation: Poor Method Transferability as a Prime Obstacle. *Roles Remote Sens Nat Conserv* 11–37. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64332-8_2
- Verger F (2005) Marais et estuaires du littoral français, Paris, Belin, 335 p.
- Villaret JC, Van Es J, Sanz T, et al (2019) Guide des habitats naturels et semi-naturels des Alpes: Du Jura méridional à la Haute Provence et des bords du Rhône au Mont-Blanc. Description, écologie, espèces diagnostiques, conservation. Naturalia Publications & Conservatoire botanique national

alpin, ISBN 9-79-10-94583-3-0-2

- Vrieling A, Meroni M, Darvishzadeh R, et al (2018) Vegetation phenology from Sentinel-2 and field cameras for a Dutch barrier island. *Remote Sens Environ* 215:517–529. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.03.014>
- Wainstain J (2021) Partager les données pour réussir les transitions agricoles et alimentaires. pp 191–206
- Wakulińska M, Marcinkowska-Ochtyra A (2020) Multi-temporal sentinel-2 data in classification of mountain vegetation. *Remote Sens* 12:. <https://doi.org/10.3390/RS12172696>
- Ward RD, Burnside NG, Joyce CB, Sepp K (2013) The use of medium point density LiDAR elevation data to determine plant community types in Baltic coastal wetlands. *Ecol Indic* 33:96–104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.08.016>
- Warren R, Price J, VanDerWal J, et al (2018) The implications of the United Nations Paris Agreement on climate change for globally significant biodiversity areas. *Clim Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-018-2158-6>
- Waser L, Kuchler M, Jütte K, Stampfer T (2014) Evaluating the Potential of WorldView-2 Data to Classify Tree Species and Different Levels of Ash Mortality. *Remote Sens* 6:4515–4545. <https://doi.org/10.3390/rs6054515>
- White J, Doyle G (1982) The vegetation of Ireland: a catalogue raisonne. *Journal of Life Science of the Royal Dublin Society*, 3 (2), 289–368
- Willner W (2011) Unambiguous assignment of relevés to vegetation units: The example of the *Festuco-Brometea* and *Trifolio-Geranietea sanguinei*. *Tuexenia*, 31(1), pp. 271–282.
- Willner W, Rolecek J, Korolyuk A, et al (2019) Formalized classification of semi-dry grasslands in central and eastern Europe. *Preslia* 91:25–49. <https://doi.org/10.23855/preslia.2019.025>
- Wiser SK (2016) Achievements and challenges in the integration, reuse and synthesis of vegetation plot data. *J Veg Sci* 27:868–879. <https://doi.org/10.1111/jvs.12419>
- Wittke S, Yu X, Karjalainen M, et al (2019) Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 76:167–178. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.11.009>
- Wu ST, Hsieh YT, Chen CT, Chen JC (2014) A Comparison of 4 Shadow Compensation Techniques for Land Cover Classification of Shaded Areas from High Radiometric Resolution Aerial Images. *Can J Remote Sens* 40:315–326. <https://doi.org/10.1080/07038992.2014.979488>
- WWF (2018) Living Planet Report - 2018: Aiming Higher. Grooten, M. and Almond, R.E.A.(Eds). WWF, Gland, Switzerland
- Xue J, Su B (2017) Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. *J Sensors* 2017:. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
- Yan Y, Deng L, Liu XL, Zhu L (2019) Application of UAV-based multi-angle hyperspectral remote sensing in fine vegetation classification. *Remote Sens* 11:1–18. <https://doi.org/10.3390/rs11232753>

- Yeo S, Lafon V, Alard D, et al (2020) Classification and mapping of saltmarsh vegetation combining multispectral images with field data. *Estuar Coast Shelf Sci* 236:106643. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106643>
- Yésou P, Montfort D, Latraube F, et al (2019) Oiseaux de l'estuaire de la Loire, *Penn ar Bed*, 231-232, pp. 61-75
- Yésou P, Trolliet B (1983) Anatidés et zones humides de France métropolitaine. *Bull. ONC, n°sp. Sc. et Tech.*, 315 p.
- Zhang C, Xie Z (2013) Object-based vegetation mapping in the kissimmee river watershed using hmap data and machine learning techniques. *Wetlands* 33:233–244. <https://doi.org/10.1007/s13157-012-0373-x>
- Zlinszky A, Schroiff A, Kania A, et al (2014) Categorizing grassland vegetation with full-waveform airborne laser scanning: A feasibility study for detecting natura 2000 habitat types. *Remote Sens* 6:8056–8087. <https://doi.org/10.3390/rs6098056>

Annexes

Annexe 01. Tableaux des études bibliographiques faisant mention de données de végétation sur l'estuaire de la Loire. La colonne 'Nb relevés' indique le nombre de relevés saisis dans la base de données de relevés phytosociologique de l'estuaire de la Loire. La colonne 'Cartes' indique les études contenant des cartes de végétation ou d'habitats. La colonne 'ID' correspond au code utilisé pour référencer chaque étude lors de l'élaboration de la pré-typologie (cf. annexe 02).

Références bibliographiques des études faisant mention de données de végétation sur l'estuaire de la Loire	Nb relevés	Cartes	ID
Abdat A (2006) Un groupement végétal représentatif de l'estuaire de la Loire - Les roselières : état des lieux et évolution. Rapport de stage Master 2 Ecologie, Biodiversité, Evolution, Université Paris XI – Orsay. GIP Loire Estuaire, Université Paris sud 11, Université Pierre & Marie Curie, 42 pp.	-	x	-
Andreu-Boussut V (1999) Ile de la Maréchale (Loire-Atlantique). Etat des lieux 1999, Bilans hydrosédimentaire et floristique. Rapport UBO / Conservatoire du Littoral. 40p.	-	x	(41)
Bioret F (1983) Étude de la végétation du site du Carnet. Laboratoire d'écologie et de phytogéographie, U.E.R des sciences de la nature, Université de Nantes, Contrat de Recherche EDF n°ZT3715, 75p.	-	x	-
Biotope (2007) Document d'objectifs des sites Natura 2000 FR5200621 et FR52101103 "Estuaire de la Loire". Biotope Agence Loire-Bretagne, DIREN Pays-de-la-Loire. 370p.	-	-	(33)
Biotope (2009) Étude environnementale pour la définition des objectifs de gestion des espaces naturels gérés par le GPMNSN sur la commune de Bouguenais. GPMNSN, 48 p	-	x	-
Biotope (2010) Acquisition et analyse de données sur la flore et les habitats floristiques de l'estuaire de la Loire entre Donges et Lavau-sur-Loire. GIP Loire Estuaire, 47 p.	30	x	(27)
Biotope (2010) Plan de gestion sur les espaces naturels du secteur aval de Priory (44) - Diagnostic écologique faune / flore / milieux naturels et contexte socio-économique. GPMNSN 142p.	-	x	(29)
Biotope (2018) Démarche Eau et Paysages - Diagnostic écologique et foncier. Etudes environnementales - Etat initial milieux naturels, faune, flore. Nantes Métropole, 61p.	-	x	(4)
Boutelier P (1979) Le rôle des roselières dans l'estuaire de la Loire, Thèse de 3ème cycle, Univ. de Nantes, Institut des Sciences de la Nature – Département des Sciences de la Terre. 129p.	-	-	-
CEDRE (2011) Evaluation des effets de la pollution du 16 mars 2008 par hydrocarbures sur les milieux naturels de l'estuaire de la Loire. Suivi et évaluation de l'impact sur les espèces et communautés végétales (Etudes 4.2, 4.3, 4.4). TOTAL Raffinage Marketing Raffinerie de Donges.	-	x	-
Chagneau D, Lachaud A, Teulade L et al. (2011) Evolution de la flore et de la végétation du Banc de Bilho (estuaire de la Loire). Bulletin Société Scientifique National Ouest de la France, nouvelle série, tome 33 (4), 2011 : p. 195-205	4	x	(24)
Cianfaglione K (2021) Plant Landscape and Models of French Atlantic Estuarine Systems. Extended Summary of the Doctoral Thesis. Transylvanian Rev Syst Ecol Res 23:15–36. https://doi.org/10.2478/trser-2021-0002	-	x	(0)
Cianfaglione K, Bioret F (2018) Autoecological and Synecological Resilience of <i>Angelica heterocarpa</i> M.J. Lloyd, Observed in the Loire Estuary (France). Geogr Chang Veg Plant Funct Types - Geobot Stud 333–346	-	-	(5)
Daudon M (1998) Opération locale Agriculture-Environnement des marais de la rive nord de l'estuaire de la Loire (Loire-Atlantique), Eude botanique préalable. LPO, DIREN Pays-de-Loire, 68 p.	69	-	(42)
De Foucault B (1984) Systémique, structuralisme et synsystème des prairies hygrophiles des plaines atlantiques françaises, Thèse, Rouen, 675 p	96	-	(44)
Dupont P (1978) La végétation des zones humides bordant l'estuaire de la Loire. Rapport OREAM Nantes/Saint-Nazaire, 250p, 15 cartes et figures.	-	-	-
Dupont P (1983) Le peuplement végétal du Banc de Bilho (Estuaire de la Loire) en 1982. Rapport CSEEL, 29p.	-	x	-
Dupont P (1986) Principaux aspects de la végétation des zones humides de l'estuaire de la Loire. Bull la Soc Bot Fr Lettres Bot 133:41–60. https://doi.org/10.1080/01811797.1986.10824688	-	-	-
Dupont P (1990) Les modifications récentes et prévisibles de la végétation riveraine de l'estuaire de la Loire, entre la pointe de l'Imperlay et Paimboeuf: un cas exemplaire d'actions préjudiciables à la valeur biologique d'un site. 5ème rapport recherche du groupe SERS, Univ. de Nantes, « Sites sensibles et protection », p. 49-55.	-	-	-
Dupont P (1991) Rapport sur la végétation des zones proches de la Loire dans la commune de Bouguenais. Univ. de Nantes, 3p.	-	-	-

Dupont P, Bernard JY, Bioret F (1983) Étude des associations végétales dans les zones humides de l'estuaire de la Loire. Laboratoire d'Écologie et de Phytogéographie, Université de Nantes. 96 p.	-	x	-
Dupont P, Bioret F, Gueydan D (1985) La colonisation par la végétation de l'île artificielle de Bilho (estuaire de la Loire). Bull. Soc. Sc. Nat. Ouest Fr., n° SP 7, pp. 105-116.	-	x	-
Dupont P, Launte JP (1979) Le réseau hydrologique et les activités agricoles des zones humides bordant l'estuaire de la Loire. Rapport OREAM, 167 p., 21 cartes et figures	-	x	-
Dupont P et al. (1983) Etude écologique des Marais de l'ouest (de la Vilaine à Talmont)-Rapport EPR Poitou-Charente, 208p	-	-	-
Duret T, Quenneson A (2015) Compte rendu de la journée du jeudi 30 mai 2013 : estuaire de la Loire. Bulletin de la Société botanique du Centre-Ouest 45, pp. 181-185.	-	-	(16)
Figureau C (2010) Inventaire botanique, phytosociologique et et des habitats de la réserve du Massereau / Inventaire botanique, phytosociologique et et des habitats de la réserve du Migron. ONCFS. 27p./28p.	4	x	(30)
Foucher J, Boucaux M (2015) Bilan du suivi écologique des travaux de gestion expérimentaux en faveur du Phragmite aquatique <i>Acrocephalus paludicola</i> 2012-2015. Rapport d'étude AviBota, ACROLA	-	-	(15)
Gardelle A (2019) Diagnostic floristique de parcelles ENS sur l'île des Masses. Bretagne-Vivante, Rapport d'études et suivi des Espaces Naturels Sensibles - 2018. Conseil départemental de Loire-Atlantique, 27p.	-	x	-
Gardelle A, Viaud A (2017) Inventaires faune et flore sur deux parcelles du bras du Migron. Bretagne-Vivante, Rapport d'études et suivi des Espaces Naturels Sensibles - 2016/2017. Conseil départemental de Loire-Atlantique, Conservatoire du Littoral, 51p.	-	x	(9)
Géhu JM, Géhu J (1978) Les groupements à <i>Angelica heterocarpa</i> des estuaires atlantiques français. Colloques phytosociologiques, V « La végétation des prairies inondables » (Lille, 1976). pp.359-362.	10	-	(45)
Géhu JM, Géhu-Franck J (1972) L'association à <i>Heleocharis amphibia</i> Duv. de l'embouchure de la Loire et de la Gironde (France). Doc. phytosociol., fascicule 1, pp. 35-38	6	-	(46)
GIP Loire Estuaire (2017) Un groupement végétal représentatif : les roselières, Cahiers indicateurs GIP Loire Estuaire, L2.B2, 8 p	-	x	(2)
Guitton G (2015) Fiche d'évaluation de la typologie des habitats naturels et semi-naturels d'intérêt communautaire des sites Natura 2000 terrestres en région Pays de la Loire. Site 'Estuaire de la Loire' (FR5200621). CBN de Brest, DREAL Pays de la Loire, 10 p.	-	-	(17)
Guitton H, Lacroix P, Brindejone O (2003) Etude préalable à un plan de conservation en faveur de l'Angélique des estuaires dans l'estuaire de la Loire (<i>Angelica heterocarpa</i> Lloyd). Conservatoire Botanique National de Brest, DIREN Pays de la Loire, Communauté Urbaine de Nantes. 44p.	-	-	(35)
Guitton H, Lacroix P, Le Bail J (2006) Plan de conservation en faveur du crypsis piquant (<i>Crypsis aculeata</i> (L.) Aiton) en région Pays de la Loire. Conservatoire botanique national de Brest, DIREN Pays de la Loire. Nantes, 27 p.	-	-	-
Guitton H, Terrisse J (2015) Pelouses annuelles amphibies, eutrophiles et thermophiles à <i>Crypsis aculeata</i> , <i>Crypsis schoenoides</i> et <i>Crypsis alopecuroides</i> des marais littoraux thermo-atlantiques (France). Bulletin de la Société botanique du Centre-Ouest, 45 : pp. 294-305.	14	-	(14)
Hardy Environnement (2014) Diagnostic des composantes de la trame verte et bleue sur une partie du territoire de Nantes Métropole. Rapport d'étude Nantes Métropole, 142p.	-	-	-
Hardy Environnement (2016). Inventaire et cartographie des groupements végétaux de l'île de la Motte. Nantes Métropole, 39p.	14	x	(10)
Hardy Environnement (2017) Grande vallée à Bouguenais - Etude hydro-écologique, diagnostic des milieux, définitions des enjeux du territoire, élaboration d'un programme d'actions. Rapport d'étude et cartographie, Nantes Métropole, 82p.	-	x	(6)
Hardy Environnement (2018) Grande vallée à Bouguenais - Etude hydroécologique, diagnostic des milieux, définitions des enjeux du territoire, élaboration d'un programme d'actions. Nantes Métropole, 105 p.	1	-	(3)
Hardy Environnement (2019) Etude hydroécologique, diagnostic des milieux, définitions des enjeux du territoire, élaboration d'un programme d'actions - Grande vallée à Bouguenais. Nantes Métropole, 50 p.	-	x	-
Joslain H (1997) Etude, sur l'île de La Maréchale (Frossay, Loire-Atlantique), des conséquences de la rupture de la digue nord sur l'évolution des groupements floristiques, sur l'avifaune et sur les potentialités alimentaires. Rapport de stage Université catholique de l'ouest (UCO). Institut d'écologie appliquée (IEA) (Angers, France), 42 p. + annexes.	-	x	-
Lacroix P, Le Bail J (2001) Mise en évidence d'habitats d'intérêt communautaire sur le site d'aménagement du complexe portuaire de Donges-est. Rapport CBNB non publié : 13p. + annexes.	16	x	(37)
Lacroix P (2016) Typologie des groupements végétaux de l'île de la Motte (Indre, 44). Nantes Métropole: Conservatoire botanique national de Brest, 59p.	25	-	(11)
Lacroix P, Figureau C (2009) Bilan des connaissances sur l'angélique des estuaires (<i>Angelica heterocarpa</i> Lloyd). Conservatoire Botanique National de Brest, Jardin Botanique de Nantes, Nantes Métropole. 26p.	-	-	(31)

Lafage D, Bonis A, Rapinel S, Bouzillé JB (2017) Using landscape metrics on satellite imagery to assess conservation status of Natura 2000 habitats. Documents phytosociologiques - Actes du colloque de Saint-Mandé 2012 'Prodrome et cartographie des végétations de France'. Vol. 6, pp. 156-173	-	x	(7)
Lafage D, Sacre S (2016) Plan de gestion des stations-reservoirs en faveur de l'Angelique des estuaires et du Scirpe triquetre sur l'estuaire de la Loire. DREAL Pays-de-la-Loire, 97p.	30	-	(12)
Latraube F (2013) Déclinaison du Plan National d'Actions du Phragmite aquatique dans la région des Pays de la Loire 2010-2014. LPO Loire-Atlantique, DREAL Pays de la Loire, 57p.	-	x	-
Le Bail J (2017) Inventaire de la flore et des végétations de la propriété du Conservatoire du littoral à Belle-Ile (commune du Pellerin). Conseil départemental de Loire-Atlantique: Conservatoire botanique national de Brest, 9p.	9	-	(8)
Le Bail J, Lacroix P (2005) Etat des lieux des populations de scirpe triquetre (<i>Scirpus triquetra</i> L.) dans l'estuaire de la Loire. Propositions de conservation. Conservatoire Botanique de Brest. 112p.	-	x	(34)
Le Dez M, Sawtschuk J, Bioret F (2017) Les prairies de l'estuaire de la Loire : étude de la dynamique de la végétation de 1982 à 2014. Mappemonde 119:1-18. https://doi.org/10.4000/mappemonde.2097	-	x	(19)
Lebret S (2001) Etude de la végétation et des habitats d'intérêt communautaire de la Loire en aval d'Ancenis, en relation avec la dynamique estuarienne. Rapport DESS Université François Rabelais: GIP Loire Estuaire. 101 p.	88	x	(38)
Letond L (1995) Etude d'impact de la rupture d'une digue sur l'île de la Maréchal (44). Rapport de stage / Conservatoire du Littoral. 91p.	-	x	-
Magnanon S (1991) Contribution à l'étude des prairies inondables du marais de Donges et l'estuaire de la Loire. Phyto-écologie, phytosociologie, valeur agronomique, Thèse, Université de Nantes, 269 p. + annexes	91	x	(43)
Magnanon S (1994) Les prairies naturelles inondables des marais de Donges. Penn Ar Bed N°155, p.20-38.	-	-	-
Magnanon S, Bioret F, Dupont P (1998) <i>Angelica heterocarpa</i> dans l'estuaire de la Loire: répartition, écologie, menaces. Proposition de mesures de gestion. Conservatoire botanique national de Brest, 26 p.	47	-	-
Mesnage C (2015) Plan de gestion de la station réservoir d'Angélique des estuaires (<i>Angelica heterocarpa</i> Lloyd) et de Scirpe triquetre (<i>Scirpus triquetra</i> L.) du Bras et de l'Etier de Cordemais (Cordemais - 44). EDF. Nantes: Conservatoire botanique nationale de Brest, 23p. + annexes	13	x	(13)
Ouest Aménagement (1995) Site du Carnet, Dossier de demande d'autorisation de travaux en zone humide : étude complémentaire faune – flore. EDF, CNEPE, 46 p.	-	x	-
Ouest Aménagement (2000) Projet de site classé de l'Estuaire de la Loire-Expertise faune-flore complémentaire sur le marais "Audubon". DIREN Pays-de-la-Loire. 65p.	21	x	(40)
Ouest Aménagement (2002) Inventaire des groupements végétaux des sites témoins Saint-Etienne-de-Montluc, Marais du Syl, Champtoceaux et Champocé-sur-Loire. GIP Loire Estuaire	-	x	-
Ouest Aménagement (2003) Inventaire et cartographie Natura 2000 de la Loire en aval de Nantes, volume 1 : flore et végétation. DREAL Bretagne, 80 p. + cartographies.	-	x	(36)
Ouest Aménagement (2006) Notice pour le complément 2006 de la carte de végétation de l'estuaire de la Loire - 1 520 ha du Pellerin à Nantes. GIP Loire Estuaire 14p.	-	x	-
Ouest Aménagement (2009) Expertise faunistique et floristique sur la Z.I.P. du Carnet 2008-2009. Communes de Frossay et Saint-Viaud. GPMNSN, 143 p. + annexe	63	x	(32)
Ouest aménagement (2010) Suivis botaniques et faunistiques sur la zone d'aménagement écologique du Terminal Multivrac (TMV) de Montoir-de-Bretagne. GPMNSN 56p.	-	x	(28)
Ouest Aménagement (2011) Plan de gestion des espaces naturels du GPMNSN sur la commune de Bouguenais (Loire-Atlantique). GPMNSN, 63 p.	5	x	(25)
Ouest aménagement (2012) Suivis botaniques et faunistiques sur la zone d'aménagement écologique du Terminal Multivrac (TMV) de Montoir-de-Bretagne. GPMNSN, 83p.	-	x	(22)
Ouest Aménagement (2014) Suivis botaniques et faunistiques sur la zone d'aménagement écologique du Terminal Multivrac (TMV) de Montoir-de-Bretagne. GPMNSN, 76p.	-	x	(20)
Ouest Aménagement (2014) Suivis faunistiques et floristiques sur le site de Donges-Est 2013-2014. GPMNSN, 249p.	109	x	(21)
Ouest Aménagement (2015) Dossier de demande de dérogation relatif aux espèces et habitats d'espèces protégées - Volet FLORE. Dossier de viabilisation du site du Carnet. GPMNSN, 114p.	30	x	(18)
Ouest Aménagement (2020) Inventaires naturalistes et étude du fonctionnement hydrologique des espaces naturels du GPMNSN à Bouguenais (La Roche Ballue – Port Lavigne – Cheviré aval)	-	x	-
Roussel D (1999) Opération locale Agriculture-Environnement des marais de la rive sud de l'estuaire de la Loire (Loire-Atlantique). Suivi de la végétation: Etat final. Université de Rennes 1. 121p.	42	-	-
Sawtschuk J, Bioret F (2012) Analyse diachronique de la dynamique spatiale de la végétation de l'estuaire de la Loire. Photo interprétation, 48(3):15-28	-	x	(23)
SCE (1999) Port Autonome de Nantes Saint-Nazaire. Réhabilitation du bras du Migron entre la percée du Carnet et le seuil des Masses - Etude bras du Migron. PANSN	-	x	-
SCE (2000) Projet de cheminement piétonnier sur l'île de la Motte. Faisabilité du projet sur la base d'inventaires floristiques. Commune d'Indre. 23p.	-	x	(39)

SCE (2002) Projet d'aménagement portuaire de Donges-Est - Étude d'impact. GPMNSN		x	-
SCE (2003) Extension d'une roselière – mesures compensatoires et d'accompagnement relatives au projet d'aménagement portuaire au niveau du site de Donges-Est. GPMNSN	-	x	-
SCE (2004) Etude préliminaire – création de vasières au droit de la Percée du Carnet. GPMNSN	-	x	-
SCE (2010) Etat des lieux écologique de la vasière de Méan (milieux terrestres) : rapport final. GPMNSN 39p.	-	x	-
SCE (2011) Suivi de la végétation acquisition et analyse de données marais du syl zone test de saint-etienne-de-montluc et champtoceau. GIP Loire Estuaire, 32p.	115	x	(26)
SCE (2018) Mise à jour de l'inventaire des milieux naturels terrestres en périphérie de la vasière de Méan. Diagnostic écologique. GPMNSN, 75 p.	-	x	(1)
SIRS (2012) Apports de l'Ortho-image Infrarouge Couleur pour la cartographie des habitats naturels dans la vallée de la Loire des Ponts-de-Cé à Saint Nazaire. GIP Loire Estuaire, 71 p., + Annexes.	-	x	-
Visset L, Bernard J (1994) Intérêt floristique de l'île Chevalier / "Donges Est". GEMINA-Ecologie 48 p.	-	x	-
Autres sources d'acquisition de relevés phytosociologiques			
Conservatoire Botanique National de Brest. Base de données de relevés phytosociologiques (http://www.cbnbrest.fr/le-conservatoire/ressources/systeme-d-informations.html)	68		
Lafage D, Bouzillé JB. Relevés phytosociologiques sur les prairies inondables de la Vallée de la Loire disponibles dans la base de données du CORELA (BD_Corela) - licence CC-BY-NC-ND (http://phytosocio.org/#bdd/utilisation)	209		
Laboratoire EA 7462 Géoarchitecture. Base de données de relevés phytosociologiques du projet C3E2 (Conséquences du changement climatique sur l'écogéomorphologie des estuaires). Université de Bretagne Occidentale	209		
Laboratoire EA 7462 Géoarchitecture. Base de données de relevés phytosociologiques du projet ICEPEL (Impacts socio-économiques des changements environnementaux des complexes prairiaux de l'estuaire de la Loire : approche prospective). Université de Bretagne Occidentale	202		

Annexe 02. Synsystème des végétations de l'estuaire de la Loire.

