

## TÉLÉDÉTECTION DES HABITATS INSULAIRES LIGÉRIENS PAR DRONE : RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES ÎLES DE MAREAU-AUX-PRÉS (LOIRET)

HILAIRE MARTIN<sup>a</sup> – OPHÉLIE BESLIN<sup>b</sup> – MARIE DE BOISVILLIERS<sup>c</sup> –  
RICHARD CHEVALIER<sup>a</sup> – MARC VILLAR<sup>d</sup>

Les communautés végétales inféodées aux écosystèmes rivulaires présentent de grandes variabilités spatiale et morphologique en raison de leur position topographique entre terre et eau (Gurnel, 2014). Le long de la Loire moyenne (de Nevers à Angers), ces formations se déploient, au rythme de la dynamique fluviale et suivant un gradient de maturation allant de la grève sédimentaire nue à la forêt alluviale à bois durs (Grivel et Gautier, 2012). L'incision du fleuve, liée à l'extraction passée de sédiments dans le lit (Gasowski, 1994), a accéléré la dynamique forestière obligeant les services de l'état à contrôler la végétation ligneuse pour maintenir la capacité d'écoulement du fleuve en période de crue, afin de préserver les populations humaines riveraines. Parmi les éléments arborés, les îles et les ripisylves boisées par les salicacées et plus précisément le Peuplier noir (*Populus nigra* L.) constituent une part importante du paysage ligérien et sont soumises aux éléments de perturbation anthropique mentionnés précédemment. Ces saulaies-peupleraies relèvent de l'habitat générique 91E0 et des habitats élémentaires 91E0-1 et 91E0-3, prioritaires au titre de la directive Habitats 92/43/CEE [EUNIS: G1.11] (Bensettiti *et al.*, 2001). Non menacé en Loire moyenne (Nature Centre et CBNBP, 2014), cet habitat mérite toutefois une attention particulière pour en conserver le bon état écologique. En effet, ces forêts et leurs flores associées sont sensibles aux activités humaines (Rodrigues *et al.*, 2006), et à leurs conséquences, notamment la pollution des eaux et l'introduction d'espèces végétales exotiques (Dunford *et al.*, 2009). Sur ce point, l'arrivée de l'Érable américain (*Acer negundo* L.) à la deuxième moitié du XVIII<sup>e</sup> siècle (Dumas, 2019) soulève des interrogations quant à la dynamique des groupements végétaux face au pouvoir couvrant de cette espèce. Enfin, ces forêts alluviales constituent l'habitat d'un consommateur et « gestionnaire » expérimenté de la biomasse ligneuse : le Castor d'Europe (*Castor fiber* L.). Ce rongeur réintroduit dans les années 1970 se délecte des salicacées, dont le Peuplier noir et délaisse l'Érable américain. Il serait abusif ici de réduire la situation au fait qu'une espèce protégée (le Castor) favorise indirectement une espèce exotique (l'Érable américain). Par ailleurs, les phénomènes d'accrétion et d'érosion lors des crues redessinent en permanence les contours de la mosaïque de ces espaces naturels, notamment pour les habitats de début de succession. Cela induit de fortes variabilités dans la distribution spatiale des communautés végétales le long des toposéquences allant des grèves découvertes à l'étiage jusqu'aux

a INRA, UR EFNO, 45290 Nogent-sur-Vernisson, France

b DREAL Centre CBNBP, 45000 Orléans, France

c L'Avion Jaune, 34980 Montferrier-sur-Lez, France

d INRA, UMR 0588 INRA-ONF BioForA, 45000 Orléans, France

forêts à bois durs, respectivement stades pionniers et climax de la succession forestière primaire concernée.

Pour les gestionnaires de ces écosystèmes assez instables, le suivi régulier s'impose et la cartographie s'avère être l'outil idoine stimulée par l'accessibilité accrue aux logiciels SIG (systèmes d'informations géographiques) et aux images aérienne et satellitaire (Pettorelli *et al.*, 2014). Les longueurs d'onde prospectées par les capteurs offrent aux télédéTECTEURS un spectre élargi notamment dans l'infrarouge où la réflectance des plantes s'exprime le mieux. En combinant les différents canaux du visible et de l'invisible, de nombreux indices de végétation ont ainsi été créés et notamment l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) (Rouse *et al.*, 1973). Ce ratio est encore largement utilisé dans des domaines scientifiques variés, citons entre autres : l'écophysiologie, l'agriculture, la foresterie et les dynamiques des écosystèmes.