Pour chaque syntaxon, nous avons mentionné le(s) numéro(s) de(s) référence(s) bibliographique(s) faisant mention du syntaxon d'après les identifiants 'ID' de l'annexe 01. Les syntaxons sans référence (-) correspondent à des données complémentaires ajoutées à la suite des prospections de terrain réalisées pendant la thèse.

La colonne 'présence' est une évaluation de la présence du syntaxon à l'échelle de l'estuaire de la Loire, inspirée du travail de Guitton (2019) :

P : syntaxon actuellement présent sur l'estuaire de la Loire, c'est-à-dire qu'il existe au moins un relevé phytosociologique ou une citation non ambiguë pour ce syntaxon à l'échelle du site ;

?(P) : syntaxon à rechercher sur le site, c'est-à-dire qu'il n'existe pas de relevé phytosociologique ou de citation dans les données mobilisées confirmant la présence actuelle du syntaxon sur le site mais que sa présence reste possible au regard de sa composition floristique, de son écologie et de sa chorologie générale;

?(E) : syntaxon probablement cité par erreur sur le site. Autrement dit, pour ce syntaxon, il existe au moins un relevé phytosociologique ou une citation sur le site Natura 2000 cependant les conditions écologiques décrites pour le syntaxon sont, en l'état des connaissances, absentes.

La colonne 'Logique' indique les types de correspondances avec les typologies d'habitats (CORINE Biotopes, EUNIS, EUR28) (Inspiré de Gaudillat et al. (2018)) :

Végétation : Syntaxon avec une correspondance directe avec les unités des typologies d'habitats;

Mixte : Nécessité de compléments d'information avec des données sur le contexte stationnel.

La colonne 'Codes SE' correspond aux codes des syntaxons qui ont fait l'objet d'une formule dans le SE des végétations de l'estuaire de la Loire

Syntaxons	Présence	Logique	Code SE
<i>Agropyreteea pungentis</i> Géhu 1968	P	Végétation	-
<i>Agropyretalia intermedio – repentis</i> Oberdorfer, Müller & Görs in Müller & Görs 1967	P	Végétation	-
<i>Convolvulo arvensis – Agropyrion repentis</i> Görs 1966 CORINE Biotopes: 87.1 / 87.2 ; EUNIS: E5.1 ; EUR28: Nul Ref. : (20);(22);(24);(28)	P	Végétation	-
<i>Agropyretalia pungentis</i> Géhu 1968	P	Végétation	-
<i>Agropyrion pungentis</i> Géhu 1968 CORINE Biotopes: 15.35 ; EUNIS: A2.511 ; EUR28: 1330(-5) Ref. : (1);(16);(19);(21);(24);(27);(30);(33);(36);(38)	P	Végétation	Agr
<i>Agropyro pungentis - Althaeetum officinalis</i> Géhu & Géhu-Franck 1976 CORINE Biotopes: 15.35 ; EUNIS: A2.511; EUR28: 1330(-5) Ref. : (18);(32)	?(P)	Végétation	-
<i>Atriplici hastatae - Agropyretum pungentis</i> Beefink & Westhoff 1962 CORINE Biotopes: 15.35 ; EUNIS: A2.511; EUR28: 1330(-5) Ref. : (18);(32);(37)	?(P)	Végétation	-
<i>Beto maritimae-Agropyretum pungentis</i> (Arènes 1933) Corillion 1963 CORINE Biotopes: 15.35 ; EUNIS: A2.511; EUR28: 1330(-5) Ref. : (18);(32)	?(P)	Végétation	-

<i>Minuartia peploidis - Agropyretum acuti</i> Tüxen 1957 CORINE Biotopes: 15.35 ; EUNIS: A2.511; EUR28: 1330(-5) Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Agrostietea stoloniferae</i> Oberdorfer 1983	P	Végétation	Agros
<i>Deschampsietalia cespitosae</i> Horvatic 1958	P	Végétation	Desc
<i>Carici vulpinae - Eleocharitenalia palustris</i> Julve ex B. Foucault, Catteau & Julve in B. Foucault & Catteau 2012	P	Végétation	CaEl
<i>Oenanthion fistulosae</i> de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (8);(11);(16);(26);(36);(38)	P	Végétation	Oen
<i>Eleocharito palustris – Oenanthetum fistulosae</i> de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (3);(7);(18);(19);(21);(32);(36);(43);(44)	P	Végétation	EO
<i>Gratiolo officinalis – Oenanthetum fistulosae</i> de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (36);(43)	P	Végétation	GO
<i>Mentho pulegii - Eleocharitenalia palustris</i> Julve ex B. Foucault, Catteau & Julve in B. Foucault & Catteau 2012	P	Végétation	MeEl
<i>Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthion fistulosae</i> de Foucault in de Foucault & Catteau 2012 CORINE Biotopes: 37.21 / 15.52 ; EUNIS: A2.5319 / A2.523 ; EUR28: Nul ou 1410(-3) Ref. : (33)	P	Végétation	RaO
<i>Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthetum fistulosae</i> de Foucault (1984) 2008 CORINE Biotopes: 15.52 ; EUNIS: A2.523 ; EUR28: 1410(-3) Ref. : (7);(18);(19);(21);(32);(36);(42);(43)	P	Végétation	RO
<i>Junco gerardi – Oenanthetum fistulosae</i> de Foucault in de Foucault & Catteau 2012 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: A2.5319 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	JO
Communauté basale de l' <i>Oenanthion fistulosae</i> de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 37.24 ; EUNIS: E3.44 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	Oen*
Communauté basale du <i>Ranunculo ophioglossifolii – Oenanthion fistulosae</i> de Foucault in de Foucault & Catteau 2012 CORINE Biotopes: 37.24x15.52 ; EUNIS: E3.44xA2.5 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	RaO*
<i>Holoschoenetalia vulgaris</i> Braun-Blanquet ex Tchou 1948	?(E)	Végétation	-

<i>Paspalo distichi-Agrostion semiverticillatae</i> Braun-Blanq. in Braun-Blanq., Roussine & Nègre 1952 CORINE Biotopes: ; EUNIS: ; EUR28: Ref. : (8)	?(E)	Végétation	-
<i>Potentillo anserinae – Polygonetalia avicularis</i> Tüxen 1947	P	Végétation	Pote
<i>Loto pedunculati - Cardaminentalia pratensis</i> Julve ex B. Foucault, Catteau & Julve in B. Foucault & Catteau 2012	P	Végétation	LoCa
<i>Bromion racemosi</i> Tüxen ex de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (26);(29);(38)	P	Végétation	Bro
<i>Hordeo secalini – Lolietum perennis</i> (Allorge 1922) de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (7);(18);(19);(21);(26);(32);(36);(38)	P	Végétation	HL
<i>Oenanthe peucedanifoliae – Brometum racemosi</i> de Foucault 1981 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (36);(38);(44)	P	Végétation	OB
<i>Senecioni aquatici – Oenanthetum mediae</i> Bournérias et al. 1978 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (7);(18);(19);(26);(32);(36);(38);(43);(44)	P	Végétation	SO
<i>Mentho longifoliae – Juncion inflexi</i> Th. Müll. & Görs ex de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 37.24 ; EUNIS: E3.44 ; EUR28: Nul Ref. : (8);(36);(38)	P	Végétation	MeJ
<i>Pulicario dysentericae – Juncetum inflexi</i> de Foucault 2006 CORINE Biotopes: 37.24 ; EUNIS: E3.44 ; EUR28: Nul Ref. : (8);(36);(38)	P	Végétation	PJ
<i>Potentillion anserinae</i> Tüxen 1947 CORINE Biotopes: 37.24 / 15.52 ; EUNIS: E3.44 / A2.523 ; EUR28: Nul ou 1410(-3) Ref. : (10);(11);(18);(19);(25);(26);(29);(32);(36)	P	Végétation	Pot
<i>Lolio perennis – Potentilletum anserinae</i> Oberd. 1957 CORINE Biotopes: 37.24 ; EUNIS: E3.44 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	?(P)	Végétation	LP
<i>Plantagini majoris – Trifolietum resupinati</i> de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 15.52 ; EUNIS: A2.523 ; EUR28: 1410(-3) Ref. : (21)	?(P)	Végétation	PT
<i>Potentillo anserinae – Alopecuretum geniculati</i> Tüxen 1947 CORINE Biotopes: 37.24 ; EUNIS: E3.44 ; EUR28: Nul Ref. : (21);(30);(36);(43)	P	Végétation	PA
<i>Ranunculo repentis – Cynosurion cristati</i> Passarge 1969	P	Végétation	RaC

CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (26)			
<i>Cirsio arvensis – Alopecuretum pratensis</i> Catteau in de Foucault & Catteau 2012 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (21)	P	Végétation	CA
<i>Junco acutiflori – Cynosuretum cristati</i> Sougnez 1957 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: E3.41 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	P	Végétation	JC
Communauté basale du <i>Bromion racemosi</i> Tüxen ex de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 37.24 ; EUNIS: E3.44 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	Bro*
Groupement hygronitrophile à <i>Festuca arundinacea</i> évoqué par Magnanon et al. (1998) (= <i>Festucetum arundinaceae</i> évoqué par Géhu et Géhu (1978) ?) CORINE Biotopes: 37.24 ; EUNIS: E3.44 ; EUR28: Nul Ref. : (43),(45)	P	Végétation	Fest
<i>Loto tenuis - Festucenalia arundinaceae</i> Julve ex B. Foucault, Catteau & Julve in B. Foucault & Catteau 2012	P	Végétation	LoFe
<i>Alopecurion utriculati</i> Zeidler 1954 CORINE Biotopes: 15.52 ; EUNIS: A2.523 ; EUR28: 1410(-3) Ref. : (21);(26);(28);(29);(33);(36);(38)	P	Végétation	Alo
<i>Alopecuro bulbosi – Juncetum gerardii</i> Bouzillé 1992 CORINE Biotopes: 15.52 ; EUNIS: A2.523 ; EUR28: 1410(-3) Ref. : (20);(22)	?(P)	Végétation	-
<i>Carici divisae – Lolietum perennis</i> de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 15.52 ; EUNIS: A2.523 ; EUR28: 1410(-3) Ref. : (18);(19);(32);(36);(42);(43)	P	Végétation	CL
<i>Trifolio maritimi – Oenanthetum silaifoliae</i> (Dupont 1954) de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 15.52 ; EUNIS: A2.523 ; EUR28: 1410(-3) Ref. : (7);(16);(18);(19);(21);(26);(32);(36);(43);(44)	P	Végétation	TO
<i>Loto tenuis – Trifolion fragiferi</i> (Westhoff, van Leeuwen & Adriani 1962) de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: A2.5319 ; EUR28: Nul Ref. : (21);(22);(26);(29);(36)	P	Végétation	LoT
<i>Agrostio stoloniferae – Caricetum vikingensis</i> Géhu 1982 CORINE Biotopes: 37.21 ; EUNIS: A2.5319 ; EUR28: Nul Ref. : (21);(43)	?(E)	Végétation	AC
Communauté basale de l' <i>Alopecurion utriculati</i> Zeidler 1954 CORINE Biotopes: 37.24x15.52 ; EUNIS: E3.44xA2.5 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	Alo*

<i>Alnetea glutinosae</i> Braun-Blanquet & Tüxen ex Westhoff, Dijk & Passchier 1946	?(E)	Mixte	-
<i>Alnetalia glutinosae</i> Tüxen 1937	?(E)	Mixte	-
<i>Alnion glutinosae</i> Malcuit 1929	?(E)	Mixte	-
CORINE Biotopes: 44.911 / 44.912 / 16.29 ; EUNIS: G1.411 / G1.412 / B1.86 ; EUR28: Nul ou 2180(-5)			
Ref. : (21)			
<i>Arrhenatheretea elatioris</i> Braun-Blanquet ex Braun-Blanquet, Roussine & Nègre 1952	P	Végétation	Arrhe
<i>Arrhenatheretalia elatioris</i> Tüxen 1931	?(E)	Végétation	Arrh
<i>Arrhenatherion elatioris</i> W. Koch 1926	?(E)	Végétation	Arr
CORINE Biotopes: 38.22 ; EUNIS: E2.22 ; EUR28: 6510(-3)			
Ref. : (36);(38);(40)			
<i>Brachypodio rupestris</i> – <i>Centaureion nemoralis</i> Braun-Blanq. 1967	?(E)	Végétation	BrC
CORINE Biotopes: 38.21 ; EUNIS: E2.21 ; EUR28: 6510(-3)			
Ref. : (33);(36);(38)			
<i>Luzulo campestris</i> – <i>Brometum hordeacei</i> de Foucault (1981) 2008	?(E)	Végétation	-
CORINE Biotopes: 38.21 ; EUNIS: E2.21 ; EUR28: 6510(-3)			
Ref. : (18);(32)			
<i>Plantaginetalia majoris</i> Tüxen ex von Rochow 1951	P	Végétation	-
<i>Lolio perennis</i> – <i>Plantaginion majoris</i> G. Sissingh 1969	P	Végétation	LoP
CORINE Biotopes: 38.111 ; EUNIS: E2.8 ; EUR28: Nul			
Ref. : (36)			
<i>Lolio perennis</i> – <i>Plantaginetum coronopodis</i> (Kühnholtz-Lordat 1928) Sissingh 1969	?(P)	Végétation	-
CORINE Biotopes: 38.111 ; EUNIS: E2.8 ; EUR28: Nul			
Ref. : (36)			
<i>Plantagini majoris</i> - <i>Lolietum perennis</i> Linkola ex Beger 1932	?(P)	Végétation	-
CORINE Biotopes: 38.111 ; EUNIS: E2.8 ; EUR28: Nul			
Ref. : (36)			
<i>Trifolio repentis</i> – <i>Phleetalia pratensis</i> H. Passarge 1969	P	Végétation	-
<i>Cynosurion cristati</i> Tüxen 1947	P	Végétation	Cyn
CORINE Biotopes: 38.1 ; EUNIS: E2.1 / E5.1 ; EUR28: Nul			
Ref. : (10);(21);(38)			
<i>Cynosuro cristati</i> - <i>Lolietum perennis</i> Braun-Blanquet & de Leeuw 1936	?(P)	Végétation	-
CORINE Biotopes: 38.1 ; EUNIS: E2.1 ; EUR28: Nul			
Ref. : (18);(30);(32);(36);(43)			
<i>Luzulo campestris</i> – <i>Cynosuretum cristati</i> Meisel 1966 em. de Foucault 1981	?(P)	Végétation	-

CORINE Biotopes: 38.112 ; EUNIS: E2.112 ; EUR28: Nul
 Ref. : (29);(36);(43)

	P	Végétation	Arte
<i>Artemisietea vulgaris</i> Lohmeyer, Preising & Tüxen ex von Rochow 1951	P	Végétation	Arte
<i>Artemisietalia vulgaris</i> Tüxen 1947 nom. nud.	?(P)	Végétation	-
<i>Arction lappae</i> Tüxen 1937 CORINE Biotopes: 87.1 / 87.2 / 81 ; EUNIS: E5.11 / E5.13 / E2.6 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	?(P)	Végétation	-
<i>Onopordetalia acanthii</i> Braun-Blanquet & Tüxen ex Klika in Klika & Hadač 1944	P	Végétation	-
<i>Dauco carotae</i> – <i>Melilotion albi</i> Görs 1966 CORINE Biotopes: 87.2 ; EUNIS: E5.13 ; EUR28: Nul Ref. : (20);(22);(36)	?(P)	Végétation	-
<i>Dauco carotae</i> – <i>Picridetum hieracioidis</i> (Faber 1933) Görs 1966 nom. inval. CORINE Biotopes: 87.2; EUNIS: E5.13 ; EUR28: Nul Ref. : (30)	?(P)	Végétation	-
<i>Onopordion acanthii</i> Braun-Blanquet in Braun-Blanquet, Gajewski, Wraber & Walas 1936 CORINE Biotopes: 87 ; EUNIS: I1.5 ; EUR28: Nul Ref. : (21);(22)	?(P)	Végétation	-
<i>Smyrnion olusatri</i> Rivas Goday 1964 CORINE Biotopes: 87.1 ; EUNIS: E5.1 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Galio aparini</i> - <i>Smyrniatum olusatri</i> (Izco & Géhu 1978) Bioret, Lahondère & Botineau 1993 CORINE Biotopes: 87.1; EUNIS: E5.1 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Asteretea tripolii</i> Westhoff & Beeftink in Beeftink 1962	P	Végétation	Aster
<i>Glauco maritimae</i> – <i>Puccinellietalia maritimae</i> Beeftink & Westhoff in Beeftink 1962	P	Végétation	-
<i>Armerion maritimae</i> Braun-Blanquet & De Leeuw 1936 CORINE Biotopes: 15.33 ; EUNIS: A2.531 ; EUR28: 1330(-3) Ref. : (16);(27);(33);(36);(38)	P	Végétation	Arm
<i>Festucetum littoralis</i> Corillion 1953 nom. em. Géhu 1976 CORINE Biotopes: 15.333 ; EUNIS: A2.5313 ; EUR28: 1330(-3) Ref. : -	P	Végétation	FL
Grpt. à <i>Plantago maritima</i> CORINE Biotopes: 15.332 ; EUNIS: A2.5312 ; EUR28: 1330(-3) Ref. : -	P	Végétation	PL

<i>Juncetum gerardii</i> Warming 1906 CORINE Biotopes: 15.331 ; EUNIS: A2.5311 ; EUR28: 1330(-3) Ref. : (21);(37)	P	Végétation	JG
<i>Glauco maritimi</i> – <i>Juncion maritimi</i> Géhu & Géhu-Franck ex Géhu in Bardat et al. 2004 CORINE Biotopes: 15.33A ; EUNIS: A2.531A ; EUR28: 1330(-3) Ref. : (21);(36);(38)	P	Végétation	GIJ
<i>Oenanthe lachenalii</i> – <i>Juncetum maritimi</i> Tüxen 1937 CORINE Biotopes: 15.33A ; EUNIS: A2.531A ; EUR28: 1330(-3) Ref. : (20);(22);(28)	P	Végétation	OJ
<i>Puccinellion maritimae</i> W.F. Christiansen 1927 nom. corr. in Bardat et al. 2004 CORINE Biotopes: 15.32 / 15.34 ; EUNIS: A2.542 / A2.5211 ; EUR28: 1330(-1) / 1330(-3) Ref. : (1);(18);(19);(27);(32);(33);(38)	P	Végétation	Puc
<i>Puccinellietum fasciculatae</i> Beefting 1965 CORINE Biotopes: 15.34 ; EUNIS: A2.5211 ; EUR28: 1330(-3) Ref. : (21);(36)	?(E)	Végétation	-
<i>Puccinellietum maritimae</i> Christiansen 1927 CORINE Biotopes: 15.32 ; EUNIS: A2.542 ; EUR28: 1330(-1) Ref. : (15);(21);(36);(37)	P	Végétation	PM
<hr/> <i>Bidentetea tripartitae</i> Tüxen, Lohmeyer & Preising ex von Rochow 1951	P	Mixte	Biden
<i>Bidentetalia tripartitae</i> Braun-Blanquet & Tüxen ex Klika in Klika & Hadač 1944	P	Mixte	-
<i>Bidention tripartitae</i> (W. Koch 19z) Nordhagen 1940 CORINE Biotopes: 22.33 / 24.52 ; EUNIS: C3.52 / C3.53 ; EUR28: Nul / 3270(-1) / 3270(-2) Ref. : (20);(21);(28);(29);(36);(38)	P	Mixte	-
<i>Chenopodietalia rubri</i> Felzines & Loiseau 2006	P	Mixte	-
<i>Chenopodion rubri</i> (Tüxen in Poli & J. Tüxen 1960) Hilbig & Jage 1972 CORINE Biotopes: 22.33 / 24.52 ; EUNIS: C3.52 / C3.53 ; EUR28: Nul / 3270(-1) / 3270(-2) Ref. : (20);(28);(29);(38)	P	Mixte	-
<i>Chenopodietum rubri</i> Tímár 1950 CORINE Biotopes: 22.33 / 24.52 ; EUNIS: C3.52 / C3.53 ; EUR28: Nul / 3270(-1) / 3270(-2) Ref. : (30)	?(P)	Mixte	-
<i>Chenopodio</i> – <i>Atriplicetum salinae</i> Slavnič (1939) 1948 CORINE Biotopes: 22.33 ; EUNIS: C3.52 ; EUR28: Nul Ref. : (37)	P	Végétation	Cat
<hr/> <i>Cakiletea maritimae</i> Tüxen & Preising ex Braun-Blanquet & Tüxen 1952	P	Mixte	Cakil
<i>Cakiletalia integrifoliae</i> Tüxen ex Oberdorfer 1950 corr. Rivas-Martínez, J.C. Costa & Loidi 1992	P	Mixte	-

<i>Atriplici laciniatae</i> – <i>Salsolion kali</i> Géhu 1975 CORINE Biotopes: 16.12 ; EUNIS: B1.12 ; EUR28: 2110(-1) Ref. : (24);(33);(36);(38)	P	Mixte	AtS
<i>Atriplicion littoralis</i> Nordhagen 1940 CORINE Biotopes: 16.2121 / 16.12 / 15.36 ; EUNIS: B1.3211 / B1.12 / A2.512 ; EUR28: 2120(-1) / 2110(-1) / 1330(-5) Ref. : (1);(36)	P	Mixte	Atr
<i>Atriplicetum littoralis</i> (Christiansen 1933) Tüxen 1937 CORINE Biotopes: 15.36 ; EUNIS: A2.512 ; EUR28: 1330(-5) Ref. : -	P	Végétation	-
<hr/> <i>Cardaminetea hirsutae</i> Géhu 1999	P	Végétation	-
<i>Bromo sterilis</i> - <i>Cardaminetalia hirsutae</i> B. Foucault 2009	P	Végétation	-
<i>Anthriscu caucalidis</i> - <i>Cochlearion danicae</i> B. Foucault 2009 CORINE Biotopes: - ; EUNIS: E1.6 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Claytonio perfoliatae</i> - <i>Anthriscetum caucalidis</i> Izco, Géhu & Delelis 1978 CORINE Biotopes: - ; EUNIS: E1.6 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<hr/> <i>Charetea fragilis</i> F. Fukarek 1961	?(P)	Mixte	-
<i>Charetalia hispidae</i> Krausch ex W. Krause 1997 Ref. : (33);(36)	?(P)	Mixte	-
<i>Charion vulgaris</i> Krause 1981 CORINE Biotopes: 23.12 / 22.44 / 21 / 16.31 ; EUNIS: C1.512 / C1.25 / A5.5341 / B1.81 ; EUR28: 3140(-1) / 1150(-1) / 2190(-1) Ref. : (30)	?(P)	Mixte	-
<hr/> <i>Cytisetea scopario</i> – <i>striati</i> Rivas-Martínez 1975	P	Végétation	-
<i>Cytisetalia scopario</i> – <i>striati</i> Rivas-Martínez 1975 Ref. : (36)	P	Végétation	-
<i>Ulici europaei</i> – <i>Cytision striatus</i> Rivas-Martínez, Báscones, T.E. Díaz, Fernández González & Loidi 1991 CORINE Biotopes: 31.8411 ; EUNIS: F3.141 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	CY
<i>Ulici europaei</i> - <i>Cytisetum scoparii</i> Oberdorfer ex B. Foucault, Lazare & Bioret 2013 CORINE Biotopes: 31.8411 ; EUNIS: F3.141 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-

<i>Euphorbio paraliae – Ammophiletea australis</i> Géhu & Géhu-Franck 1988 corr. Géhu in Bardat et al. 2004	P	Végétation	EupAm
<i>Ammophiletalia australis</i> Braun-Blanquet 1933	P	Végétation	-
<i>Ammophilion arenariae</i> (Tüxen in Braun-Blanquet & Tüxen 1952) Géhu 1988 CORINE Biotopes: 16.2111 / 16.2121 ; EUNIS: B1.311 / B1.3211 ; EUR28: 2110(-1) / 2120(-1) Ref. : (24)	P	Végétation	Amm
<i>Euphorbio paraliae - Ammophiletum arenariae</i> Tüxen in Braun-Blanquet & Tüxen 1952 CORINE Biotopes: 16.2121 ; EUNIS: B1.3211 ; EUR28: 2120(-1) Ref. : -	P	Végétation	-
Grpt. des dunes embryonnaires à <i>Elymus × acutus</i> et <i>Elymus farctus</i> in Delassus 2018 CORINE Biotopes: 16.2111 ; EUNIS: B1.311 ; EUR28: 2110(-1) Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Festuco dumetorum - Galietum arenarii</i> Géhu 1964 CORINE Biotopes: 16.2121 ; EUNIS: B1.3211 ; EUR28: 2120(-1) Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Filipendulo ulmariae – Convolvuletea sepium</i> Géhu & Géhu-Franck 1987	P	Mixte	FilCo
<i>Convolvuletalia sepium</i> Tüxen 1950 ex Mucina in Mucina et al. 1993	P	Mixte	-
<i>Calystegio sepium – Althaeion officinalis</i> de Foucault 2011 CORINE Biotopes: 37.71 ; EUNIS: E5.411 ; EUR28: 6430(-5) Ref. : (1)	P	Végétation	CaA
<i>Calystegio sepium – Angelicetum heterocarphae</i> Géhu & Géhu-Franck 1978 CORINE Biotopes: 37.712 ; EUNIS: E5.4112 ; EUR28: 6430(-5) Ref. : (4);(5);(10);(11);(12);(13);(19);(25);(31);(33);(34);(35);(39);(45)	P	Végétation	CAn
<i>Convolvulion sepium</i> Tüxen in Oberdorfer 1957 CORINE Biotopes: 37.1 / 37.715 ; EUNIS: E5.412 / E5.42 ; EUR28: Nul / 6430(-4) Ref. : (21);(29)	P	Mixte	Con
<i>Epilobio hirsuti – Convolvuletum sepium</i> Hilbig et al. 1972 CORINE Biotopes: 37.1 / 37.715 ; EUNIS: E3.4 / E5.412 ; EUR28: Nul / 6430(-4) Ref. : (18);(32)	?(E)	Mixte	EC
<i>Urtico dioicae – Convolvuletum sepium</i> Görs & Müller 1969 CORINE Biotopes: 37.1 / 37.715 ; EUNIS: E3.4 / E5.412 ; EUR28: Nul / 6430(-4) Ref. : (10);(11);(32);(36)	P	Mixte	UC
<i>Urtico dioicae – Phalaridetum arundinaceae</i> Schmidt 1981 CORINE Biotopes: 37.1 / 37.71 ; EUNIS: E3.4 / E5.4 ; EUR28: Nul / 6430(-4) Ref. : -	P	Mixte	UP
<i>Loto pedunculati – Filipenduletalia ulmariae</i> Passarge (1975) 1978	P	Mixte	-

<i>Achilleo ptarmicae – Cirsion palustris</i> Julve & Gillet ex de Foucault 2011 CORINE Biotopes: 37.1 / 37.715 ; EUNIS: E5.412 / E5.42 ; EUR28: Nul / 6430(-1) Ref. : (36)	P	Mixte	AcC
<i>Thalictro flavi – Filipendulion ulmariae</i> de Foucault in Royer et al. 2006 CORINE Biotopes: 37.1 / 37.715 ; EUNIS: E5.412 / E5.42 ; EUR28: Nul / 6430(-1) Ref. : (38)	P	Mixte	ThF
<i>Thalictro flavi – Althaeetum officinalis</i> (Molinier & Tallon 1950) de Foucault in J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006 CORINE Biotopes: 37.1 / 37.715 ; EUNIS: E5.412 / E5.42 ; EUR28: Nul / 6430(-1) Ref. : (10);(11);(18);(32)	P	Mixte	TA
<i>Franguletea dodonei</i> Doing ex V. Westhoff in V. Westhoff & Den Held 1969	P	Végétation	-
<i>Salicetalia auritae</i> Doing ex Krausch 1968	P	Végétation	-
<i>Salicion cinereae</i> Müller & Görs 1958 CORINE Biotopes: 44.921 / 44.922 ; EUNIS: F9.121 / F9.22 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	?(E)	Végétation	-
Grpt. à <i>Salix atrocinerea</i> CORINE Biotopes: 44.92 ; EUNIS: F9.2 ; EUR28: Nul Ref. : (0)	P	Végétation	SIAt
<i>Galio aparines – Urticetea dioicae</i> Passarge ex Kopecký 1969	P	Végétation	GalUr
<i>Galio aparines – Alliarietalia petiolatae</i> Oberdorfer ex Görs & Müller 1969	P	Végétation	GaAl
<i>Aegopodion podagrariae</i> Tüxen 1967 CORINE Biotopes: 87 ; EUNIS: E5.43 ; EUR28: 6430(-6) Ref. : (36)	P	Végétation	AeP
<i>Calystegio sepium – Aristolochietum clematitidis</i> de Foucault & Frileux 1983 CORINE Biotopes: 37.12 ; EUNIS: E5.43 ; EUR28: 6430(-6) Ref. : (36)	?(P)	Végétation	-
<i>Anthriscetum sylvestris</i> Hadač 1978 CORINE Biotopes: 37.72 ; EUNIS: E5.43 ; EUR28: 6430(-6) Ref. : -	P	Végétation	AN
<i>Glycerio fluitantis – Nasturtietea officinalis</i> Zohary ex Géhu & Géhu-Franck 1987	P	Végétation	-
<i>Nasturtio officinalis – Glycerietalia fluitantis</i> Pignatti 1953	P	Végétation	-
<i>Apion nodiflori</i> Segal in Westhoff & Den Held 1969 CORINE Biotopes: 53.4 ; EUNIS: C3.1 ; EUR28: Nul Ref. : (29);(36);(38)	?(P)	Végétation	-

<i>Oenantheum crocatae</i> Braun-Blanquet, Berset & Pinto 1950 CORINE Biotopes: 53.4 ; EUNIS: C3.1 ; EUR28: Nul Ref. : (18);(21);(32)	?(P)	Végétation	-
<i>Glycerio fluitantis – Sparganion neglecti</i> Braun-Blanquet & Sissingh in Boer 1942 CORINE Biotopes: 53.4 ; EUNIS: C3.1 ; EUR28: Nul Ref. : (25);(26);(29);(36);(38)	P	Végétation	-
<i>Glycerietum fluitantis</i> Nowinski 1930 CORINE Biotopes: 53.4 ; EUNIS: C3.1 ; EUR28: Nul Ref. : (3);(7);(18);(21);(32)	P	Végétation	GF
<i>Helianthemetea guttati</i> (Braun-Blanquet ex Rivas Goday 1958) Rivas Goday & Rivas-Martínez 1963	P	Végétation	Helia
<i>Helianthemetalia guttati</i> Braun-Blanquet in Braun-Blanquet, Molinier & Wagner 1940	P	Végétation	-
<i>Thero – Airion</i> Tüxen ex Oberdorfer 1957 CORINE Biotopes: 35.21 ; EUNIS: E1.91 ; EUR28: Nul Ref. : (1);(9);(16);(18);(20);(22);(25);(32);(33);(36)	P	Végétation	ThA
<i>Filagini minima</i> – <i>Airetum praecocis</i> Wattez, Géhu & de Foucault 1978 CORINE Biotopes: 35.21 ; EUNIS: E1.91 ; EUR28: Nul Ref. : (18);(32)	?(P)	Végétation	-
<i>Vulpio bromoidis – Trifolietum subterranei</i> Wattez, Géhu & de Foucault 1977 CORINE Biotopes: 35.21 ; EUNIS: E1.91 ; EUR28: Nul Ref. : -	?(E)	Végétation	-
<i>Honckenyo peplidis – Elymetea arenarii</i> Tüxen 1966	P	Végétation	-
<i>Honckenyo peplidis – Elymetalia arenarii</i> Tüxen 1966	P	Végétation	-
<i>Honckenyo peplidis – Elymion arenarii</i> Tüxen 1966 CORINE Biotopes: 16.2111 ; EUNIS: B1.311 ; EUR28: 2110(-1) Ref. : (33);(36);(38)	P	Végétation	HoE
<i>Honckenyetum latifoliae</i> Géhu 1996 CORINE Biotopes: 16.2111 ; EUNIS: B1.3111 ; EUR28: 2110(-1) Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Juncetea bufonii</i> de Foucault 1988	P	Végétation	Junce
<i>Elatino triandrae - Cyperetalia fuscii</i> de Foucault 1988	P	Végétation	-
<i>Elatino triandrae – Damasonion alismatis</i> de Foucault 1988 CORINE Biotopes: 22.32 ; EUNIS: C3.51 ; EUR28: 3130(-4) Ref. : (19);(43)	P	Végétation	-
<i>Lythro portulae – Damasonietum alismatis</i> (Gadeceau 1909) de Foucault 1988	P	Végétation	LD

CORINE Biotopes: 22.32 ; EUNIS: C3.51 ; EUR28: 3130(-4) Ref. : (19);(43)			
<i>Heleochoilon schoenoidis</i> Braun-Blanquet ex Rivas Goday, Borja, Monasterio, Galiano & Rivas-Martínez 1956 CORINE Biotopes: 22.34 ; EUNIS: C3.42 ; EUR28: 3170*(-3) Ref. : (14)	P	Végétation	-
<i>Chenopodio chenopodioidis - Crypsietum aculeatae</i> Paradis & Lorenzoni 1994 CORINE Biotopes: 22.34 ; EUNIS: C3.42 ; EUR28: 3170*(-3) Ref. : (14)	P	Végétation	CC
<i>Nanocyperetalia flavescens</i> Klika 1935	P	Végétation	-
<i>Cicendion filiformis</i> (Rivas Goday in Rivas Goday & Borja 1961) Braun-Blanquet 1967 CORINE Biotopes: 22.3233 ; EUNIS: C3.5133 ; EUR28: 3130(-5) Ref. : (36);(38)	?(P)	Végétation	-
<i>Cicendietum filiformis</i> Allorge 1922 CORINE Biotopes: 22.3233 ; EUNIS: C3.5133 ; EUR28: 3130(-5) Ref. : (36)	?(P)	Végétation	-
<i>Nanocyperion flavescens</i> (W. Koch 1926) Libbert 1932 CORINE Biotopes: 22.32 ; EUNIS: C3.51 ; EUR28: 3130(-5) Ref. : (18);(32)	?(E)	Végétation	-
<i>Cyperetum flavescens</i> W. Koch ex Aichinger 1933 CORINE Biotopes: 22.3232 ; EUNIS: C3.5132 ; EUR28: 3130(-5) Ref. : (18);(32)	?(E)	Végétation	-
<i>Radiolion linoidis</i> W. Pietsch 1971 CORINE Biotopes: 22.3233 ; EUNIS: C3.5133 ; EUR28: 3130(-5) Ref. : (33);(36);(38)	P	Végétation	Rad
<i>Ranunculo sardoii - Myosoretum minimi</i> Diémont et al. ex Oesau 1973 CORINE Biotopes: 22.3233 ; EUNIS: C3.5133 ; EUR28: 3130(-5) Ref. : (43)	P	Végétation	RM
Grpt. à <i>Juncus bufonius</i> (incl. Grpt. à <i>Juncus supinus</i>) CORINE Biotopes: ? ; EUNIS: ? ; EUR28: ? Ref. : (18);(19);(21);(32);(36);(38)	?(P)	Végétation	-
<i>Koelerio glaucae - Corynephoretea canescens</i> Klika in Klika & V. Novák 1941	P	Végétation	KoeCo
<i>Corynephoretalia canescens</i> Klika 1934	?(P)	Végétation	-
<i>Miboro minimae - Corynephorion canescens</i> Loiseau & Felzines 2007 CORINE Biotopes: ; EUNIS: ; EUR28: Ref. : (33);(36)	?(P)	Végétation	-
<i>Sileno conicae - Cerastion semidecandri</i> Korneck 1974	?(E)	Végétation	-

CORINE Biotopes: 64.4 ; EUNIS: E1.97 ; EUR28: 6120(-1) Ref. : (21);(32)			
<i>Artemisio lloydii - Koelerietalia albescens</i> Sissingh 1974	P	Végétation	-
<i>Euphorbio portlandicae - Helichryson stoechadis</i> Géhu & Tüxen ex Sissingh 1974 CORINE Biotopes: 16.222 ; EUNIS: B1.42 ; EUR28: 2130(-2) Ref. : -	P	Végétation	EuH
<i>Lemnetea minoris</i> Tüxen ex O. Bolòs & Masclans 1955	P	Végétation	-
<i>Hydrocharitetalia Rübél ex Klika in Klika & Hadač</i> 1944	?(P)	Végétation	-
<i>Hydrocharition morsus-ranae</i> Rübél ex Klika in Klika & Hadač 1944 CORINE Biotopes: 22.41 / 22.42 ; EUNIS: C1.221 / C1.23 / C1.32 ; EUR28: 3150(-2) / 3150(-3) Ref. : (18);(32);(36)	?(P)	Végétation	-
<i>Ceratophylletum demersi</i> Corillion 1957 CORINE Biotopes: 22.42 ; EUNIS: C1.23; EUR28: 3150(-2) Ref. : (18);(32)	?(P)	Végétation	CD
<i>Lemno trisulcae – Utricularietum vulgaris</i> Soó 1947 CORINE Biotopes: 22.41 ; EUNIS: C1.221; EUR28: 3150(-3) Ref. : (18);(32)	?(E)	Végétation	LU
<i>Potamo – Ceratophylletum submersi</i> Pop 1962 CORINE Biotopes: 22.41 ; EUNIS: C1.32; EUR28: 3150(-3) Ref. : (36)	?(P)	Végétation	PC
<i>Lemnetalia minoris</i> O. Bolòs & Masclans 1955	P	Végétation	-
<i>Lemnion minoris</i> Tüxen ex O. Bolòs & Masclans 1955 CORINE Biotopes: 22.41 / 24.44 ; EUNIS: C1.22 / C1.32 / C2.34 ; EUR28: 3150(-3) Ref. : (21);(29);(36);(38)	P	Végétation	-
<i>Lemnetum gibbae</i> W. Koch ex Miyawaki & J. Tüxen 1960 CORINE Biotopes: 22.41 ; EUNIS: C1.221 ; EUR28: 3150(-3) Ref. : (30)	P	Végétation	LG
<i>Spirodela – Lemnetum minoris</i> Th. Müller & Görs 1960 CORINE Biotopes: 22.41 ; EUNIS: C1.221 ; EUR28: 3150(-3) Ref. : (30)	P	Végétation	SL
<i>Lemno trisulcae – Salvinion natantis</i> Slavnič 1956 CORINE Biotopes: 22.41 ; EUNIS: C1.22 ; EUR28: 3150(-2) / 3150(-3) Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Lemnetum trisulcae</i> Hartog 1963 CORINE Biotopes: 22.41 ; EUNIS: C1.221 ; EUR28: 3150(-2) Ref. : (18);(30);(32)	P	Végétation	LT

<i>Riccietum fluitantis</i> Slavnic 1956 CORINE Biotopes: 22.41 ; EUNIS: C1.221 ; EUR28: 3150(-3) Ref. : (18);(32)	?(P)	Végétation	RF
<hr/> <i>Melampyro pratensis – Holcetea mollis</i> Passarge 1994	P	Végétation	-
<i>Melampyro pratensis – Holcetalia mollis</i> Passarge 1979	P	Végétation	-
<i>Conopodio majoris – Teucrium scorodoniae</i> Julve ex Boulet & Rameau in Bardat et al. 2004 CORINE Biotopes: ; EUNIS: E5.2 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Teucrium scorodoniae – Corydalisdetum claviculatae</i> de Foucault & Frileux 1983 CORINE Biotopes: ; EUNIS: E5.2 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	TC
<i>Holco mollis – Pteridion aquilini</i> Passarge (1994) 2002 CORINE Biotopes: 31.86 ; EUNIS: E5.3 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Potentillo erectae – Holcion mollis</i> Passarge 1979 CORINE Biotopes: ; EUNIS: ; EUR28: Ref. : (21)	?(P)	Végétation	-
<hr/> <i>Molinio caeruleae – Juncetea acutiflori</i> Braun-Blanquet 1950	P	Végétation	MolJu
<i>Molinietales caeruleae</i> Koch 1926	P	Végétation	-
<i>Juncion acutiflori</i> Braun-Blanquet in Braun-Blanquet & Tüxen 1952 CORINE Biotopes: 37.312 ; EUNIS: E3.512 ; EUR28: 6410(-6) / 6410(-8) Ref. : (26);(33)	P	Végétation	JuA
<i>Caro verticillati – Juncetum acutiflori</i> Oberdorfer in Oberdorfer 1979 CORINE Biotopes: 37.312 ; EUNIS: E3.512 ; EUR28: 6410(-6) Ref. : (36);(38)	P	Végétation	CJ
<i>Cirsio dissecti – Scorzoneretum humilis</i> de Foucault 1981 CORINE Biotopes: 37.312 ; EUNIS: E3.512 ; EUR28: 6410(-6) Ref. : (36);(38);(43);(44)	P	Végétation	CS
<i>Oenanthe fistulosae – Agrostietum caninae</i> de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 37.312 ; EUNIS: E3.512 ; EUR28: 6410(-8) Ref. : (18);(32);(36);(38);(43)	?(E)	Végétation	OA
<hr/> <i>Nerio oleandri – Tamaricetea africanae</i> Braun-Blanquet & O. Bolòs 1958	P	Végétation	-
<i>Tamaricetalia africanae</i> Braun-Blanquet & O. Bolòs 1958	P	Végétation	-
<i>Tamaricion africanae</i> Braun-Blanquet & O. Bolòs 1958	P	Végétation	-

CORINE Biotopes: 44.8131 ; EUNIS: F9.3131 ; EUR28: 92D0 Ref. : (18);(32)			
<i>Solano dulcamarae – Tamaricetum gallicae</i> de Foucault 2008 CORINE Biotopes: 44.8131 ; EUNIS: F9.3131 ; EUR28: 92D0 Ref. : (18);(32)	P	Végétation	ST
<i>Phragmito australis – Magnocaricetea elatae</i> Klika in Klika & V. Novák 1941	P	Végétation	PhrMa
<i>Magnocaricetalia elatae</i> Pignatti 1954	P	Végétation	-
<i>Carici pseudocyperi – Rumicion hydrolapathi</i> Passarge 1964 CORINE Biotopes: 53.213 ; EUNIS: D5.21 ; EUR28: Nul Ref. : (7);(8);(10);(11);(18);(19);(21);(29);(30);(32);(36)	P	Végétation	-
<i>Galio palustris – Caricetum ripariae</i> Bal.-Tul., Mucina, Ellmauer & B.Walln. in G.Grabherr & Mucina 1993 CORINE Biotopes: 53.213 ; EUNIS: D5.21 ; EUR28: Nul Ref. : (3);(7);(8);(10);(11);(18);(19);(21);(29);(30);(32);(36)	P	Végétation	GC
<i>Caricion gracilis</i> Neuhäusl 1959 CORINE Biotopes: 53.21 ; EUNIS: D5.21 ; EUR28: Nul Ref. : (26);(38)	P	Végétation	-
<i>Caricetum gracilis</i> Almquist 1929 nom. conserv. propos. CORINE Biotopes: 53.2121 ; EUNIS: D5.2121 ; EUR28: Nul Ref. : (7);(36)	P	Végétation	CG
<i>Caricetum vesicariae</i> Chouard 1924 CORINE Biotopes: 53.2142 ; EUNIS: D5.2142 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	?(E)	Végétation	-
<i>Carici otrubae – Cyperetum longi</i> Tüxen & Oberdorfer 1958 CORINE Biotopes: 53.21 ; EUNIS: D5.21 ; EUR28: Nul Ref. : (11)	?(E)	Végétation	-
<i>Magnocaricion elatae</i> Koch 1926 CORINE Biotopes: 53.21 ; EUNIS: D5.21 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	?(P)	Végétation	-
<i>Caricetum acutiformi – paniculatae</i> Vlieger & Van Zinderen Bakker in Boer 1942 CORINE Biotopes: 53.216 ; EUNIS: D5.216 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	?(P)	Végétation	-
<i>Phragmitetalia australis</i> Koch 1926	P	Végétation	-
<i>Eleocharito palustris – Sagittarion sagittifoliae</i> Passarge 1964 CORINE Biotopes: 53.14 ; EUNIS: C3.24 ; EUR28: Nul Ref. : (21);(29);(36);(38)	P	Végétation	-
<i>Butometum umbellati</i> Philippi 1973	?(P)	Végétation	-

CORINE Biotopes: 53.145 ; EUNIS: C3.245 ; EUR28: Nul Ref. : (30)			
<i>Eleocharitetum palustris</i> Savič 1926 CORINE Biotopes: 53.14A ; EUNIS: C3.24A ; EUR28: Nul Ref. : (30)	P	Végétation	EP
<i>Phalaridion arundinaceae</i> Kopecký 1961 CORINE Biotopes: 53.16; EUNIS: C3.26; EUR28: Nul Ref. : (19);(36);(38)	P	Végétation	Phl
<i>Iridetum pseudacori</i> Egglers ex Brzeg & M.Wojterska in M.Wojterska 2001 CORINE Biotopes: 53.14 ; EUNIS: C3.24B EUR28: Nul Ref. : (33);(36);(38);(43)	P	Végétation	-
<i>Phragmition communis</i> Koch 1926 CORINE Biotopes: 53.1 ; EUNIS: C3.2 ; EUR28: Nul / 7210(-1) Ref. : (20);(21);(22);(26);(28);(38)	P	Végétation	-
<i>Cladietum marisci</i> P. Allorge 1921 CORINE Biotopes: 53.3 ; EUNIS: D5.24; EUR28: 7210(-1) Ref. : (33);(36);(38);(43)	?(E)	Végétation	CM
<i>Glycerietum aquaticae</i> Nowiński 1930 CORINE Biotopes: 53.15 ; EUNIS: C3.251 ; EUR28: Nul Ref. : (2);(3);(4);(7);(10);(11);(18);(19);(25);(26);(29);(30);(32);(36);(38);(43)	P	Végétation	GA
<i>Phragmitetum communis</i> Savič 1926 CORINE Biotopes: 53.11 ; EUNIS: C3.21 ; EUR28: Nul Ref. : (2);(10);(11);(18);(19);(21);(29);(30);(32);(36);(43)	P	Végétation	PHr
<i>Scirpetum lacustris</i> Chouard 1924 CORINE Biotopes: 53.12 ; EUNIS: C3.22 ; EUR28: Nul Ref. : (30)	P	Végétation	SLa
<i>Typhetum latifoliae</i> Nowiński 1930 CORINE Biotopes: 53.13 ; EUNIS: C3.231 ; EUR28: Nul Ref. : (3);(11);(19);(36)	P	Végétation	TL
<i>Typhetum angustifoliae</i> P.Allorge ex Pignatti 1953 CORINE Biotopes: 53.13 ; EUNIS: C3.232 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	TAn
<i>Equisetetum eleocharitis</i> Nowiński 1930 (= <i>Equisetetum fluviatilis</i> Nowiński 1930) CORINE Biotopes: 53.147 ; EUNIS: C3.247 / D5.132 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Scirpetalia compacti</i> Hejný in Holub, Hejný, Moravec & Neuhäusl 1967 corr. Rivas-Martínez, J.C. Costa, Castroviejo & Valdés 1980	P	Végétation	-
<i>Scirpion maritimi</i> Dahl & Hadač 1941	P	Mixte	-