Ces avancées spectrales sont à mettre en parallèle avec les résolutions spatiales de plus en plus fines des caméras embarquées. En quelques décennies, la taille des objets discriminés est passée de plusieurs centaines de mètres à quelques centimètres aujourd'hui. Ainsi, un simple groupe d'arbres peut être contenu dans un ou deux pixels de 30 mètres pour une résolution qualifiée de haute, et être représenté par des milliers de pixels pour une très haute résolution. Dans le premier cas, une méthode fondée sur la valeur spectrale du pixel est suffisante pour classifier l'objet, en revanche, pour le second cas, d'autres outils existent comme, par exemple, la classification orientée objet, apparue dans les années 2000. Cette dernière se démarque par le fait qu'elle prend en compte les diverses valeurs du pixel : taille, forme, radiométrie, et relation avec les pixels environnants. Elle s'exécute en deux temps : une phase de segmentation paramétrée selon un seuil d'homogénéité suivi d'une phase de classification selon les attributs du pixel listés précédemment. Un écueil possible de ce procédé tient au fait qu'un objet représenté par une multitude de pixels puisse présenter une variabilité spectrale trop importante et être par conséquent mal discriminé (Dufour *et al.*, 2012). D'une manière générale, la classification orientée objet est assez plébiscitée dans la littérature scientifique, c'est par exemple le cas pour les travaux de Sellin *et al.* (2015) sur la détectabilité des grandes formations végétales de l'Ouest de la France. Cet outil a amené un gain de temps considérable pour la cartographie avec de bons résultats pour des premiers niveaux d'occupation du sol (par exemple, milieux végétalisés versus artificialisés) grâce entre autres au NDVI. En revanche, pour des niveaux plus fins de typologies de végétations comme, par exemple, la distinction entre roselières et cariçaies, les performances restaient à améliorer.

La très haute résolution spatiale bénéficie également des dernières prouesses technologiques en termes de vecteur aéroporté. Ainsi, des appareils photographiques numériques performants et accessibles financièrement sont facilement mobilisables sur des structures légères sans pilote (drone). Les altitudes de vol de l'ordre de centaines de mètres multiplient les opportunités de périodes d'acquisition. De plus, la synchronisation entre capteur multispectral (caméra, appareil photographique numérique), impulsion laser (LiDAR) et GPS modélisent l'objet survolé en trois dimensions avec une richesse d'informations importante. Le nuage de points est à l'origine des modèles numériques de terrain (MNT) et de canopée (MNC) qui sont un préalable indispensable à l'analyse des objets dans l'espace. Concernant les ripisylves de la Drôme, l'équipe de Dunford *et al.*, en 2009, a souligné l'intérêt de cette technologie pour entre autres cartographier finement les Peupleraies noires. Plus récemment, ce mode d'acquisition a également été éprouvé avec succès dans des ripisylves belges pour cartographier la composition en espèces arborées mais également pour y effectuer un suivi sanitaire (Michez *et al.*, 2016).

Cependant, ces expérimentations se concentrent principalement sur la partie ligneuse de la ripisylve au détriment des autres habitats. Aussi, le présent article se propose de tester la cartographie

automatisée de l'ensemble des habitats ligériens à partir de données collectées par drone, sur un chapelet d'îles de la commune de Mareau-aux-Prés (Loiret). Des fonctions du logiciel gratuit Orfeo ToolBox développé par le CNES (Centre national d'études spatiales) (Inglada et Christophe, 2009) sont implémentées pour effectuer une classification orientée objet. Les résultats discutés au regard des singularités de la végétation ligérienne pourraient éclairer de futurs projets de cartographie à plus large échelle en contexte alluvial.

## MÉTHODOLOGIE

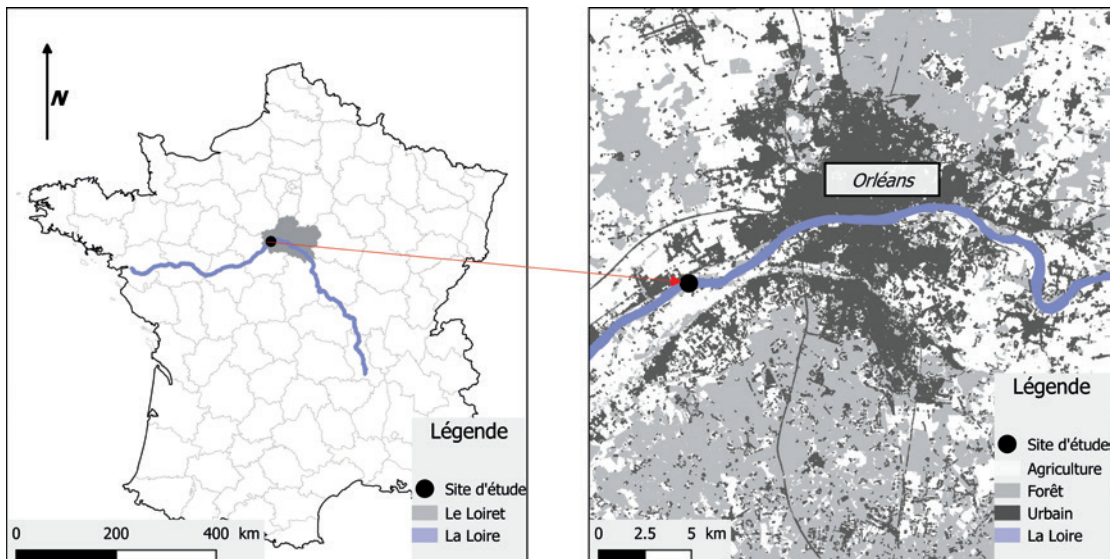
Nous décrivons principalement dans cette section les données et leurs traitements ainsi que les analyses effectuées. Le lecteur pourra se référer à la figure 3 (p. 574) qui reprend la majorité du cheminement.