CORINE Biotopes: 16.35 / 53.11 / 53.17 ; EUNIS: B1.85 / C3.21 / C3.27 ; EUR28: Nul / 2190(-5)

Ref. : (26);(38)

<i>Apio nodiflori</i> – <i>Eleocharitetum amphibiae</i> Géhu & Géhu-Franck 1972 CORINE Biotopes: 53.17 ; EUNIS: C3.27 ; EUR28: Nul Ref. : (3);(4);(5);(10);(11);(13);(16);(19);(25);(34);(39);(45);(46)	P	Végétation	AE
<i>Astero tripolii</i> – <i>Phragmitetum communis</i> Jeschke ex Krisch 1974 CORINE Biotopes: 53.11 / 16.35 ; EUNIS: C3.21 / B1.85 ; EUR28: Nul / 2190(-5) Ref. : (1);(2);(15);(16);(18);(19);(21);(24);(26);(27);(32);(36)	P	Mixte	AP
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Bolboschoenetum maritimi</i> Delcoigne & Thébaud in Delcoigne & Thébaud 2018 CORINE Biotopes: 53.17 / 16.35 ; EUNIS: C3.27 / B1.85 ; EUR28: Nul / 2190(-5) Ref. : -	P	Mixte	EB
<i>Schoenoplectetum tabernaemontani</i> Soó (1927) 1947 CORINE Biotopes: 53.17 / 16.35 ; EUNIS: C3.27 / B1.85 ; EUR28: Nul / 2190(-5) Ref. : (18);(19);(32);(34);(36)	P	Mixte	-
<i>Scirpetum maritimi</i> Langendonck 1932 CORINE Biotopes: 53.17 / 16.35 ; EUNIS: C3.27 / B1.85 ; EUR28: Nul / 2190(-5) Ref. : (1);(2);(5);(15);(18);(19);(21);(27);(29);(30);(32);(34);(36);(37)	P	Mixte	SC
<i>Scirpetum triquetri</i> Zonneveld 1955 corr. et em. Géhu & Biondi 1988 CORINE Biotopes: 53.17 ; EUNIS: C3.27 ; EUR28: Nul Ref. : (3);(4);(5);(10);(11);(12);(13);(19);(25);(27);(34);(35);(36);(46)	P	Végétation	STr
Phragmitaie oligohaline ("Roselière saumâtre" in Géhu & Géhu-Franck 1978) CORINE Biotopes: 53.11 ; EUNIS: C3.21 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	PO
Communauté basale du <i>Scirpetum maritimi</i> Langendonck 1932 CORINE Biotopes: 53.17 / 16.35 ; EUNIS: C3.27 / D5.11 / B1.85 ; EUR28: Nul / 2190(-5) Ref. : -	P	Mixte	SC*
<i>Polygono arenastri</i> – <i>Poetea annuae</i> Rivas-Martínez 1975 corr. Rivas-Martínez, Báscones, T.E. Díaz, Fernández González & Loidi 1991	P	Végétation	PolPo
<i>Sagino apetalae</i> – <i>Polycarpetalia tetraphylli</i> de Foucault 2010	?(P)	Végétation	-
<i>Polycarpion tetraphylli</i> Rivas-Martínez 1975 CORINE Biotopes: ; EUNIS: E1.E ; EUR28: Nul Ref. : (21)	?(P)	Végétation	-
<i>Polygono arenastri</i> – <i>Poetalia annuae</i> Tüxen in Géhu, J.L. Rich & Tüxen 1972 corr Rivas-Martínez, Báscones, T.E. Díaz, Fernández González & Loidi 1991	P	Végétation	-
<i>Polygono arenastri</i> – <i>Coronopodium squamati</i> Sissingh 1969 CORINE Biotopes: ; EUNIS: E2.8 ; EUR28: Nul Ref. : (19);(21)	P	Végétation	-

<i>Poo annuae</i> – <i>Plantagnetum coronopodis</i> (Le Neveu 1978) de Foucault 2008 CORINE Biotopes: ; EUNIS: E1.E ; EUR28: Nul Ref. : (21)	P	Végétation	-
<i>Potametea pectinati</i> Klika in Klika & Novák 1941	P	Mixte	-
<i>Luronio</i> - <i>Potametalia</i> Hartog & Segal 1964	P	Végétation	-
<i>Batrachion fluitantis</i> neuhäusl 1959 CORINE Biotopes: 22.432 ; EUNIS: C1.3411 ; EUR28: Null Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Potamo crispi</i> – <i>Ranunculetum trichophylli</i> imchenetzky 1926 CORINE Biotopes: 22.432 ; EUNIS: C1.3411 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	PR
<i>Ranunculion aquatilis</i> H. Passarge ex Theurillat in Theurillat, Mucina & Hájek 2015 CORINE Biotopes: 11.4 / 22.422 / 23.21 ; EUNIS: X03 / C1.33 / C1.54 ; EUR28: Nul / 1150(-1) Ref. : (3);(18);(21);(29);(32);(36)	P	Mixte	-
<i>Ranunculetum baudotii</i> Hocquette 1927 CORINE Biotopes: 11.4 / 23.21 ; EUNIS: X03 / C1.54 ; EUR28: Nul / 1150(-1) Ref. : (18);(19);(21);(32);(36);(37)	P	Mixte	RB
<i>Zannichellietum obtusifoliae</i> Brullo & Spampinato 1990 CORINE Biotopes: 22.422 / 22.422x21 ; EUNIS: C1.33 / C1.33xX03 ; EUR28: Nul / 1150(-1) Ref. : -	P	Mixte	ZO
<i>Parvopotamo</i> – <i>Zannichellietum pedicellatae</i> Soó (1934) 1947 CORINE Biotopes: 22.422 / 22.422x21 ; EUNIS: C1.33 / C1.33xX03 ; EUR28: Nul / 1150(-1) Ref. : -	P	Mixte	PZ
<i>Potametalia pectinati</i> Koch 1926	P	Végétation	-
<i>Nymphaeion albae</i> Oberd. 1957 CORINE Biotopes: 22.431 ; EUNIS: C1.241 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	P	Végétation	-
Grpt à <i>Nuphar lutea</i> (<i>Nupharetum luteae</i> Pohjala 1933 ou <i>Nymphaeetum albo</i> – <i>luteae</i> nowinski 1928) CORINE Biotopes: 22.4311 ; EUNIS: C1.2411 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	NL
<i>Trapetum natantis</i> V. Kárpáti 1963 CORINE Biotopes: 22.4312 ; EUNIS: C1.2412 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	TN
Grpt à <i>Ludwigia grandiflora</i> et Grpt à <i>Ludwigia peploides</i> CORINE Biotopes: ? ; EUNIS: ? ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	LW

<i>Potamion pectinati</i> (W. Koch 1926) Libbert 1931 CORINE Biotopes: 22.42x21 / 22.42 ; EUNIS: C1.33xX03 / C1.33 ; EUR28: 1150(-1) / 3150(-1) Ref. : (8);(18);(19);(21);(27);(29);(30);(36);(37);(38)	P	Mixte	-
<i>Elodeetum canadensis</i> Pignatti ex Nedelcu 1967 CORINE Biotopes: 22.42 ; EUNIS: C1.33; EUR28: 3150(-1) Ref. : (30)	?(P)	Végétation	Eca
<i>Parvopotamo – Zannichellietum palustris</i> (W. Koch 1926) Passarge 1964 em. Görs 1977 CORINE Biotopes: 22.42 ; EUNIS: C1.33 ; EUR28: 3150(-1) Ref. : (19);(30)	P	Végétation	Pza
<i>Potametum pectinati</i> Carstensen ex Hilbig 1971 CORINE Biotopes: 22.42x21 / 22.42 ; EUNIS: C1.33xX03 / C1.33 ; EUR28: 1150(-1) / 3150(-1) Ref. : (8)	P	Mixte	PP
<i>Potametum trichoidis</i> Freitag, Markus & Schwipl 1958 ex Tüxen 1974 CORINE Biotopes: 22.42 ; EUNIS: C1.23; EUR28: 3150(-1) Ref. : (37)	?(P)	Végétation	PTr
<i>Ranunculo circinati – Elodeetum nuttallii</i> Lange in H. Passarge 1994 CORINE Biotopes: 22.42 ; EUNIS: C1.33 ; EUR28: 3150(-1) Ref. : -	P	Végétation	RE
Communauté basale du <i>Parvopotamo – Zannichellietum palustris</i> (W. Koch 1926) Passarge 1964 em. Görs 1977 CORINE Biotopes: 22.42 ; EUNIS: C1.33 ; EUR28: 3150(-1) Ref. : -	P	Végétation	Pza*
<hr/> <i>Quercu roboris – Fagetea sylvaticae</i> Braun-Blanquet & J. Vlieger in J. Vlieger 1937	P	Végétation	-
<i>Fagetalia sylvaticae</i> Pawlowski in Pawlowski, Sokolowski & Wallisch 1928	P	Végétation	-
<i>Carpinion betuli</i> Issler 1931 CORINE Biotopes: 41.13 / 41.27 ; EUNIS: G1.63 / G1.A17; EUR28: Nul ou 9130 Ref. : (36);(38)	?(P)	Végétation	-
<i>Fraxino excelsioris – Quercion roboris</i> Rameau 1996 CORINE Biotopes: 41.2 ; EUNIS: G1.A1 ; EUR28: Nul Ref. : (18);(32)	P	Végétation	-
Ormaie à <i>Ulmus minor</i> CORINE Biotopes: 41.F1 ; EUNIS: G1.A61 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Quercetalia roboris</i> Tüxen 1931	?(P)	Végétation	-
<i>Quercion roboris</i> Malcuit 1929 CORINE Biotopes: 41.5 / 41.12 ; EUNIS: G1.8 / G1.62 ; EUR28: Nul ou 91A0 / 9120(-2) Ref. : (36);(38)	?(P)	Végétation	-

<i>Rhamno catharticae</i> - <i>Prunetea spinosae</i> Rivas Goday & Borja ex Tüxen 1962	P	Végétation	-
<i>Prunetalia spinosae</i> Tüxen 1952 Ref. : (9);(19);(30);(36)	?(P)	Végétation	-
<i>Rubetalia plicati</i> H.E. Weber in Pott 1995 Ref. : (21)	?(E)	Végétation	-
<i>Pyro spinosae</i> – <i>Rubetalia ulmifolii</i> Biondi, Blasi & Casavecchia in Biondi, Allegranza, Casavecchia, Galdenzi, Gasparri, Pesaresi, Vagge & Blasi 2014	P	Végétation	-
<i>Lonicerion periclymeni</i> Géhu, de Foucault & Delelis 1983 CORINE Biotopes: 31.8 / 16.252 ; EUNIS: F3.1 / B1.612 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Ulici europaei</i> – <i>Prunetum spinosae</i> Géhu & Géhu-Franck 1983 CORINE Biotopes: 31.85 / 31.8112 ; EUNIS: F3.15 / F3.1112 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Sambucetalia racemosae</i> Oberdorfer ex Passarge in Scamoni 1963	?(E)	Végétation	-
<i>Pruno spinosae</i> – <i>Rubion radulae</i> Weber 1974 CORINE Biotopes: 31.8111 ; EUNIS: F3.1111 ; EUR28: Nul Ref. : (10);(32)	?(E)	Végétation	-
<i>Ruppietea maritima</i> J. Tüxen 1960	?(P)	Végétation	-
<i>Ruppietalia maritima</i> J. Tüxen 1960	?(P)	Végétation	-
<i>Ruppion maritima</i> Braun-Blanquet ex Westhoff 1943 CORINE Biotopes: 11.4 ; EUNIS: X03 ; EUR28: 1150(-1) Ref. : (16);(21);(27);(29)	?(P)	Végétation	-
<i>Saginetea maritima</i> Westhoff, Van Leeuwen & Adriani 1962	P	Végétation	Sagine
<i>Saginetalia maritima</i> Westhoff, Van Leeuwen & Adriani 1962	?(P)	Végétation	-
<i>Saginion maritima</i> Westhoff, Van Leeuwen & Adriani 1962 CORINE Biotopes: 15.13 ; EUNIS: A2.553 ; EUR28: 1310(-4) Ref. : (1);(21);(27)	?(P)	Végétation	-
<i>Frankenietalia pulverulenta</i> Rivas-Martínez ex Castroviejo & Porta 1976	P	Végétation	-
<i>Frankenion pulverulenta</i> Rivas-Martínez ex Castroviejo & Porta 1976 CORINE Biotopes: 15.13 ; EUNIS: A2.553 ; EUR28: 1310(-4) Ref. : (19);(42)	P	Végétation	Fra
<i>Parapholido strigosae</i> – <i>Hordeetum marini</i> (Géhu et al. 1975) Géhu & de Foucault 1978 CORINE Biotopes: 15.13 ; EUNIS: A2.553 ; EUR28: 1310(-4) Ref. : (19);(21);(37)	P	Végétation	PH

Grpt à <i>Puccinellia rupestris</i> CORINE Biotopes: 15.13? ; EUNIS: A2.553? ; EUR28: 1310(-4)? Ref. : (42)	?(P)	Végétation	-
<i>Salici purpureae – Populetea nigrae</i> Rivas-Martínez & Cantó ex Rivas-Martínez, Báscones, T.E. Díaz, Fernández González & Loidi (1991) 2001	P	Végétation	SalPo
<i>Populetalia albae</i> Braun-Blanquet ex Tchou 1948	P	Végétation	-
<i>Alnion incanae</i> Pawlowski in Pawlowski, Sokolowski & Wallisch 1928 CORINE Biotopes: 44.3 / 44.4 ; EUNIS: G1.21 / G1.22 ; EUR28: 91E0*(-8) / 91E0*(-11) / 91F0(-3) Ref. : (4);(10);(11);(12);(13);(19);(31);(33);(36);(38)	P	Végétation	-
<i>Ulmo laevis – Fraxinetum angustifoliae</i> (Breton) Rameau & Schmitt ex J.-M. Royer, Felzines, Misset & Thévenin 2006 CORINE Biotopes: 44.4 ; EUNIS: G1.22 ; EUR28: 91F0(-3) Ref. : (0);(4);(10);(11);(12);(13);(19);(31);(33);(36);(38)	P	Végétation	UF
<i>Alnenion glutinoso - incanae</i> Oberdorfer 1953 CORINE Biotopes: 44.3 ; EUNIS: G1.21 ; EUR28: 91E0*(-8) / 91E0*(-11) Ref. : (0)	P	Végétation	Aln
<i>Filipendulo ulmariae - Alnetum glutinosae</i> (Lemée) H. Passarge & Hoffmann 1968 CORINE Biotopes: 44.332 ; EUNIS: G1.2132 ; EUR28: 91E0*(-11) Ref. : (0)	?(P)	Végétation	-
<i>Carici remotae - Fraxinetum excelsioris</i> Koch ex Faber 1936 CORINE Biotopes: 44.311 ; EUNIS: G1.2111 ; EUR28: 91E0*(-8) Ref. : (0)	?(P)	Végétation	-
<i>Salicetalia albae</i> Müller & Görs 1958	P	Végétation	-
<i>Salicion albae</i> Soó 1930 CORINE Biotopes: 44.13 ; EUNIS: G1.111 ; EUR28: 91E0*(-1) / 91E0*(-2) Ref. : (13);(18);(19);(25);(32);(33);(36);(38);(39)	P	Végétation	SaA
<i>Salicetum albae</i> Issler 1926 CORINE Biotopes: 44.13 ; EUNIS: G1.111 ; EUR28: 91E0*(-1) Ref. : (0);(3);(4);(5);(6);(10);(11);(31)	P	Végétation	-
<i>Salici albae – Populetum nigrae</i> Tüxen ex Meijer-Drees 1936 CORINE Biotopes: 44.13 ; EUNIS: G1.111 ; EUR28: 91E0*(-1) Ref. : (5)	?(P)	Végétation	-
<i>Salicetum fragilis</i> Passarge 1957 CORINE Biotopes: 44.13 ; EUNIS: G1.1111 ; EUR28: 91E0*(-2) Ref. : (0)	?(P)	Végétation	-
Group of <i>Salix x rubens</i> community CORINE Biotopes: 44.121? ; EUNIS: F9.121? ; EUR28: 91E0*(-1)?	?(P)	Végétation	-

Ref. : (0)			
<i>Salicetalia purpureae</i> Moor 1958	P	Végétation	-
<i>Salicion triandrae</i> Müller & Görs 1958	P	Végétation	-
CORINE Biotopes: 44.121 ; EUNIS: F9.121 ; EUR28: Nul			
Ref. : (10);(11);(19);(25)			
<i>Salicetum triandro – viminalis</i> (Tüxen 1931) Lohmeyer 1952 ex Moor 1958	P	Végétation	SV
CORINE Biotopes: 44.121 ; EUNIS: F9.121 ; EUR28: Nul			
Ref. : (3);(10);(11);(19);(25);(0)			
<i>Salicornietea fruticosae</i> Braun-Blanquet & Tüxen ex A. Bolòs & O. Bolòs in A. Bolòs 1950	P	Végétation	-
<i>Salicornietalia fruticosae</i> Braun-Blanquet 1933	P	Végétation	-
<i>Halimionion portulacoidis</i> Géhu 1976	P	Végétation	-
CORINE Biotopes: 15.623 / 15.621 ; EUNIS: A2.5273 / A2.5271 ; EUR28: 1420(-1) / 1330(-2)			
Ref. : (21);(36)			
<i>Agropyro pungentis – Suaedetum verae</i> Géhu 1976	?(E)	Végétation	-
CORINE Biotopes: 15.623 ; EUNIS: A2.5273 ; EUR28: 1420(-1)			
Ref. : (36)			
<i>Halimionetum portulacoidis</i> Kuhnholz-Lordat 1927	P	Végétation	HA
CORINE Biotopes: 15.621 ; EUNIS: A2.5271 ; EUR28: 1330(-2)			
Ref. : -			
<i>Scheuchzerio palustris – Caricetea fuscae</i> Tüxen 1937	?(E)	Végétation	-
<i>Scheuchzerietalia palustris</i> Nordhagen 1936	?(E)	Végétation	-
<i>Caricion lasiocarpae</i> Vanden Berghen in Lebrun, Noirfalise, Heinemann & Vanden Berghen 1949	?(E)	Végétation	-
CORINE Biotopes: 54.5 ; EUNIS: ED2.3 ; EUR28: 7140(-1)			
Ref. : (36)			
<i>Caricetum rostratae</i> Rübel 1912 ex Osvald 1923	?(E)	Végétation	-
CORINE Biotopes: 54.53 ; EUNIS: D2.33 ; EUR28: 7140(-1)			
Ref. : (36)			
<i>Sedo albi – Scleranthetea biennis</i> Braun-Blanquet 1955	?(E)	Végétation	-
<i>Sedo albi – Scleranthetalia biennis</i> Braun-Blanquet 1955	?(E)	Végétation	-
<i>Sedion anglici</i> Braun-Blanquet in Braun-Blanquet & Tüxen 1952	?(E)	Végétation	-
CORINE Biotopes: 34.111 ; EUNIS: E1.111 ; EUR28: 8230(-5)			
Ref. : (18);(32)			

<i>Sisymbrietea officinalis</i> Korneck 1974	P	Végétation	Sisym
<i>Sisymbrietalia officinalis</i> J. Tüxen ex Görs 1966	P	Végétation	-
<i>Laguro ovati</i> – <i>Bromion rigidi</i> Géhu & Géhu-Franck 1985 CORINE Biotopes: 87.2 ; EUNIS: J2.6 ; EUR28: Nul Ref. : (16);(24)	P	Végétation	LaB
<i>Laguro ovati</i> – <i>Brometum rigidi</i> Géhu & Géhu-Franck 1985 CORINE Biotopes: 87.2 ; EUNIS: J2.6 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	LB
<i>Salsolion ruthenicae</i> G. Phil. ex Oberd. 1983 CORINE Biotopes: 87.2 ; EUNIS: E5.1 ; EUR28: Nul Ref. : (36)	P	Végétation	Sru
<i>Sisymbriion officinalis</i> Tüxen, Lohmeyer & Preising ex von Rochow 1951 CORINE Biotopes: 87.1 ; EUNIS: E5.1 ; EUR28: Nul Ref. : (20);(28)	P	Végétation	SiO
<i>Brassico nigrae</i> – <i>Carduetum tenuiflori</i> Bouzillé, Foucault & Lahondère 1984 nom. nov. Bioret, Lahondère & Botineau 1993 CORINE Biotopes: 87.1 ; EUNIS: E5.1 ; EUR28: Nul Ref. : (8);(19);(21);(32)	P	Végétation	-
<i>Bromo</i> – <i>Hordeion murinum</i> Hejny 1978 CORINE Biotopes: 87.1 ; EUNIS: E5.1 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Sisymbrio officinalis</i> – <i>Hordeetum murinum</i> Braun-Blanq. 1967 CORINE Biotopes: 87.1 ; EUNIS: E5.1 ; EUR28: Nul Ref. : -	P	Végétation	-
<i>Spartinetea glabrae</i> Tüxen in Beefink 1962	?(E)	Végétation	-
<i>Spartinetalia glabrae</i> Conard 1935	?(E)	Végétation	-
<i>Spartinion anglicae</i> Géhu in Bardat et al. 2004 CORINE Biotopes: 15.21 ; EUNIS: A2.554 ; EUR28: Nul ou 1320(-1) Ref. : (36)	?(E)	Végétation	-
<i>Spartinetum maritimae</i> (Emberg. & Regn. 1926) Corillion 1953 CORINE Biotopes: 15.21 ; EUNIS: A2.5543 ; EUR28: 1320(-1) Ref. : (36)	?(E)	Végétation	-
<i>Thero</i> – <i>Suaedetea splendentis</i> Rivas-Martínez 1972	P	Végétation	TheSua
<i>Thero</i> – <i>Salicornietalia dolichostachyae</i> Tüxen ex Boulet & Géhu in Bardat et al. 2004	P	Végétation	-
<i>Salicornion dolichostachyo</i> – <i>fragilis</i> Géhu & Rivas-Martínez ex Géhu in Bardat et al. 2004	P	Végétation	-

CORINE Biotopes: 15.1111; EUNIS: A2.5512 ; EUR28: 1310(-1)

Ref. : -

Astero tripolii – *Suaedetum maritimae subsp. maritimae* Géhu & Géhu-Franck
1984

P

Végétation

AS

CORINE Biotopes: 15.1111 ; EUNIS: A2.5512 ; EUR28: 1310(-1)

Ref. : -

Salicornion europaeo – ramosissimae Géhu & Géhu-Franck ex Rivas-Martínez
1990

P

Végétation

SaR

CORINE Biotopes: 15.1112; EUNIS: A2.5513 ; EUR28: 1310(-2)

Ref. : (1);(20);(24);(33);(36);(38)

Salicornietum disarticulato - ramosissimae Géhu 1976

P

Végétation

-

CORINE Biotopes: 15.1112 ; EUNIS: A2.5513 ; EUR28: 1310(-2)

Ref. : (17)

Puccinellio maritimae – Salicornietum ramosissimae Géhu & Géhu-Franck
1979

P

Végétation

-

CORINE Biotopes: 15.1112 ; EUNIS: A2.5513 ; EUR28: 1310(-2)

Ref. : (17)

Gpt. à *Salicornia ramosissima* et *Salicornia obscura* var. *rubescens*

P

Végétation

-

CORINE Biotopes: 15.1112 ; EUNIS: A2.5513 ; EUR28: 1310(-2)

Ref. : -

Annexe 03. Références bibliographiques utilisées pour établir le jeu de données de référence des associations végétales des *Agrostietea stoloniferae* ('BD de référence'). La colonne 'Nb relevés' correspond au nombre de relevés saisis et intégrés dans la 'BD de référence'

Association végétale	Tableau	Nb relevés
<i>Eleocharito palustris</i> – <i>Oenanthetum fistulosae</i>	Tab. 31 & Tab. 32 in de Foucault (1984)	67
<i>Gratiolo officinalis</i> – <i>Oenanthetum fistulosae</i>	Tab. 25, Tab. 26, Tab. 27, Tab. 28 & Tab. 29 in de Foucault (1984)	119
<i>Ranunculo ophioglossifolii</i> – <i>Oenanthetum fistulosae</i>	Tab. 84, Tab 85 & Tab 86, in de Foucault (1984)	77
<i>Hordeo secalini</i> – <i>Lolietum perennis</i>	Tab. 45 in de Foucault (1984)	29
<i>Oenantho peucedanifoliae</i> – <i>Brometum racemosi</i>	Tab. XVIII in de Foucault (1981) & Tab. 6 (relevé n°1) in de Foucault (1984)	19
<i>Senecioni aquatici</i> – <i>Oenanthetum mediae</i>	Tab. 38, Tab. 39 & Tab. 55 in de Foucault (1984)	109
<i>Agrostio stoloniferae</i> – <i>Caricetum vikingensis</i>	Tab. 1 in Géhu (1982) & Tab. 96 in de Foucault (1984)	29
<i>Pulicario dysentericae</i> – <i>Juncetum inflexi</i>	Tab. 46, Tab. 47, Tab. 57 in de Foucault (1984)	64
<i>Plantagini majoris</i> – <i>Trifolietum resupinati</i>	Tab. 93 in de Foucault (1984)	5
<i>Potentillo anserinae</i> – <i>Alopecuretum geniculati</i>	Tab. 37 in de Foucault (1984) & Tab. IX in de Foucault (1981)	14
<i>Cirsio arvensis</i> – <i>Alopecuretum pratensis</i>	Tab. 1 in Catteau 2006	7
<i>Junco acutiflori</i> – <i>Cynosuretum cristati</i>	Tab. 78 in de Foucault (1984) & Tab. XVII in de Foucault (1981)	44
<i>Carici divisae</i> – <i>Lolietum perennis</i>	Tab. 92 in de Foucault (1984)	22
<i>Trifolio maritimi</i> – <i>Oenanthetum silaifoliae</i>	Tab. 88, Tab. 89 & Tab. 90 in de Foucault (1984)	163

Bibliographie :

Catteau E (2006) Note concernant quelques végétations relevées dans la Flandre intérieure. Bull. Soc. Bot. N. France 59 (1-2) : 39-44

de Foucault B (1981) Les prairies permanentes du bocage virois (basse-Normandie, France) : typologie phytosociologique et essai de reconstitution des séries évolutives herbagères. Doc. Phytosociol., NS, V : 1-109

de Foucault B (1984) Systémique, structuralisme et synsystème des prairies hygrophiles des plaines atlantiques françaises. Thèse, Rouen, 675 p

Géhu JM (1982) Les groupements à *Carex distans* du littoral atlantique français. Doc. Phytosociol., NS, VI : 303-309

Annexe 04. Caractérisation des conditions environnementales des habitats à partir des valeurs indicatrices des espèces végétales

Les informations sur les optimums écologiques des espèces végétales peuvent être utilisées pour décrire les conditions environnementales des habitats (Diekmann 2003). Le système de classification d'Ellenberg (Ellenberg et al. 1991) attribue une valeur indicatrice aux espèces végétales pour les facteurs écologiques : Lumière (L), Température (T), Continentalité (K), Humidité (F), Acidité (R), Trophie (N) et salinité (S) pour les espèces d'Europe centrale. Dans cette classification, les conditions d'humidité (F) sont classées en 12 valeurs indicatrices (1 -> 12), la salinité en 10 valeurs (0 -> 9), et les autres facteurs (L, T, K, R et N) se répartissent sur des échelles de 9 unités (1 -> 9). Pour une meilleure prise en compte des spécificités biogéographiques du domaine atlantique, le système original d'Ellenberg pour l'Europe centrale (Ellenberg et al. 1991) a été adapté pour la Grande-Bretagne pour les indices L, F, R, N et S (Hill et al. 2000). Les valeurs disponibles pour les facteurs 'Salinité', 'Humidité', 'Acidité', 'Trophie' et 'Lumière' ont été compilées pour les espèces présentes dans la base de données de relevés phytosociologiques de l'estuaire de la Loire. Étant donné que le référentiel de valeurs indicatrices adapté au domaine atlantique (Hill et al. 2000) n'évalue pas toutes les espèces présentes dans notre base de données de relevés, nous avons utilisé les valeurs des valences écologiques de Julve (2007) pour compléter les informations des espèces manquantes. L'ensemble des indices a été intégré dans le logiciel Juice (Tichý 2002) afin de déterminer une valeur moyenne (pondérée en fonction de l'abondance des espèces) pour chaque relevé. Les relevés caractérisant un même habitat ont ensuite été rassemblés en cluster et des diagrammes en boîtes à moustaches ont été réalisés (Fig. 55 à 59). Ces figures permettent d'observer les distributions des valeurs indicatrices d'Ellenberg pour chaque habitat, révélant ainsi les amplitudes écologiques dans lesquels s'expriment les habitats de l'estuaire de la Loire.

Ces données ont été utilisées pour construire des diagrammes synthétisant les optimums écologiques (diagrammes écologiques) de chaque habitat afin d'illustrer les fiches descriptives des habitats d'intérêt communautaire (Annexe 05). Les valeurs comprises entre le 1^{er} quartile et le 3^{ème} quartile (arrondies au nombre entier le plus proche) ont été retenues pour sélectionner les valeurs d'Ellenberg dans ces diagrammes écologiques.

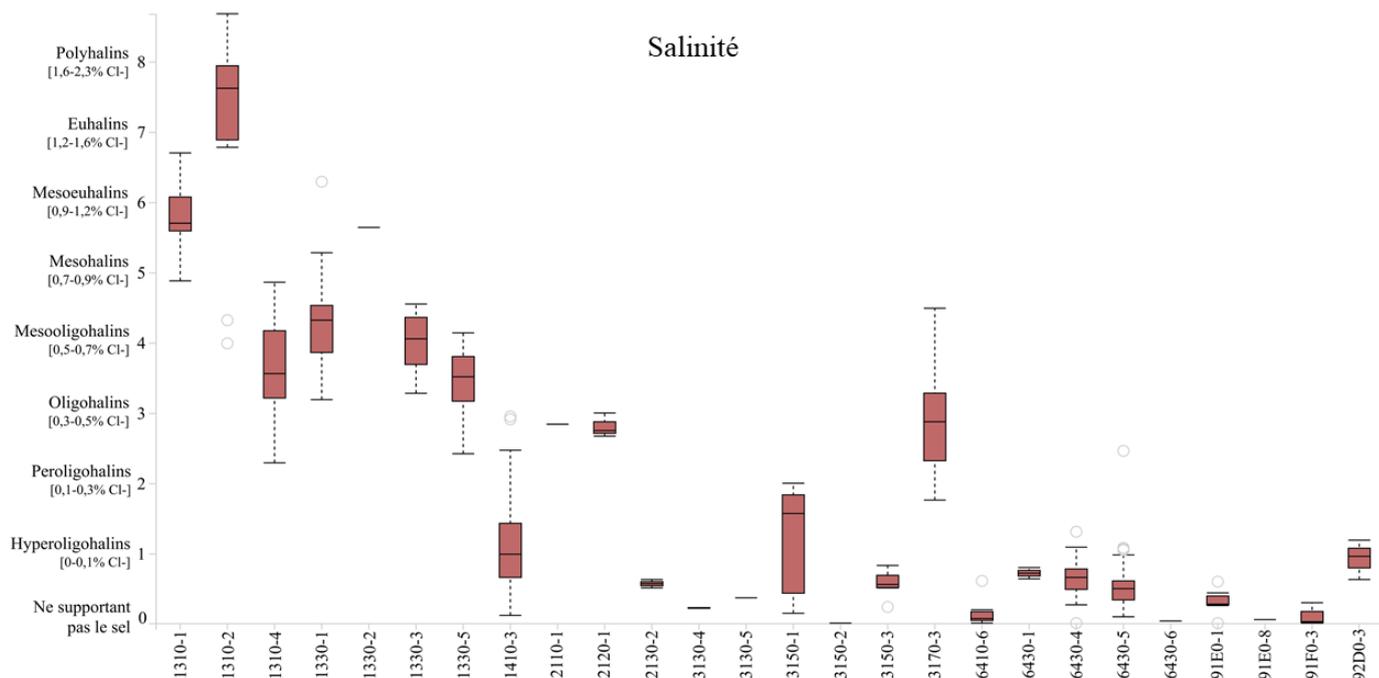


Figure 55. Amplitudes écologiques des habitats d'intérêt communautaire pour le facteur salinité. Les légendes des valeurs indicatrices (axes des ordonnées) sont reprises de Julve (2007).

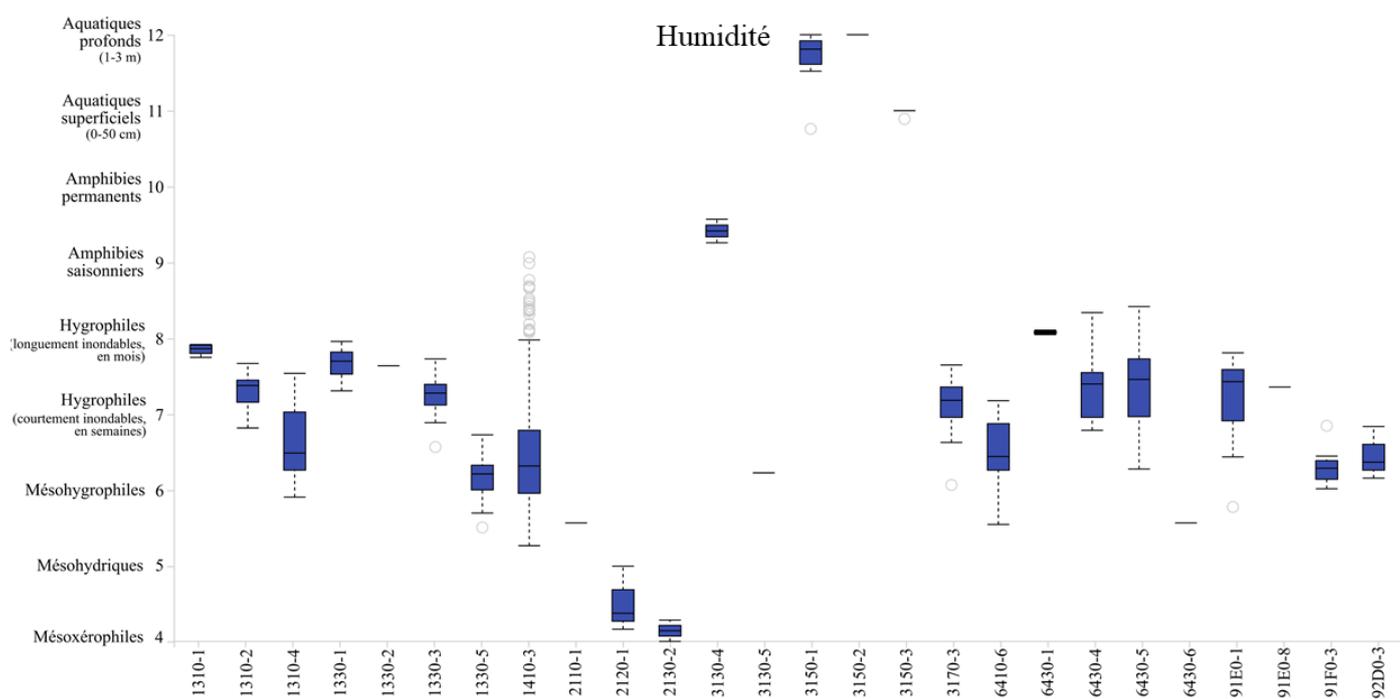


Figure 56. Amplitudes écologiques des habitats d'intérêt communautaire pour le facteur humidité. Les légendes des valeurs indicatrices (axes des ordonnées) sont reprises de Julve (2007).

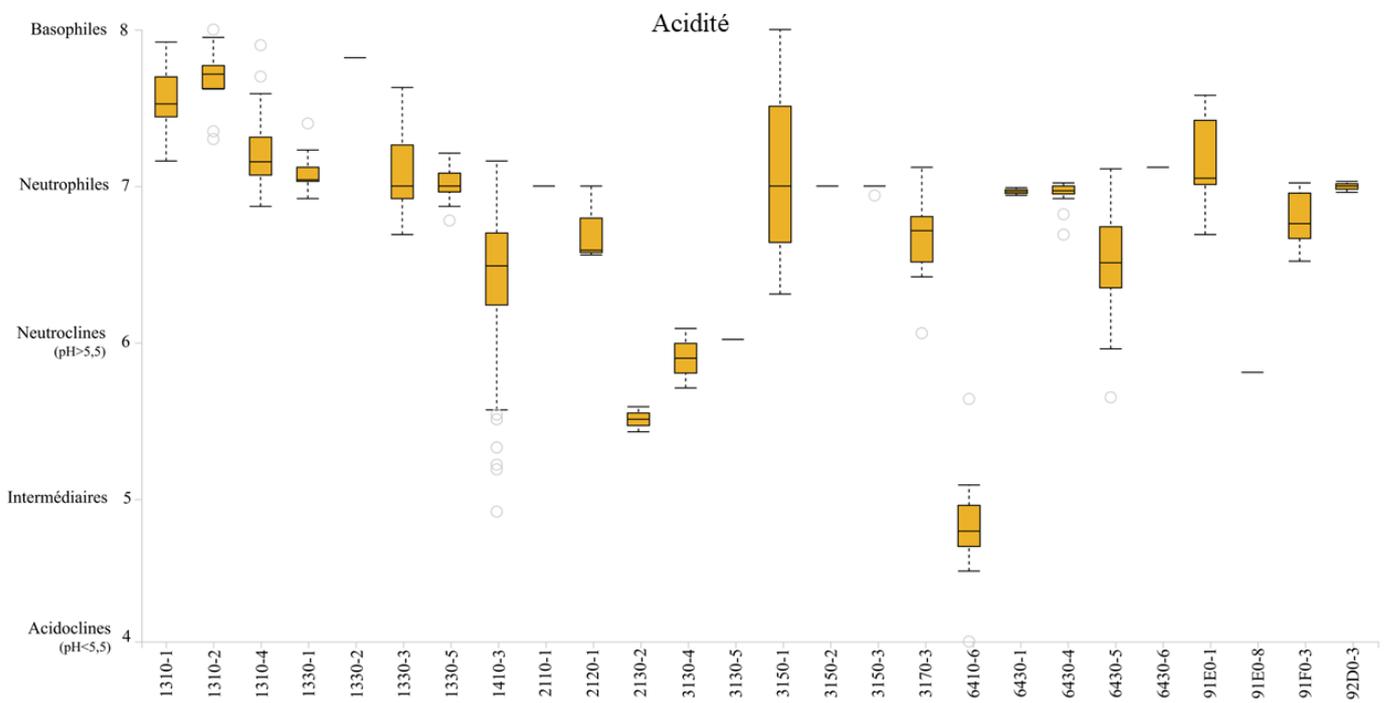


Figure 57. Amplitudes écologiques des habitats d'intérêt communautaire pour le facteur acidité. Les légendes des valeurs indicatrices (axes des ordonnées) sont reprises de Julve (2007).

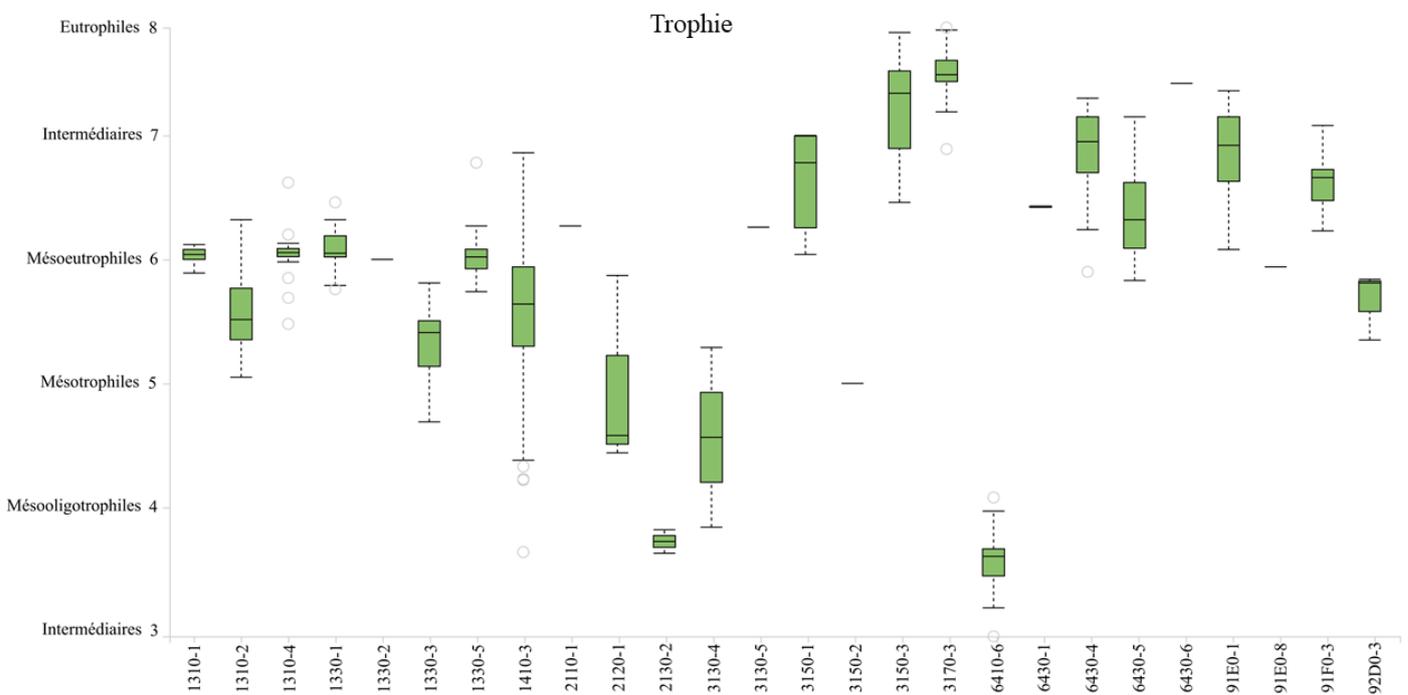


Figure 58. Amplitudes écologiques des habitats d'intérêt communautaire pour le facteur trophie. Les légendes des valeurs indicatrices (axes des ordonnées) sont reprises de Julve (2007).

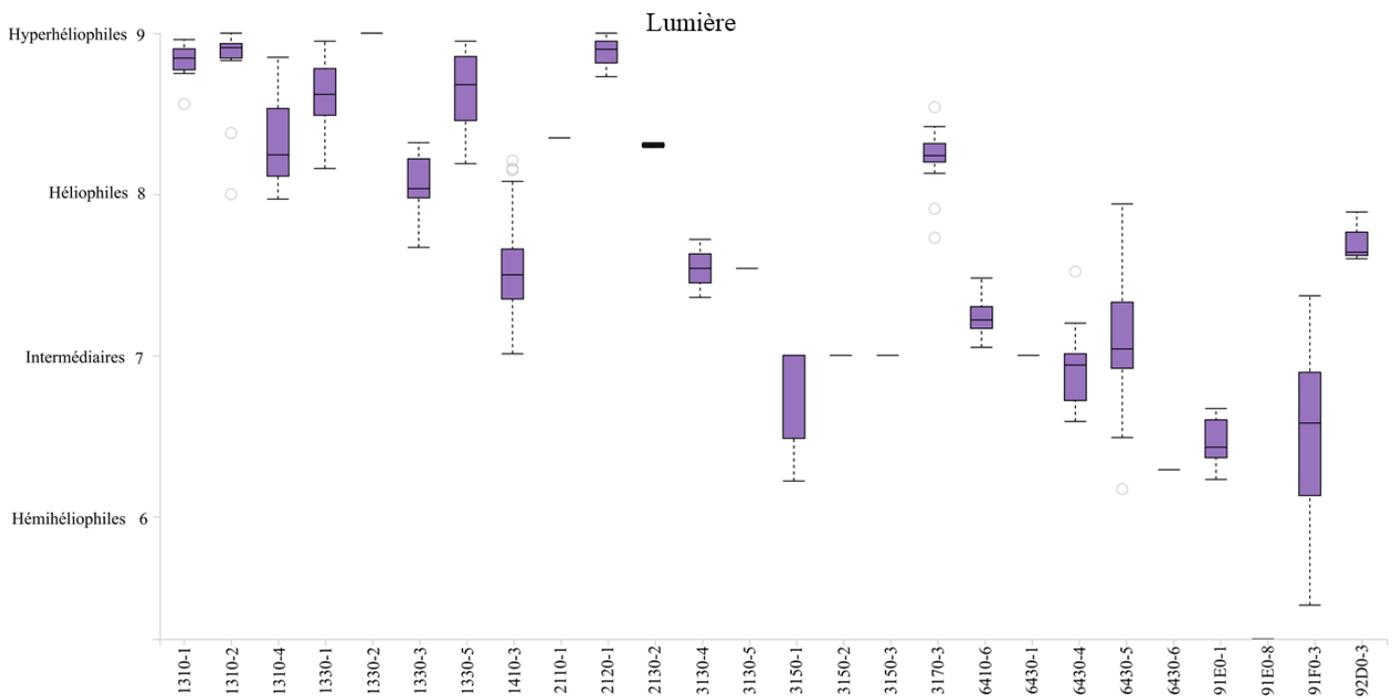


Figure 59. Amplitudes écologiques des habitats d'intérêt communautaire pour le facteur lumière. Les légendes des valeurs indicatrices (axes des ordonnées) sont reprises de Julve (2007).

Annexe 05. Fiches descriptives des habitats d'intérêt communautaire : Méthode d'élaboration et présentation d'un modèle de fiche habitat

Chaque habitat d'intérêt communautaire identifié sur le site Natura 2000 'Estuaire de la Loire' a fait l'objet d'une fiche descriptive comprenant différentes informations qui sont présentées ci-dessous. Un exemple de fiche pour l'habitat 1330-5 'Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée' est présenté à la fin de cette annexe.

Code et nom de l'habitat élémentaire : déclinaison française des habitats du Manuel d'interprétation des habitats de l'UE (EUR28) en habitats 'élémentaires' réalisée dans le cadre de la rédaction des Cahiers d'habitats (Bensettiti et al., 2001-2005).

Correspondances typologiques : Ces informations sont basées sur les typologies EUNIS (Davies et al. 2004) et les typologies CORINE biotopes (Devilleers et al. 1991). Les correspondances phytosociologiques, à l'échelle des associations végétales et des alliances ont été indiquées.