### Zone d'étude

L'expérimentation s'est déroulée sur le complexe d'îles de Mareau-aux-Prés, d'environ 13 hectares, situé dans la vallée de la Loire (figure 1, ci-dessous), à une dizaine de kilomètres en aval de la ville d'Orléans ( $47^{\circ} 51' 51.88''$  N,  $1^{\circ} 46' 52.84''$  E), au sein de la réserve naturelle nationale de Saint-Mesmin (Loiret). Les quatre îlots étudiés (figure 2a, p. 572) concernant notre étude sont principalement dominés par des forêts de Peuplier noir et de saules arbustifs, excepté l'îlot central (C) qui a fait l'objet d'un arasement en 2012 afin de préserver l'écoulement du fleuve. Depuis 2013, une nouvelle barre sédimentaire a émergé, en partie couverte de jeunes semis de salicacées et fait l'objet, ainsi que les trois autres îlots, d'un suivi de biodiversité et de consommation de la végétation par le Castor.

FIGURE 1

CARTE DE LOCALISATION

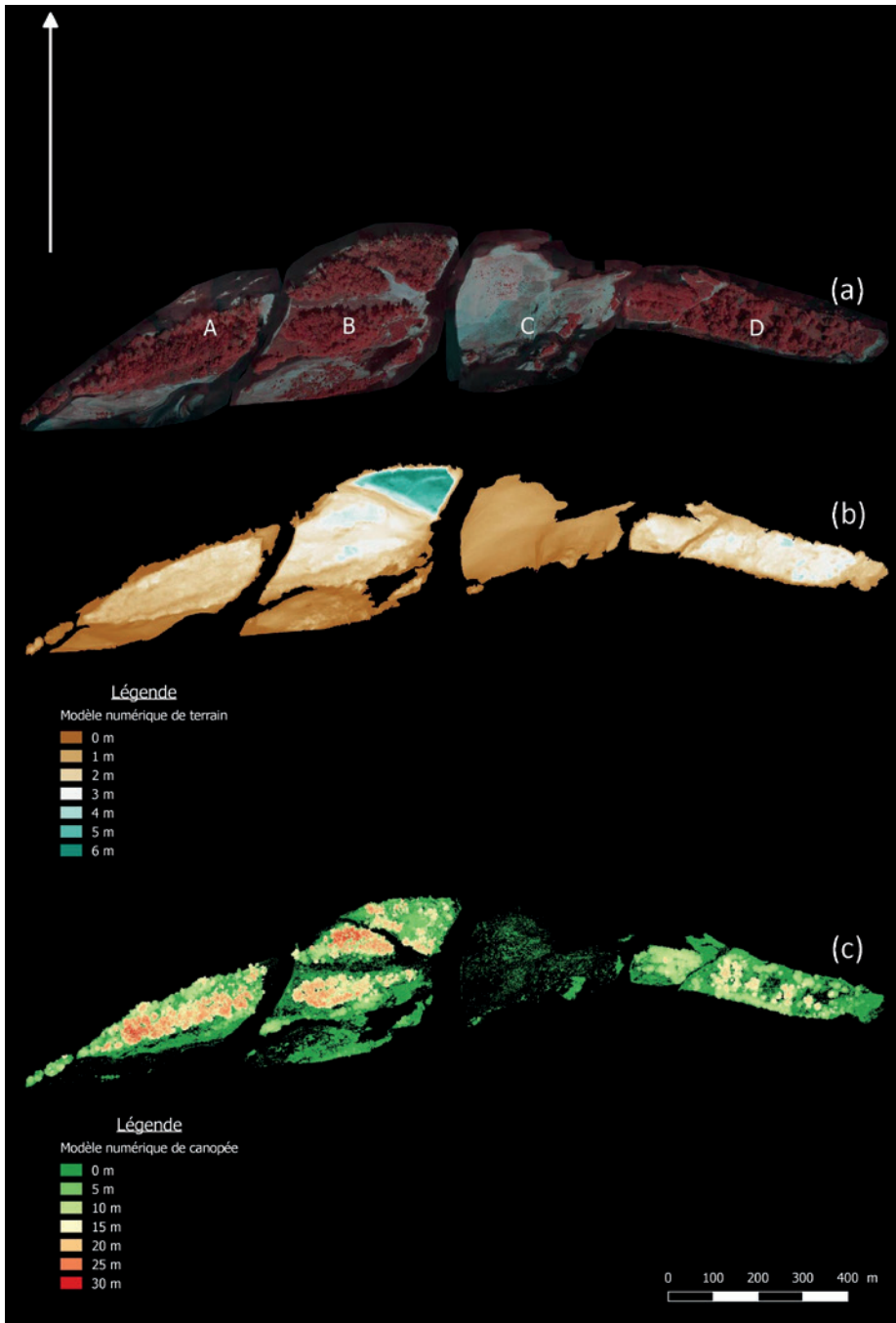


**FIGURE 2**

**PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU SITE**

(a) : composition colorée des réflectances : proche infrarouge en rouge, rouge en vert, bleu en bleu. Les lettres en majuscules désignent les îlots.

(b) : modèle numérique de terrain (MNT). (c) : modèle numérique de canopée (MNC).



## Acquisition lidar et images et prétraitements

Les survols des îles ont été réalisés les 20 et 21 août 2017, par la société l'Avion Jaune basée près de Montpellier. Le drone de type FOX-C8 OnyxStar® était équipé d'un ordinateur de bord contrôlant à la fois le système de navigation globale par GPS (GNSS) et l'unité de mesure inertielle (IMU) régissant entre autres l'altitude et la stabilité du vol. Pour le lidar, il s'agissait d'un capteur assemblé par la société YellowScan : YellowScan Surveyor®. Trois survols ont été nécessaires pour recueillir le nuage de points des 4 îles. L'altitude de ces vols était de 45 m. Le recouvrement entre chaque ligne était de 60 %. Le nombre moyen de points par mètre carré était de 215.