Type de logique d'identification : Selon Gaudillat et al. (2018) les définitions des habitats d'intérêt communautaire reposent soit sur des composantes abiotiques soit sur les types de végétations (syntaxons). Ainsi, les habitats peuvent être discriminés en deux principales catégories selon la logique qui régit leur définition : logique 'biotope' et logique 'végétation'. À noter que certains habitats peuvent être définis par la combinaison de critères liés aux biotopes et à la végétation : logique 'mixte'.

Description de l'habitat : Ces informations décrivent l'aspect général de l'habitat et les caractéristiques permettant son identification (composantes abiotiques, végétations...). Pour les habitats définis par la végétation, la description intègre une présentation de la physionomie générale de la végétation (types biologiques, structure, hauteur, recouvrement...) et de l'écologie (basée sur l'analyse des coefficients d'Ellenberg - Annexe 04).

Variabilité : Description des variations phytosociologiques, écologiques et/ou physiologiques de l'habitat qui permettent de mieux comprendre la structure et le fonctionnement de l'habitat.

Période optimale d'observation : Phénologie optimale de la végétation, caractérisé par sa période de floraison.

Espèces caractéristiques : Les espèces diagnostiques de chaque habitat ont été déterminées avec le coefficient *phi* mesurant la fidélité des espèces à chaque unité (Sokal & Rohlf 1995; Chytrý et al. 2002). Seules les espèces avec une valeur de *phi* > 0,25 ont été considérées comme diagnostiques d'un habitat. Nous avons défini les espèces constantes comme celles dont la fréquence d'occurrence en pourcentage est > 35 %, et les espèces dominantes comme celles présentes dans au moins 10 % des relevés de végétation dont la couverture est > 30 %. Cependant, l'une des principales limites de notre jeu de données reposait sur la variabilité du nombre de relevés identifiés pour chaque habitat. De ce fait, de nombreux habitats ont été caractérisés par seulement quelques relevés (voir uniquement un seul) ne représentant pas nécessairement la variabilité de la composition floristique qui peut être observée sur le terrain. Afin d'établir des listes d'espèces caractéristiques plus justes, des améliorations ont été apportées pour certains habitats sur la base de nos connaissances et des données de la littérature.

Écologie : Les diagrammes synthétisant les optimums écologiques des habitats sont présentés pour les facteurs 'Salinité', 'Humidité', 'Acidité', 'Trophie' et 'Lumière' calculés à partir des valeurs indicatrices des espèces végétales (Annexe 04).

Confusions possibles avec d'autres habitats : Certains habitats possèdent une proximité physiologique et une part de leur cortège floristique en commun ce qui implique parfois des confusions qui sont indiquées dans cette section.

Dynamique et contacts de l'habitat : La dynamique naturelle progressive (en l'absence d'interventions anthropiques), les stades dynamiques et la dynamique en lien avec la gestion sont indiquées. Les contacts topographiques principaux, en contacts dynamiques ou en mosaïque ont également été renseignés.

Valeur écologique et biologique / Intérêt patrimonial : L'intérêt patrimonial est évalué à partir de plusieurs critères : (1) la liste rouge européenne des habitats (Gubbay et al. 2016; Janssen et al. 2016) ; (2) les espèces végétales relevant de la DHFF (European Commission 1992) ; (3) les espèces végétales protégées au niveau régional (arrêté du 25 janvier 1993) et national (arrêté etdu 20 janvier 1982) ; et (4) les espèces considérées comme menacées (VU, EN et CR) d'après les évaluations UICN régionale (Dortel et al. 2015) et nationale (UICN France et al. 2018).

Atteintes et menaces au maintien de l'habitat sur le site : Cette section a pour objectif de renseigner la sensibilité des habitats aux impacts d'origine anthropique (fréquentation, pollution, déstructuration des sols, etc...). Elle intègre également une liste des espèces exotiques envahissantes (Dortel & Geslin 2016) associées à l'habitat, définie à partir de l'analyse des relevés phytosociologiques et des observations de terrain.

Gestion : Des commentaires concernant les orientations de gestion conservatoire spécifiques à l'habitat élémentaire sont mentionnées dans cette section.

Localisation et surface sur le site Natura 2000 : Une carte représentant les localisations des relevés phytosociologiques qui ont permis de caractériser l'habitat est présenté. Elle s'accompagne d'une représentation des secteurs ou l'habitat a été cartographiés par télédétection (avec une représentation en présence / absence au sein de mailles de 1x1 km - Grille L93_1X1 de l'INPN).

Relevés phytosociologiques de références : Cette information est retranscrite sous la forme d'un tableau comprenant des relevés phytosociologiques du site Natura 2000, typiques de la variabilité floristique de l'habitat élémentaire.

Illustrations : Des photographies de l'habitat élémentaire sont exposées.

Références : Les références bibliographiques utilisées comme source d'information pour rédiger la fiche de l'habitat élémentaire sont listées par ordre chronologique.

La notion d'état de conservation de l'habitat n'est pas abordée dans ces fiches pour plusieurs raisons : (1) l'absence d'une démarche méthodologique standardisée relative à la mise en œuvre de la DHFF à l'échelle des sites Natura 2000 ; (2) le manque de clarté sur le concept d'état de référence ; (2) l'hétérogénéité des données disponibles selon les habitats à l'échelle du site Natura 2000 de l'estuaire de la Loire ;

1330-5 "Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée"



Correspondances typologiques :

EUNIS :

- A2.51 - Laises des marais salés

CORINE Biotopes :

- 15.3 - Prés salés atlantiques

Phytosociologie :

- *Agropyron pungentis* Géhu 1968
 - *Atriplici hastatae* - *Agropyretum pungentis* Beeftink & Westhoff 1962
 - *Beto maritimae*-*Agropyretum pungentis* (Arènes 1933) Corillion 1963
 - *Agropyro pungentis* - *Althaeetum officinalis* Géhu & Géhu-Franck 1976
 - *Minuartio peploidis* - *Agropyretum acuti* Tüxen 1957
- *Atriplicion littoralis* Nordhagen 1940 *
 - *Atriplicetum littoralis* (Christiansen 1933) Tüxen 1937

*Selon l'actualisation des interprétations des Cahiers d'habitats (Gaudillat et al. 2018), les communautés végétales de l'*Atriplicion littoralis* ne se rattachent plus à l'habitat d'intérêt communautaire 1210 'végétation annuelle des laises de mer' qui se trouve spécifiquement sur graviers. Ces végétations sont désormais rattachées à l'habitat 1330 'Prés salés atlantiques (*Glauco-Puccinellietalia maritimae*)' sans précision de rattachement vers un habitat décliné ; nous faisons le choix de rapprocher ces végétations de l'habitat décliné 1330-5 'Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée'.

Type de logique d'identification :

Habitat à logique 'végétation' + Habitat à logique 'mixte'.

Description de l'habitat :

L'habitat correspond aux communautés végétales halonitrophiles se développant sur les zones enrichies en matériaux organiques (laisses de mer) des prés salés. Il se présente le plus souvent sous la forme d'une frange linéaire correspondant à la limite supérieure de l'influence des grandes marées.

Variabilité :

L'habitat est caractérisé sur le site Natura 2000 par deux communautés végétales en lien dynamique :

- Une végétation annuelle, ouverte à dense, relativement haute (atteignant 1 m), généralement peu diversifiée et notamment caractérisées par l'Arroche littorale (*Atriplex littoralis*), correspondant à l'alliance phytosociologique de l'*Atriplicion littoralis*. Cette végétation correspond à la forme pionnière de l'habitat se développant sur les débris animaux et végétaux en décomposition déposés par les marées.
- Une végétation vivace herbacée haute de type prairial, reconnaissable par la couleur verte glauque du Chiendent du littoral (*Elytrigia acuta*) dont le recouvrement est le plus souvent très important. Cette végétation appartient à l'alliance phytosociologique de l'*Agropyron pungentis*, correspondant à la prairie nitrophile des hauts de marais salés. Elle succède à la végétation annuelle de l'*Atriplicion littoralis* en l'absence de perturbations régulières par les dépôts de laisses de mer.

Le lien dynamique entre ces deux communautés végétales est entretenu par un cycle régulier de dépôt de laisses de mer qui étouffent les groupements à chiendents (*Agropyron pungentis*) permettant la colonisation par la végétation pionnière de l'*Atriplicion littoralis* puis la reconstitution de la prairie à chiendents.

Période optimale d'observation :

La période optimale d'observation pour la prairie à Chiendent du littoral a lieu de juin à juillet tandis que l'identification de l'*Atriplicion littoralis* s'effectue à la fin de l'été, au moment de la fructification des arroches (le fruit étant indispensable à une détermination précise du taxon).

Espèces caractéristiques :

Espèces diagnostiques : *Elytrigia acuta*, *Beta vulgaris* ssp. *maritima*, *Atriplex littoralis*, *Atriplex prostrata*, *Atriplex longipes*, *Atriplex x gustafssoniana*, *Salsola soda*, *Sonchus arvensis*, *Elytrigia x duvalii* (Loret & Barrandon) B.Bock [*Elytrigia acuta* (DC.) Tzvelev x *Elytrigia juncea* (L.) Nevski]

Espèces constantes : *Elytrigia acuta*, *Atriplex prostrata*.

Espèces dominantes : *Elytrigia acuta*, *Elytrigia x duvalii*, *Atriplex littoralis*

Ecologie :

Salinité	0	1	2	3	4	5	6	7	8
	∅		Oligohalins		Mesohalins		Polyhalins		
Humidité	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Mésoxérophiles		Hygrophiles		Amphibies		Aquatique		
Acidité	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Acidophiles		Intermédiaires				Basophiles		
Trophie	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Oligotrophiles		Mésotrophiles				Eutrophiles		
Luminosité	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Sciaphiles		intermédiaires				héliophiles		

Confusions possibles avec d'autres habitats :

La forme pionnière de l'habitat (*Atriplicion littoralis*) peut être confondue avec les communautés des hauts de plages de l'*Atriplici laciniatae* - *Salsolion kali* correspondant à l'habitat d'intérêt communautaire 2110-1 'Dunes mobiles embryonnaires atlantiques'. Outre leur distinction phytosociologique, ces deux habitats se différencient selon leur contexte stationnel.

Contexte stationnel	Rattachement à suivre
Prés salés (limite supérieure mais aussi bords des chenaux du schorre qui sillonnent les estuaires) ou plages vertes	1330-5 'Prairies hautes des niveaux supérieurs atteints par la marée'
Hauts de plages de sable, dunes embryonnaires, bancs coquilliers	2110-1 'Dunes mobiles embryonnaires atlantiques'

Dynamique et contacts de l'habitat :

Dynamique spontanée relativement faible.

Certaines communautés monospécifiques à Chiendents (*Agropyron pungentis*) ont tendance à s'étirer et à occuper aujourd'hui des surfaces plus importantes, lié à l'avantage compétitif d'*Elytrigia acuta* sur *Agrostis stolonifera*, notamment après l'arrêt du pâturage. Ces

communautés végétales tendent également à envahir les fonds d'estuaire en voie de colmatage rapide, suite aux perturbations engendrées par les aménagements côtiers (digues, épis, enrochements, etc.).

Habitats en contact :

- Habitats EUR.28 :
 - 1310-1 "Salicorniaies des bas niveaux (haute slikke atlantique)"
 - 1310-2 "Salicorniaies des hauts niveaux (schorre atlantique)"
 - 1330-1 "Prés salés du bas schorre"
 - 1330-2 "Prés salés du schorre moyen"
 - 1330-3 "Prés salés du haut schorre"
 - 1410-3 "Prairies subhalophiles thermo-atlantiques"
- Habitats EUNIS :
 - C3.21 - Phragmitaies à *Phragmites australis*
 - C3.27 - Formations halophiles à *Scirpus*, *Bolboschoenus* et *Schoenoplectus*
 - E3.44 - Gazons inondés et communautés apparentées
 - E5.1 - Végétations herbacées anthropiques

Valeur écologique et biologique / Intérêt patrimonial :

Cet habitat est assez fréquent sur le littoral atlantique français, mais considéré comme rare dans la région Pays de la Loire.

LR européenne : A2.5c – quasi-menacés (NT)

Espèces végétales à forte valeur patrimoniale :

Nom latin	Nom vernaculaire	DHFF	Prot. PdL	Prot. Nat.	UICN PdL	UICN Nat.
<i>Atriplex longipes</i>	Arroche à long pédoncule	-	-	Nat. 1*	-	-
<i>Oenanthe lachenalii</i>	Oenanthe de lachenal	-	-	-	NT**	-

*Taxon inscrit à l'article 1 de la liste nationale des espèces protégées

** Taxon inscrit à la liste rouge IUCN Pays de la Loire NT : Quasi-menacé

Atteintes et menaces au maintien de l'habitat sur le site :

L'habitat est sensible à une certaine forme de rudéralisation, lié à l'apport par les marées de déchets d'origine anthropique ou en cas de fréquentations importantes par les oiseaux (colonies de goélands). Ce phénomène peut conduire à une évolution de l'habitat vers des friches nitrophiles (habitat EUNIS E5.1) et peut favoriser l'installation d'espèces invasives.

L'habitat peut être menacé par des périodes et des chargements de pâturage parfois non adaptés aux conditions du milieu entraînant une déstructuration des sols (habitat sensible au piétinement). Les autres atteintes possibles sont liées à des destructions directes de l'habitat par des dépôts des boues de curage en haut de berge, la construction de digues ou par des pollutions accidentelles du fleuve.

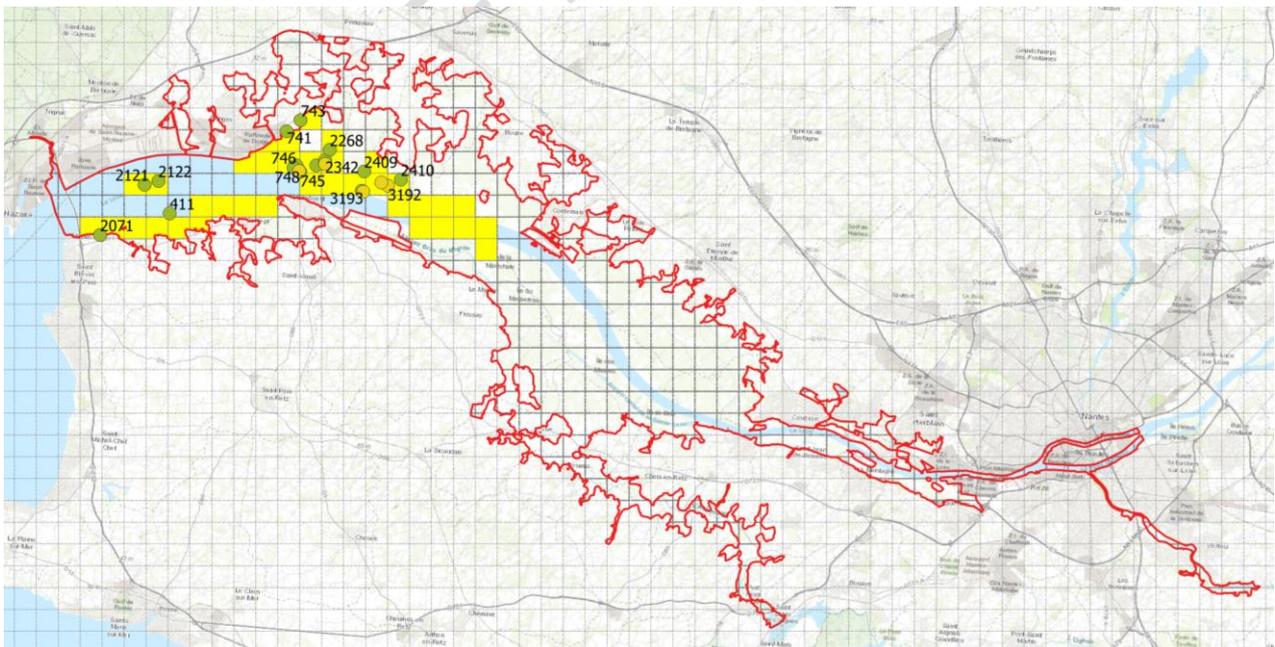
Espèces végétales invasives :

Nom latin	Nom vernaculaire	Inv. PdL
<i>Senecio inaequidens</i>	Séneçon du Cap	IP2
<i>Datura stramonium</i>	Datura officinal	AS6
<i>Dysphania ambrosioides</i>	Chénopode fausse-ambrosie	AS5
<i>Erigeron floribundus</i>	Vergerette à fleurs nombreuses	AS2

Gestion :

La gestion de cette végétation doit s'envisager dans le cadre général de l'évolution géomorphologique côtière et des politiques globales de conservation du littoral. Il faut veiller à limiter les modifications des phénomènes sédimentaires liées à des travaux d'aménagements. D'une manière générale, la non-intervention est souhaitable pour ce type d'habitat. Cependant, un nettoyage sélectif, orienté sur les déchets d'origine anthropique, serait favorable à une meilleure expression des communautés.

Localisation sur le site Natura 2000 :



Relevés phytosociologiques de références :

Número de relevé	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
Date	02/10/2019	23/07/2019	2001	09/07/2015	2010	03/09/2008	2010	2010	09/07/2015	08/07/2015	03/07/2008	2014	08/07/2015	2014	21/06/2018	2010	2010	2014	20/05/2008	2014	08/07/2015	2014	16/10/2012	02/10/2019	23/07/2014	2014	
N° du tableau dans la publication d'origine			5																								
N° du relevé dans la publication d'origine	9	2	4	17	7		28	8	10	17	15	56	11	55	6	13	21	42	5.1	52	6	60	1	10	72	49	
Surface du relevé (m2)	30				25		30	15								25	10							4	40	15	
Recouvrement (%)	60				100	100	100	100								100	90		100					90	100	100	
strate																											
<i>Atriplex littoralis</i>	h	3	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Salsola soda</i>	h	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Elytrigia acuta</i>	h	.	4	3	5	5	5	5	5	5	5	3	5	5	4	5	5	4	5	3	5	4	4	4	5	5	3
<i>Atriplex prostrata</i>	h	.	1	.	.	1	+	.	+	+	.	.	.	.	+	1	.	.	.	.	1	.	r	1	.	.	
<i>Atriplex x gustafssoniana</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.
<i>Atriplex longipes</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	+	.	.	.
<i>Althaea officinalis</i>	h	.	+	.	.	.	+	.	.	.	+	1	.	.	+	.	.	1	.	.	.	+	.	.	.	.	.
<i>Beta vulgaris s. maritima</i>	h	.	1	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	+	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Suaeda maritima</i>	h	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.
<i>Triplolium pannonicum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	1	.	.	.	+	.	.
<i>Lysimachia maritima</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Oenanthe lachenalii</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Phragmites australis</i>	h	.	+	.	.	.	1	.	+	+	.	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	+	
<i>Bolboschoenus maritimus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	+	.	1	+	.	.	.	.	.
<i>Festuca rubra s. litoralis</i>	h	.	1	.	.	.	.	.	.	.	2	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Agrostis stolonifera</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	2	+	.	3	.	.	3	.	1	.	.	1	.	.	.	.
<i>Cirsium arvense</i>	h	.	.	1	1	2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Lolium perenne</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	+	2	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Hordeum marinum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2	.	+	.	.	2	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Convolvulus sepium</i>	h	.	.	+	2	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Juncus gerardi</i>	h	.	3	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sonchus arvensis</i>	h	.	.	.	.	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.	.	.
<i>Alopecurus pratensis</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Chenopodium album</i>	h	2	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Lactuca serriola</i>	h	.	+	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Parapholis strigosa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Carex otrubae</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1
<i>Senecio inaequidens</i>	h	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Rumex conglomeratus</i>	h	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Carex divisa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Datura stramonium</i>	h	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Elytrigia repens</i>	h	.	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Tripleurospermum maritimum</i>	h	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Bidens species</i>	h	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Tripleurospermum inodorum</i>	h	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Dysphania ambrosioides</i>	h	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sonchus oleraceus</i>	h	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Convolvulus species</i>	h	.	.	.	.	.	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Schedonorus arundinaceus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	2
<i>Pulicaria dysenterica</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Vicia sativa</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+
<i>Trifolium arvense</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Plantago coronopus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Trifolium micranthum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Plantago lanceolata</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Eryngium campestre</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Trifolium squamosum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Rumex crispus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Centaurium erythraea</i>	h	.	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cirsium vulgare</i>	h	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Solanum dulcamara</i>	h	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Silene latifolia s. alba</i>	h	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Sonchus asper</i>	h	.	+	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Festuca rubra</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.	.	.	.	.	.
<i>Poa species</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Dipsacus fullonum</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
<i>Cynodon dactylon</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	.
<i>Erigeron floribundus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	r	.
<i>Juncus maritimus</i>	h	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	+

n°1 : 24; Le Dez M., Citoleux J., Guittou H. (2019). Relevé de terrain - Thèse: Cartographie de la végétation par télédétection de l'estuaire de la Loire.

n°2: Le Dez M., Guittou H., Moré F. (2019). Relevé de terrain - Thèse: Cartographie de la végétation par télédétection de l'estuaire de la Loire.

n°3: Lebert, S. (2001). Etude de la végétation et des habitats d'intérêt communautaire de la Loire en aval d'Ancenis, en relation avec la dynamique estuarienne. Rapport DESS Université François Rabelais: GIP Loire Estuaire. 101 p.

n°4 : 9 ; 10 ; 13 ; 21; Le Dez M., Sawitschuk J., Bioret F. (2017). Les prairies de l'estuaire de la Loire : étude de la dynamique de la végétation de 1982 à 2014. Mappemonde, 119 (2017.1)

n°5 : 7 ; 8 ; 16 ; 17: Biotopie. (2010). Acquisition et analyse de données sur la flore et les habitats floristiques de l'estuaire de la Loire entre Donges et Lavau-sur-Loire. GIP Loire Estuaire, 47 p.

n°6 : 11 ; 19 ; 23: Ouest Am'. (2015). Dossier de demande de dérogation relatif aux espèces et habitats d'espèces protégées - Volet FLORE. Dossier de viabilisation du site du Carnet. GPMNSN, 114p.

n°12 ; 14 ; 18 ; 20 ; 22 ; 26: Ouest Am'. (2014). Suivis faunistiques et floristiques sur le site de Donges-Est 2013-2014. GPMNSN, 249p.

n°15: Le Dez M. (2019). Relevé de terrain - Thèse: Cartographie de la végétation par télédétection de l'estuaire de la Loire.

n°25: CBN de Brest. Base de données de relevés phytosociologiques du Conservatoire Botanique National de Brest

Illustrations :



Atriplicion littoralis – La Maison Verte, Corsept

© Mathieu Le Dez



Agropyron pungentis – Ile Chevalier, Donges

© Mathieu Le Dez



Agropyron pungentis – Ile Chevalier, Donges

© Mathieu Le Dez



Agropyron pungentis – Dune de l'Imperlay, Saint-Brevin-les-Pins

© Mathieu Le Dez

Références :

Amiaud B, Touzard B, Bonis A, Bouzillé JB (2008) After grazing exclusion, is there any modification of strategy for two guerrilla species: *Elymus repens* (L.) Gould and *Agrostis stolonifera* (L.)?. *Plant Ecology*, 197(1), 107-117.

Bensettiti F, Bioret F, Roland J, et al (2004) Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire. Tome 2 : Habitats côtiers. Paris : La Documentation Française. 399 p.

Biotope (2007) Document d'objectifs des sites Natura 2000 FR5200621 et FR52101103 "Estuaire de la Loire". Biotope Agence Loire-Bretagne, DIREN Pays-de-la-Loire. 370p.

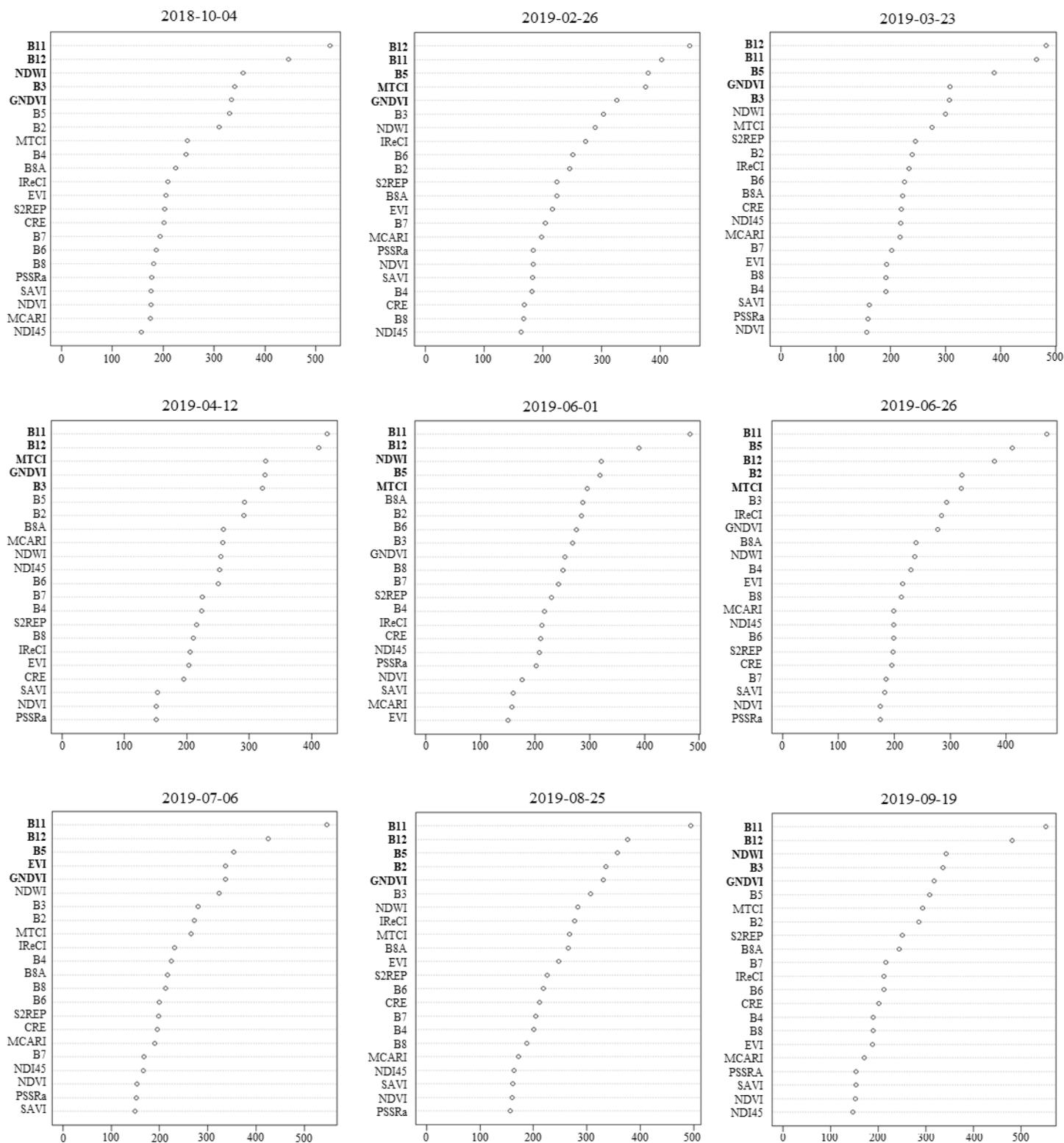
Delassus L (2009) Caractérisation des végétations de marais salés de Basse-Normandie. DIREN Basse-Normandie. Villers-Bocage : Conservatoire botanique national de Brest, 90 p.

Gaillardat V, Argagnon O, Bensettiti F, et al (2018) Habitats d'intérêt communautaire : actualisation des interprétations des Cahiers d'habitats. Version 1, mars 2018. Rapport UMS PatriNat 2017-104. UMS PatriNat, FCBN, MTES, Paris, 62 p

Guillon H (2019) Catalogue préliminaire des groupements végétaux de Loire-Atlantique. Version 1.0. Agence française pour la biodiversité. Nantes : Conservatoire botanique national de Brest, 270 p.

Guillon H, Thomassin G (2016) Guide de reconnaissance des groupements végétaux des zones humides et aquatiques en Pays de la Loire. Clé de détermination des alliances de zones humides et aquatiques en Pays de la Loire. Agence de l'eau Loire Bretagne / Conseil Régional des Pays de la Loire. Nantes : Conservatoire botanique national de Brest. 48 p.

Annexe 06. Mesures MDG obtenues après les 9 classifications individuelles d'images Sentinel-2. Les 5 variables les plus contributives, qui ont été retenues pour constituer l'ensemble de données multi-dates, sont marquées en gras



Annexe 07. Questionnaire utilisé pour l'enquête sur les usages et les besoins des cartographies de végétation auprès des professionnels de l'estuaire de la Loire

Analyse des usages de la cartographie de la flore, de la végétation et des habitats dans l'estuaire de la Loire entre Nantes et Saint-Nazaire

La fonction première du Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire (GIP LE) est d'améliorer la compréhension globale de la complexité du fonctionnement environnemental de la Loire, de la Maine à la mer. Cette compréhension est basée sur la construction de suivis sur le long terme, indispensables pour caractériser un milieu dynamique. Elle implique l'acquisition, la mutualisation, la valorisation et la diffusion de données environnementales, l'animation d'un réseau de partenaires, le développement de l'expertise et la transmission des savoirs. Riches d'une approche systémique, les productions intégrées, données, outils, sont mis à disposition de tous ses membres, afin d'accompagner leurs projets en lien avec la Loire.

Parmi ces données environnementales, celles sur la flore, la végétation et les habitats sont régulièrement mobilisées par les acteurs du territoire. Le GIP Loire Estuaire est ainsi régulièrement sollicité pour mettre à disposition ses données sur la flore, la végétation et les habitats (données SIG, rapports d'études, cartes) ou pour fournir des renseignements sur les acquisitions d'autres producteurs de données, que le GIP LE invite à contacter.

Aussi, analyser comment sont utilisées ces données, et dans quel(s) but(s), pourrait permettre à terme de favoriser le partage et la valorisation de celles-ci, afin d'optimiser leur capacité d'information pour tous les acteurs du territoire. Cette analyse permettra également de constituer une évaluation de l'intérêt de la cartographie de la flore, de la végétation et des habitats par les différents acteurs du territoire, et ainsi révéler la valeur apportée par ce type de document. Les résultats pourraient être utilisés pour estimer et orienter les moyens nécessaires à la production et la valorisation de ces cartographies.

Cette analyse est conduite à l'échelle de la vallée alluviale entre Nantes et Saint-Nazaire, soit globalement sur l'emprise du site Natura 2000 « Estuaire de la Loire » (fig.1).

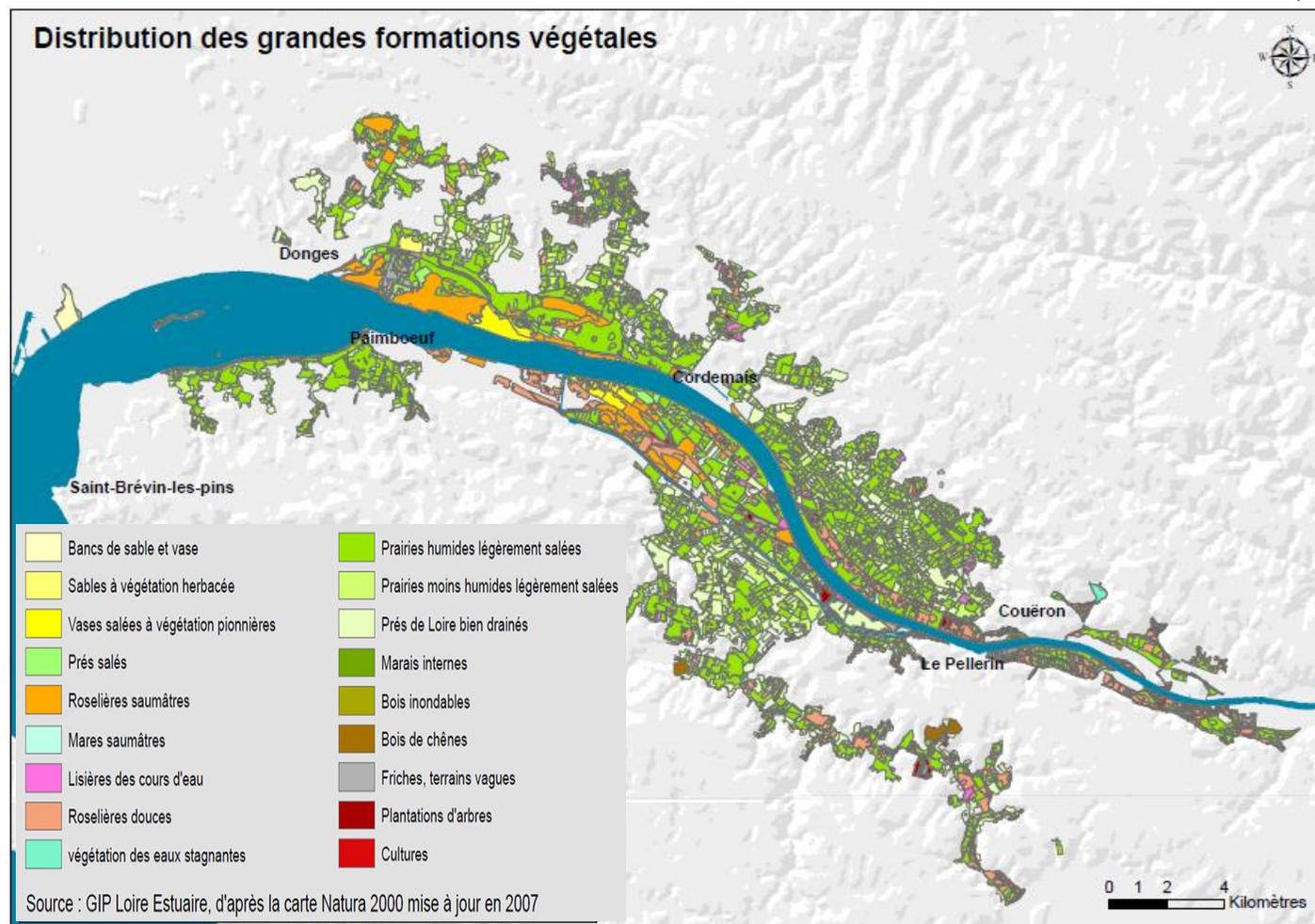


Figure 1 Exemple de cartographie de la végétation dressée sur le périmètre Natura 2000 Estuaire de la Loire

En effet, en 2001 et 2002, le GIP Loire Estuaire a été missionné pour réaliser la première cartographie de la flore et des habitats d'intérêt communautaire du site Natura 2000. Le GIP LE a conduit cette étude assisté d'un comité d'experts, avec un co-financement DREAL Pays de la Loire / GIP LE.

Au-delà de la cartographie Natura 2000, de nombreuses études ont été menées sur la flore, la végétation et les habitats de l'estuaire de la Loire depuis les années 1960, et ce à différentes échelles. Elles ont été réalisées à diverses fins, pour certaines dans un objectif de connaissance, pour d'autres de plans de gestion des milieux naturels et des espèces, ou encore dans la perspective de projets d'aménagement, etc. Ces études ont conduit à la production de données. Parallèlement, d'autres études remobilisant ces dernières, les complétant parfois, selon les objectifs attendus, ont également été menées.

Le renseignement du questionnaire ci-après permettra de recueillir vos pratiques concernant l'utilisation des données sur la flore, la végétation et les habitats (durée estimée : environ 45 minutes).

Les résultats seront présentés dans le cadre d'un atelier début juin 2019 (date à confirmer) à Nantes, auquel vous serez convié.

Date limite de remise du questionnaire renseigné : **lundi 27 mai 2019**.

Pour toute question ou pour renvoyer le questionnaire, nous vous invitons à contacter Valentin URVOIS par mail à l'adresse suivante :

valentin.urvois@loire-estuaire.org

Quelques définitions avant de commencer à renseigner le questionnaire

Afin de limiter les risques de confusions, voici un glossaire précisant certains termes utilisés dans le questionnaire :

Données : désigne conjointement les données brutes et les données élaborées, portant sur les données de végétation, regroupant la flore (ensemble des espèces végétales d'une zone délimitée), la végétation (ensemble d'espèces formant une entité) et les habitats (milieux formés d'un ensemble d'espèces végétales qui abritent une faune spécifique).

Données brutes : données non mises en forme, par exemple la base de données contenant les relevés floristiques de terrain.

Données élaborées : données mises en forme et non modifiables, par exemple sous forme de carte, de graphique.

Géomatique « classique » : utilisation dans un logiciel de SIG de données acquises sur le terrain.

Téledétection ou Photo-interprétation : regroupe l'ensemble des techniques permettant d'obtenir des informations (ici sur la végétation) sans aller sur le terrain (utilisation d'images satellites ou bien d'orthophotographies).

1. Vous exercez dans une structure :

- privée (préciser)
- publique (préciser)

Précisions :

2. Vous utilisez les données de végétation dans le cadre :

- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> action de communication | <input type="checkbox"/> aménagement/urbanisme |
| <input type="checkbox"/> connaissance/recherche | <input type="checkbox"/> éducation à l'environnement |
| <input type="checkbox"/> étude d'impact/d'incidence/
dossier réglementaire/expertise | <input type="checkbox"/> gestion d'espaces naturels |

Exemples que vous souhaiteriez citer :

3. Vous travaillez sur l'emprise :

- régionale des Pays de la Loire ou plus étendue
- de l'estuaire de la Loire entre Nantes et Saint-Nazaire (Périmètre Natura 2000, fig.1)
- d'une partie de l'estuaire de la Loire entre Nantes et Saint-Nazaire (Pointer la _____ ou les zones sur la carte ci-dessous)
 - rive nord
 - rive sud

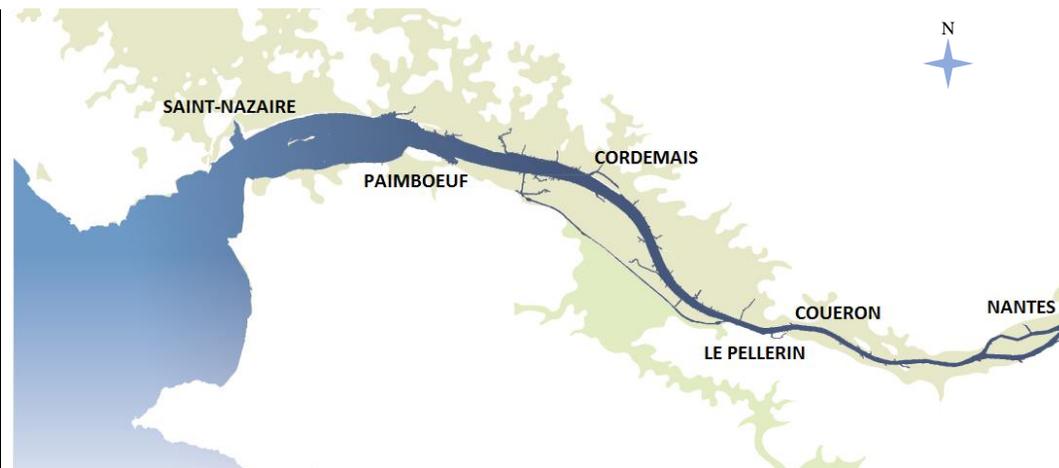


Figure 2 Carte de la vallée alluviale de l'estuaire de la Loire entre Nantes et Saint-Nazaire

4. Vous ciblez les (cf. fig3) :

- | | | |
|---|--|--|
| <input type="checkbox"/> milieux aquatiques | <input type="checkbox"/> prairies humides | <input type="checkbox"/> prés de Loire |
| <input type="checkbox"/> roselières | <input type="checkbox"/> végétations de marais | |
| <input type="checkbox"/> tous les milieux | | |

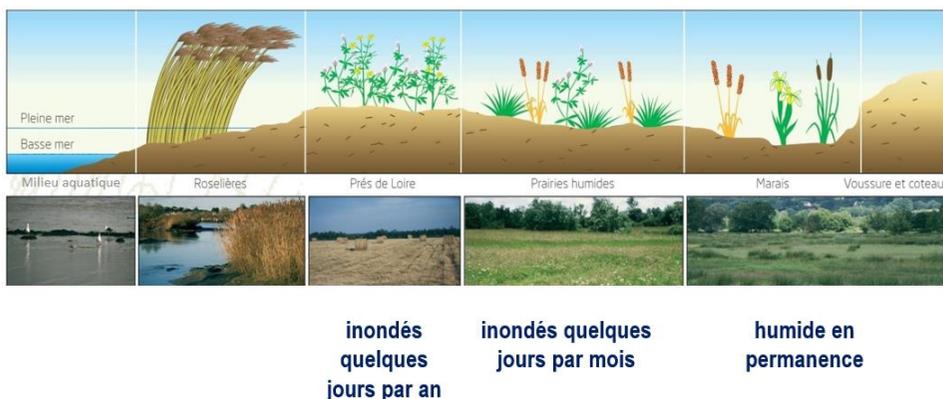


Figure 3 Coupe transversale schématique des milieux, de la berge au coteau, dans l'estuaire de la Loire

5. Vous :

- produisez des données (acquisition de relevés de terrain)
- traitez des données (traitement sous SIG, base Access, Excel, etc.)
- analysez des données (interprétation, expertise)
- autre (préciser)

Précisions :

6. Dans le cas où vous produisez des données :

- Est-ce :

- une réalisation interne
- une réalisation externe

- Si réalisation interne, pour qui :

- vos propres besoins
- les besoins d'un commanditaire

- Si réalisation externe, par qui :

- association
- acteurs nationaux (IGN, etc.)
- acteurs locaux (Collectivités, etc.)
- bureau d'étude
- autre (préciser)

Précisions :

- Avant d'acquérir vos propres données, vous êtes-vous renseigné sur l'existence de données pouvant répondre à vos besoins ?

- oui
- non

Si oui, comment avez-vous réalisé vos recherches ?

- bibliographie
- recherche internet
- recherche sur des plateformes spécialisées
- contact de producteurs potentiels
- autre (préciser)

Précisions :

Si non, pourquoi ?

- manque de temps
- pas formé aux outils de recherche
- données pas encore diffusables

- Vous êtes-vous renseigné auprès du GIP Loire Estuaire ?

- oui
- non

Pourquoi ?

7. Vous utilisez :

- les données produites par votre structure
- les données produites hors de votre structure (par d'autres producteurs)
- les deux

8. Dans le cas où vous réutilisez des données produites hors de votre structure (par un tiers)

- Comment avez-vous eu connaissance de l'existence des données ?

- bibliographie
- recherche sur des plateformes spécialisées
- autre (préciser)
- recherche internet
- contact de producteurs potentiels

Précisions :

Si recherche sur une plateforme, laquelle :

- Biodiv' Pays de Loire
- eCalluna (CBNB)
- Geo Data Gouv/Data Gouv
- Géoportail GIP LE
- SIGLOIRE
- Autre (préciser)
- Carmen
- Géocatalogue
- GEOPAL
- INPN (MNHN)
- Tela Botanica

Précisions :

Si demande à un producteur, lequel ?

- Vous êtes-vous renseigné auprès du GIP Loire Estuaire ?

- oui
- non

Pourquoi ?

- Comment avez-vous obtenu les données ?

- téléchargement sur une plateforme de partage de l'information géographique
- demande à un producteur de données ? Si oui, préciser les organismes contactés

Précisions :

Si téléchargement sur une plateforme, laquelle :

- Carmen Géocatalogue
- Geo Data Gouv/Data Gouv GEOPAL
- Géoportail GIP LE SIGLOIRE
- Autre (préciser)

Précisions :

- Quelles ont été les modalités d'échanges pour leur obtention ?

- convention de partenariat libre de droit
- payant réseau professionnel
- autre (préciser)

Précisions :

9. Votre structure est :

- producteur de données utilisateur de données (traite et analyse)
- les deux

10. Vous avez besoin de données :

- récentes (– de 3 ans) anciennes les deux

Quelle ancienneté convient ?

11. Vous les utilisez dans un objectif de suivi :

- oui non

Si oui, quelle est la fréquence d'actualisation souhaitée ?

- 1 à 3 ans 5 ans 10 ans autre (préciser)

Précisions :

12. Si vous traitez ou analysez des données, vous utilisez :

- la télédétection ou photo-interprétation la géomatique « classique »
- les deux ne sait pas

13. Vous utilisez des données brutes (SIG) :

- oui non

Si oui, sous quel format (voir fig.4) :

- vecteur (.shp, .kml)
- raster (.ecw, .geo tiff)
- tableur (.xls, .csv)
- autre (préciser)

Précisions :

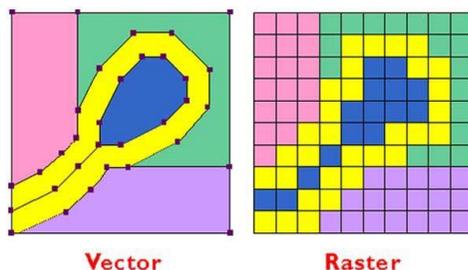


Figure 4 Différence entre le format vecteur (vector) et le format raster

14. Vous utilisez des données élaborées (carte thématique) :

- oui
- non

Si oui, sous quel format :

- papier (carte ancienne non numérisée, publications GIP LE, etc.)
- numérique (PDF, TIFF, JPEG)
- autre (préciser)

Précisions :

15. Vous utilisez des :

- données ponctuelles (points)
- données surfaciques (polygones)
- images satellites/orthophotographies
- illustrations (photographies de

- autre type de données paysage...
(anciennes photographies, cartes postales, etc.)
- aucune

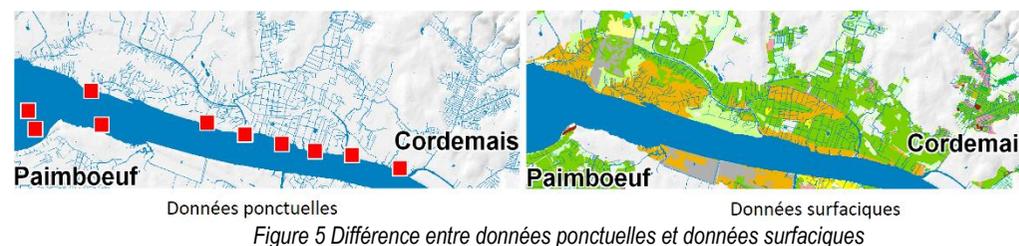


Figure 5 Différence entre données ponctuelles et données surfaciques

16. Vous utilisez la typologie : (si vous en utilisez plusieurs, hiérarchisez si possible avec 1 pour la plus utilisée)

- CORINE Biotopes (préciser le niveau de finesse)
- CORINE Land Cover - Occupation des sols (préciser le niveau de finesse : classe 1 à 5)
- EUNIS (préciser le niveau de finesse)
- Natura 2000 (préciser le niveau de finesse, habitat générique ou décliné)
- Phytosociologique (préciser le niveau de finesse : Alliance, Association, etc.)
- Autre (préciser)

Précisions :

17. Vous restituez les données sous forme de :

- cartes
- graphique (courbe, histogramme, camembert, etc.)
- infographie (statistiques sous forme très visuelle)
- tableau

18. Vous utilisez une échelle cartographique :

- très fine (1/1 000^e) fine (1/5 000^e)
- moyenne (1/25 000^e) grossière (1/50 000^e)

19. Vos données de végétation sont diffusables :

- oui non

Si non, pourquoi ?

Si oui :

- Quelles sont les modalités de diffusion ?

- convention de partenariat libre de droit
- payant réseau de connaissances
- autre (préciser)

Précisions :

Utilisez-vous des licences ?

- oui non

Si oui lesquelles ?

- ODBL Licence ouverte
- Creative commons

20. Vous verriez un intérêt à ce que les données de végétation soient mises en ligne sur une plateforme de consultation ou téléchargement de données :

- oui non

Si non, pourquoi ?

Si oui, sur quelle plateforme ?

Si oui, souhaiteriez-vous que les données soient:

- en accès public (donnée la plus fine possible)
- en accès public (donnée moins fine, ex localisation par maille au lieu de stationnelle)
- en accès restreint

21. Vous apprécieriez d'avoir un standard de base de données à renseigner lors des inventaires végétation, afin de normaliser les informations récoltées :

oui non

Si non, pourquoi ?

Si oui, seriez-vous prêt à l'utiliser ?

oui non

Si non, pourquoi ?

22. Souhaitez-vous apporter d'autres éléments complémentaires ?

Vos coordonnées

- Nom :

- Prénom :

- Organisme :

- Fonction :

- Coordonnées :

Accepteriez-vous que le contenu de ce questionnaire soit diffusé nominativement ?

Oui

Non

Nous vous remercions de votre participation et du temps consacré au renseignement de ce questionnaire à adresser à valentin.urvois@loire-estuaire.org

Annexe 08. Liste des organismes contactés dans le cadre de l'enquête sur les usages et les besoins des cartographies de végétation auprès des professionnels de l'estuaire de la Loire (ceux ayant répondu sont en gras, et ceux rencontrés en entretien marqués d'un astérisque)

Association pour la Connaissance et la Recherche Ornithologique Loire et Atlantique (ACROLA)*	Direction départementale des territoires et de la mer (DDTM) Loire-Atlantique*
Agence de l'Eau Loire-Bretagne (AELB)	Conseil départemental de Loire-Atlantique*
Agence D'urbanisme De la Région de Saint-Nazaire (ADDRN)	Directions Régionales de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Pays de la Loire*
Agence Française pour la Biodiversité (AFB)	Ecopôle
Association des Industriels de Loire Estuaire (AILE) - EDF*	Terminal méthanier ELENGY
Amicale des Chasseurs du Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire	Estuarium
Artelia*	Fédération Départementale des Chasseurs de Loire-Atlantique
Association Connaissance et Recherche Ornithologique Loire-Atlantique	Fédération des Conservatoires d'Espaces Naturels (FCEN)
Association Hironnelle	Fédération Régionale de la Chasse (FRC)
Association Syndicale Autorisée des Quatre Iles	Forum des Marais Atlantiques
Biotope	France Nature Environnement (FNE) Pays de la Loire
Bretagne Vivante*	GIP Loire Estuaire*
Communauté d'Agglomération de la Région Nazairienne et de l'Estuaire (CARENE)*	GIP Seine-Aval - Agence Française pour la Biodiversité (AFB)
Conservatoire Botanique National de Brest (CBNB)*	Grand Port Maritime de Nantes-Saint-Nazaire (GPMNSN)*
Centre de documentation, de recherche et d'expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux (CEDRE)	Groupe d'étude des invertébrés armoricains (GRETIA)*
Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) Ouest	Groupe Mammalogique Breton (GMB)
Chambre d'agriculture de Loire-Atlantique	Groupement d'Intérêt Ecologique et Cynégétique
Communauté de communes Estuaire et Sillon*	Institut national de l'information géographique et forestière (IGN)
Communauté de communes Grandlieu	Le Quai Vert
Communauté de communes Sud Retz Atlantique	Le Voyage à Nantes
Commune de Corsept*	Ligue pour la protection des oiseaux (LPO) 44*
Conservatoire d'Espaces Naturels (CEN) des Pays de la Loire	Mairie de Bouée

Conservatoire du Littoral et des Rivages Lacustres	Mairie de Bouguenais
CPIE Loire Océane	Mairie de Brains
Conseil scientifique de l'estuaire de la Loire (CSEL)*	Mairie de Cheix en Retz
Mairie de Cordemais	Mairie d'Indre
Mairie de Couëron	Mairie du Pellerin
Mairie de Donges	Muséum d'Histoire Naturelle
Mairie de Frossay	Nantes Métropole*
Mairie de la Chapelle-Launay	Naval Group*
Mairie de La Montagne	Office de Tourisme de Paimboeuf
Mairie de Lavau-sur-Loire	Office de Tourisme de Saint-Brévin
Mairie de Malville	Office national de la chasse et de la faune sauvage (ONCFS)*
Mairie de Montoir-de-Bretagne	Ornithologue (expert indépendant)
Mairie de Nantes	Parc Naturel Régional de Brière
Mairie de Paimboeuf	Raffinerie TOTAL
Mairie de Port-Saint-Père	Région Centre - Val de Loire
Mairie de Prinquiau	Région des Pays de la Loire*
Mairie de Rezé	Syndicat intercommunal de chasse au gibier d'eau de la Basse Loire Nord (SICGEBLN)*
Mairie de Rouans	Société d'Aménagement de la Métropole Ouest Atlantique (SAMOA)
Mairie de Saint-Brévin-les-Pins	Syndicat d'Aménagement Hydraulique Sud-Loire
Mairie de Saint-Etienne-de-Montluc	Syndicat des Marais de Saint-Etienne-de-Montluc et de Couëron
Mairie de Saint-Herblain	Syndicat des marais estuariens de Cordemais
Mairie de Saint-Jean-de-Boiseau	Syndicat du Bassin Versant du Brivet
Mairie de Saint-léger-les-Vignes	Syndicat du marais des prés du Syl
Mairie de Saint-Nazaire	Syndicat Loire Aval (SYLOA)
Mairie de Saint-Père-en-Retz	Terres d'Estuaire
Mairie de Saint-Sébastien-sur-Loire	Union des Syndicats des Marais du Sud-Loire
Mairie de Saint-Viaud	Union Maritime Nantes Ports (UMNP)
Mairie de Savenay	Université de Rennes 1
Mairie de Vertou	Voies Navigables de France (VNF)
Mairie de Vue	YARA

Table des figures

Figure 1. Localisation de l'estuaire de la Loire.	14
Figure 2 : Cartographie des habitats d'intérêt communautaire du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire' réalisée en 2002 par le bureau d'étude Ouest Aménagement.....	17
Figure 3. Schéma du processus méthodologique utilisé pour établir la typologie des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'.....	27
Figure 4. Localisation des relevés phytosociologiques rassemblés dans la base de données de relevés du site d'étude et diagramme représentant le nombre de relevés effectués selon les années.....	30
Figure 5. Schéma de la démarche méthodologique adoptée pour élaborer le système expert des prairies humides de l'estuaire de la Loire.....	33
Figure 6. Matrices de confusion entre les données de référence (en ligne) et les prédictions du SE (en colonne) à l'échelle des associations végétales (a), des alliances (b) et des habitats (EUR28 et EUNS) (c).	38
Figure 7. Nombre de relevés assignés à un syntaxon (association végétale ou alliance) par le SE, en fonction du type de milieu.....	55
Figure 8. Répartition du nombre de relevés identifiés à l'échelle de l'association végétale (Asso.) et à l'échelle de l'alliance (All.) en fonction du type de milieu.....	56
Figure 9. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats littoraux.....	61
Figure 10. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats aquatiques.....	66
Figure 11. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats prairiaux.....	71
Figure 12. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats d'ourlets et de mégaphorbiaies.....	74
Figure 13. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats de roselières.....	79
Figure 14. Carte de la répartition des relevés rattachés aux habitats des fourrés et forêts.....	84
Figure 15. Exemple d'une cartographie produite par la méthode traditionnelle.....	111
Figure 16. Signature spectrale théorique d'une végétation saine dans les longueurs d'ondes du visible au moyen infrarouge.....	114
Figure 17. Illustration du fonctionnement d'un système LiDAR. Les retours d'onde des impulsions émises par le LiDAR permettent la production d'un nuage de points traduisant la structure 3D de la surface terrestre.....	115
Figure 18. Dates d'acquisition des images Sentinel-2 durant un cycle annuel de végétation.....	118
Figure 19. Photographie de l'avion lors du survol du site Natura 2000.....	121
Figure 20. Caractéristiques de la ligne de balayage de la caméra HySpex VNIR 1600.....	122
Figure 21. Plan de vol de la campagne aéroportée.....	122

Figure 22. Zoom de l'image VNIR sur un secteur de Couëron (a) pour la visualisation des signatures spectrales de 5 surfaces	126
Figure 23. Visualisation de l'effet de la 'correction rapide'	127
Figure 24. Visualisation de la 'correction rapide' sur l'ensemble de la zone	127
Figure 25. Fonctions de sensibilité des bandes du satellite Sentinel 2A	128
Figure 26. Compositions colorées construites à partir des données des caméras VNIR et SWIR	129
Figure 27. Représentation du MNT et du MNC à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude	131
Figure 28. Hauteur de la végétation	132
Figure 29. Retours d'onde LiDAR à 1 064 nm	133
Figure 30. Corrélation entre les largeurs de retours d'ondes et les hauteurs de végétations mesurées	133
Figure 31. Positionnement des bandes spectrales utilisées pour le calcul des indices hyperspectraux	136
Figure 32. Procédure méthodologique pour la sélection des ROIs	139
Figure 33. Illustration de la méthode utilisée pour la sélection des ROIs pour la classification des images aéroportées hyperspectrales et LiDAR.	141
Figure 34. Exemple de variations physiologiques visibles sur l'image hyperspectrale au sein d'une phragmitaie	141
Figure 35. Spectres de réflectance moyens pour les zones de <i>Phragmites australis</i> en pleine croissance et les 'phragmitaies sèches'	149
Figure 36. Indices de précision globale des classifications individuelles des images Sentinel-2 pour les 11 dates	157
Figure 37. Variations phénologiques saisonnières des variables les plus importantes pour la discrimination des habitats du site d'étude	159
Figure 38. Carte prédictive de la répartition des principaux habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire' issue de la classification de l'ensemble de données multi-dates	165
Figure 39. Proportion des différentes classes de PA et UA pour les trois tests.	171
Figure 40. Spectres de réflectance moyens pour le <i>Phragmitetum communis</i> , l' <i>Astero tripolii</i> – <i>Phragmitetum communis</i> et la Phragmitaie oligohaline	172
Figure 41. Spectres de réflectance moyens pour le <i>Carici divisae</i> – <i>Lolietum perennis</i> et le <i>Trifolio maritimi</i> – <i>Oenanthetum silaifoliae</i>	173
Figure 42. Spectres de réflectance moyens pour le <i>Glycerietum aquaticae</i> (courbe 1 – avec 11 ROIs et 6 118 pixels) et le <i>Scirpetum lacustris</i>	173
Figure 43. Contribution des différentes variables aux résultats des classifications Random Forest pour les trois ensembles de données Test 1, Test 2 et Test 3, selon la mesure de diminution moyenne de Gini	175

Figure 44. Carte prédictive de la répartition des habitats du site Natura 2000 ‘Estuaire de la Loire’ issue de la classification de l’image Test 3	185
Figure 45. Relation entre le nombre de zones d’entraînement et la précision du producteur (PA) pour les 39 habitats EUNIS cartographiés avec les images satellites Sentinel-2.....	188
Figure 46. Relation entre le nombre de zones d’entraînement et la précision du producteur (PA) pour les 78 habitats EUNIS cartographiés avec les images hyperspectrales + LiDAR	189
Figure 47. Diagramme des surfaces couvertes par les habitats EUR28 sur les cartes produites à partir des images satellites Sentinel-2 et des données aéroportées (hyperspectral + LiDAR)	191
Figure 48. Cartes des habitats d’intérêt communautaire (EUR28) de l’estuaire de la Loire	192
Figure 49. Cartes des habitats de l’Ile de la Motte	194
Figure 50. Extraits de cartes de végétations sur le secteur de Lavau-sur-Loire / Cordemais	225
Figure 51. Proportions du nombre d’études avec cartes de végétation réalisées sur l’estuaire de la Loire	226
Figure 52. Proportions du nombre de cartes réalisé sur l’estuaire de la Loire selon les typologies utilisées	227
Figure 53. Bilan financier de la thèse et évaluation des coûts pour une actualisation de la cartographie des habitats de l’estuaire de la Loire et dans le cadre de la transposition de la méthode sur un autre site Natura 2000 d’une superficie équivalente	243
Figure 54. Prix à l’hectare pour la réalisation de cartographies d’habitats	246

Table des tableaux

Tableau 1. Liste des habitats d'intérêt communautaire inventoriés lors de l'élaboration de la première cartographie des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'	17
Tableau 2. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des prairies humides identifiées sur le site Natura 2000.....	40
Tableau 3. Tableau synoptique en pourcentage de fréquence des espèces diagnostiques des habitats des prairies humides identifiés sur le site d'étude	44
Tableau 4. Présentation des habitats des prairies humides identifiés sur le site d'étude avec leurs espèces caractéristiques (espèces diagnostiques, constantes et dominantes).....	47
Tableau 5. Nombre d'unités syntaxonomiques recensés dans la pré-typologie et nombre d'unités définies dans le système expert	53
Tableau 6. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations littorales.....	58
Tableau 7. Espèces caractéristiques des habitats littoraux de l'estuaire de la Loire.	60
Tableau 8. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations aquatiques.....	63
Tableau 9. Tableau des espèces caractéristiques des habitats aquatiques de l'estuaire de la Loire.	65
Tableau 10. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations de prairies..	68
Tableau 11. Tableau des espèces caractéristiques des habitats prairiaux de l'estuaire de la Loire.....	70
Tableau 12. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations d'ourlets et de mégaphorbiaies.....	73
Tableau 13. Tableau des espèces caractéristiques des habitats d'ourlets et de mégaphorbiaies de l'estuaire de la Loire	74
Tableau 14. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations de roselières.....	76
Tableau 15. Tableau des espèces caractéristiques des habitats de roselières de l'estuaire de la Loire.	78
Tableau 16. Tableau synoptique des pourcentages de fréquence des espèces des végétations de fourrés et forêts.	81
Tableau 17. Tableau des espèces caractéristiques des habitats des fourrés et forêts de l'estuaire de la Loire	83
Tableau 18. Typologie complète des habitats du site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'	87
Tableau 19. Caractéristiques des bandes Sentinel-2.....	119
Tableau 20. Caractéristiques des deux capteurs hyperspectraux	119
Tableau 21. Caractéristiques du capteur topo-bathymétrique LIDAR Titan	120

Tableau 22. Caractéristiques détaillées du vol.....	123
Tableau 23. Liste des indices de végétation calculés à partir des bandes spectrales Sentinel-2	135
Tableau 24. Liste des indices calculés à partir des bandes spectrales VNIR et SWIR	137
Tableau 25. Liste des 12 variables calculées à partir des statistiques des images VNIR, SWIR et S2-S	138
Tableau 26. Combinaisons de variables utilisées pour les 3 classifications des données aéroportées (Test 1, Test 2 et Test 3).....	146
Tableau 27. Typologie détaillée des habitats utilisée pour la classification des images satellites et aéroportées.	150
Tableau 28. Liste des 5 variables (bandes spectrales et indices de végétation) les plus performantes d’après le MDG pour chaque date.....	158
Tableau 29. Matrice de confusion pour l’ensemble de données multi-dates à l’échelle des habitats EUNIS.....	162
Tableau 30. Matrices de confusion pour l’ensemble de données multi-dates à l’échelle des habitats des ‘Cahiers d’habitats’	163
Tableau 31. Matrices de confusion pour l’ensemble de données multi-dates à l’échelle des habitats EUR28.	164
Tableau 32. Surfaces des habitats EUNIS cartographiées à partir de la classification des images Sentinel-2.....	166
Tableau 33. Niveaux de précision (OA et Kappa) pour les trois ensembles de données analysés (Test 1, Test 2 et Test 3).....	167
Tableau 34. Présentation des précisions du producteur (PA) et des précisions de l’utilisateur (UA) pour les trois images analysées (Test 1, Test 2 et Test 3).....	167
Tableau 35. Matrice de confusion de l’image Test 3 à l’échelle des habitats EUNIS.	179
Tableau 36. Matrice de confusion de l’image Test 3 à l’échelle des habitats des ‘Cahiers d’habitats’	181
Tableau 37. Matrice de confusion de l’image Test 3 à l’échelle des habitats EUR28	183
Tableau 38. Surfaces des habitats EUNIS cartographiées à partir de l’image Test 3..	186
Tableau 39. Montants engagés pour la cartographie par la méthode classique de sites Natura 2000 en Pays de la Loire	247

Table des matières

Remerciements.....	5
Liste des publications et communications.....	7
Introduction générale.....	11
Le déclin de la biodiversité	11
Le dispositif Natura 2000.....	12
Le site Natura 2000 ‘Estuaire de la Loire’	13
Contexte et objectifs du projet de recherche	18
Chapitre 1 : Élaboration de la typologie des habitats de l’estuaire de la Loire.....	21
1.1 Introduction.....	21
1.2 Acquisition des données	28
1.2.1 Données bibliographiques	28
1.2.2 Campagne de terrain.....	29
1.2.3 Nomenclature taxonomique, syntaxonomique et correspondances avec les typologies habitats	31
1.3 Élaboration d’un système expert pour l’identification des habitats du site Natura 2000 ‘Estuaire de la Loire’	32
1.3.1 Expérimentation de la méthode ‘système expert’ pour l’identification des prairies humides de l’estuaire de la Loire	33
1.3.2 Développement d’un système expert détaillé pour l’identification des végétations et des habitats de l’estuaire de la Loire	51
1.4 Compléments pour l’obtention d’une typologie complète des habitats du site Natura 2000 ‘Estuaire de la Loire’.....	85
1.5 Discussion.....	94
1.5.1 Avantages et limites du système expert de l’estuaire de la Loire	94
1.5.2 Définition des espèces caractéristiques des habitats.....	98
1.5.3 Problèmes typologiques et d'identification des habitats	100
1.5.4 Enjeux de conservation du patrimoine végétal et des habitats	101
1.6 Conclusion	106
Chapitre 2 : Cartographie des habitats de l’estuaire de la Loire par télédétection.....	109
2.1 Introduction.....	109
2.2 Matériel et méthode	118
2.2.1 Acquisition et pré-traitements des images.....	118
2.2.2 Calculs de variables complémentaires dérivées des images optiques	134
2.2.3 Sélection des données d’apprentissage.....	138
2.2.4 Méthodes de classification des images.....	142
2.3 Résultats.....	147
2.3.1 Typologies retenues pour les classifications après sélection des données d’apprentissage.....	147
2.3.2 Analyse des images satellites Sentinel-2.....	157

2.3.3	Analyse des images aéroportées hyperspectrales et LiDAR.....	167
2.3.4	Effet du nombre de pixels d'apprentissages sélectionné sur la précision des différentes unités cartographiées	187
2.3.5	Comparaison des différentes approches de cartographies des habitats.....	190
2.4	Discussion	195
2.4.1	Influence des différentes dimensions des données de télédétection pour la cartographie des habitats de l'estuaire de la Loire	195
2.4.2	Influence des vecteurs d'acquisition des données	208
2.4.3	Contribution de la richesse des données de terrain.....	212
2.5	Conclusion	213
Chapitre 3 : Analyse des usages de la cartographie des végétations et des habitats par les praticiens		217
3.1	Introduction	219
3.1.1	Partager les données environnementales, un enjeu pour les acteurs de la gestion du littoral	219
3.1.2	La cartographie de la végétation : acquérir, partager et représenter des données pour comprendre les dynamiques environnementales.....	220
3.2	Matériel et méthode.....	222
3.2.1	Analyse de la production des études cartographiques	222
3.2.2	Étude des demandes de données et identification des acteurs	223
3.2.3	Méthodologie de l'enquête	223
3.2.4	Atelier de restitution	224
3.3	Résultats	224
3.3.1	Analyse de la production de cartes de végétation sur l'estuaire de la Loire	224
3.3.2	Analyse des demandes de données.....	227
3.3.3	Analyse du questionnaire.....	228
3.4	Discussion	230
3.4.1	Des cartographies de végétation disponible depuis trois décennies pour mieux comprendre, gérer, protéger et aménager l'estuaire de la Loire.....	230
3.4.2	Un besoin de connaissance pour la protection des habitats vecteur de collaboration, de partage et d'innovations scientifiques et techniques.....	232
3.4.3	Une connaissance encore partielle de la dynamique des végétations	233
3.4.4	Des typologies standardisées pour mieux appréhender les évolutions de l'estuaire	235
3.5	Conclusion	236
Synthèse et conclusion générale		239
Le développement de méthodes standardisées pour la cartographie des habitats.....		239
Des approches de cartographie des habitats accessibles et rentables		242
Une réponse à la nécessité croissante de données cartographiques sur les habitats		248
Bibliographie		251
Annexes		277

Annexe 01	277
Annexe 02	281
Annexe 03	305
Annexe 04	306
Annexe 05	310
Annexe 06	323
Annexe 07	324
Annexe 08	334
Table des figures	337
Table des tableaux	341

Titre : Système expert et télédétection pour la cartographie des habitats – Apports et valorisations pour la conservation de la biodiversité de l'estuaire de la Loire

Mots clés : Natura 2000, Estuaire de la Loire, Système expert, Phytosociologie, Télédétection, Sentinel-2, Hyperspectral, LiDAR, Habitats EUNIS, Habitats EUR28

Résumé : L'inventaire et la cartographie des habitats sont des processus essentiels pour la mise en œuvre des politiques de conservation de la nature. Les méthodes actuelles, basées sur des prospections de terrain, sont difficilement applicables sur de vastes territoires et jugées inadaptées à un suivi régulier et harmonisé des habitats. L'objectif de cette thèse est d'explorer des approches innovantes afin de faciliter l'inventaire et la cartographie des habitats sur de grands sites naturels, en prenant comme cas d'étude le site Natura 2000 'Estuaire de la Loire'. Un système expert a été développé pour l'identification de relevés phytosociologiques afin d'établir la typologie des habitats du site. Cette démarche a permis de rattacher de manière formelle 1843 relevés de végétation à 89 habitats

EUNIS et 17 habitats d'intérêt communautaire. Des images satellites Sentinel-2 et des données aéroportées hyperspectrales et LiDAR ont été exploitées pour spatialiser les habitats du site par télédétection. Ces différentes données, aux caractéristiques complémentaires (résolutions spatiales, résolutions spectrales, répétitivité, 3D), ont permis de cartographier avec une très grande précision la majorité des habitats des 24 000 ha de l'estuaire de la Loire. L'application de ces nouvelles approches démontre l'intérêt d'associer les systèmes experts et la télédétection pour typifier et cartographier des habitats de façon rentable et reproductible favorisant une gestion concertée du site Natura 2000.

Title : Expert system and remote sensing for habitat mapping - Contributions and valorizations for the conservation of the biodiversity of the Loire estuary

Keywords : Natura 2000, Estuaire de la Loire, Expert system, Phytosociology, Remote sensing, Sentinel-2, Hyperspectral, LiDAR, EUNIS Habitats, EUR28 Habitats

Abstract : Inventory and mapping of habitats are essential processes for the implementation of nature conservation policies. Current methods, based on field surveys, are difficult to apply over large areas and are considered unsuitable for regular and standardized habitat monitoring. The aim of this thesis is to explore innovative approaches to facilitate the inventory and mapping of habitats on large natural areas, taking as a case study the Natura 2000 site 'Estuaire de la Loire'. An expert system was developed for the identification of phytosociological plots in order to establish the typology of the habitats of the site. This approach allowed to assign formally 1,843 vegetation plots to 89 EUNIS habitats and 17

habitats of community interest. Sentinel-2 satellite images and airborne hyperspectral and LiDAR data were used to spatialize the habitats by remote sensing. These different data, with complementary characteristics (spatial resolution, spectral resolution, repeatability, 3D), have made it possible to map most of the habitats of the 24,000 ha of the Loire estuary with a high degree of accuracy. The application of these new approaches shows the interest to combine expert systems and remote sensing to typify and map habitats in a cost-effective and reproducible way that favors concerted management of the Natura 2000 site.