L'acquisition des orthophotos dans les 4 longueurs d'ondes (rouge, vert, bleu et infrarouge) a suivi un mode opératoire largement éprouvé dans le domaine de la télédétection « peu coûteuse » (Labbé *et al.*, 2007). Deux appareils photos Canon® EOS 500D ont été embarqués sur le drone. L'un des deux appareils avait été préalablement modifié (par suppression du filtre « visible ») pour accéder directement aux proches infrarouges. Le taux de recouvrement des images était identique à celui du lidar mais avec une hauteur de vol de 100 m. Durant ces deux jours d'acquisition de données, la hauteur d'eau mesurée au niveau du Pont Royal d'Orléans était de 1 m en dessous de 0, soit le niveau d'étiage pour 2017.

Les prétraitements ont été réalisés par la Société l'Avion Jaune. Les modèles numériques de terrain et de canopée ont été générés avec les logiciels Applanix® et TerraSolid® à une résolution de 0,2 m. L'assemblage des images et leur référencement dans un système cartographique s'est opéré sous le logiciel Correlator3D® de la suite Simactive® pour une résolution au sol de 0,02 m. L'ensemble de ces données a été fourni au format GeoTIFF.

Afin qu'elles puissent être analysées conjointement, les orthophotos ont par la suite été rééchantillonnées à la même résolution que les modèles numériques, soit 0,2 m.

## Données de terrain

L'utilisation des algorithmes de classification se décline en deux phases : une phase d'apprentissage et une phase de vérification. Pour ce faire, nous avons sur le terrain établi une grille régulière de 15 m x 15 m soit près de 496 points sur lesquels nous avons codé l'habitat selon la typologie du SIEL (système d'information des évolutions du Lit de la Loire et de ses affluents) (Beslin et Gazeau, 2016) en excluant les habitats aquatiques. Cette typologie reprend l'ensemble des alliances phytosociologiques du Lit de la Loire et de ses affluents et propose des regroupements pragmatiques pour appréhender sur le terrain la complexité de la végétation. Ces points ont été localisés avec un GPS dont la précision était subdécimétrique ( $\leq 10$  m). Par la suite, ce maillage a été divisé en deux jeux de données de 248 points chacun ; l'un pour l'apprentissage et l'autre pour la vérification (figure 3, p. 574).

## Préparation et assemblage des données

L'ensemble des analyses a été mené sous le logiciel gratuit Orfeo ToolBox (<https://www.orfeo-toolbox.org/>).

### • *Concaténation de plusieurs canaux et segmentation*

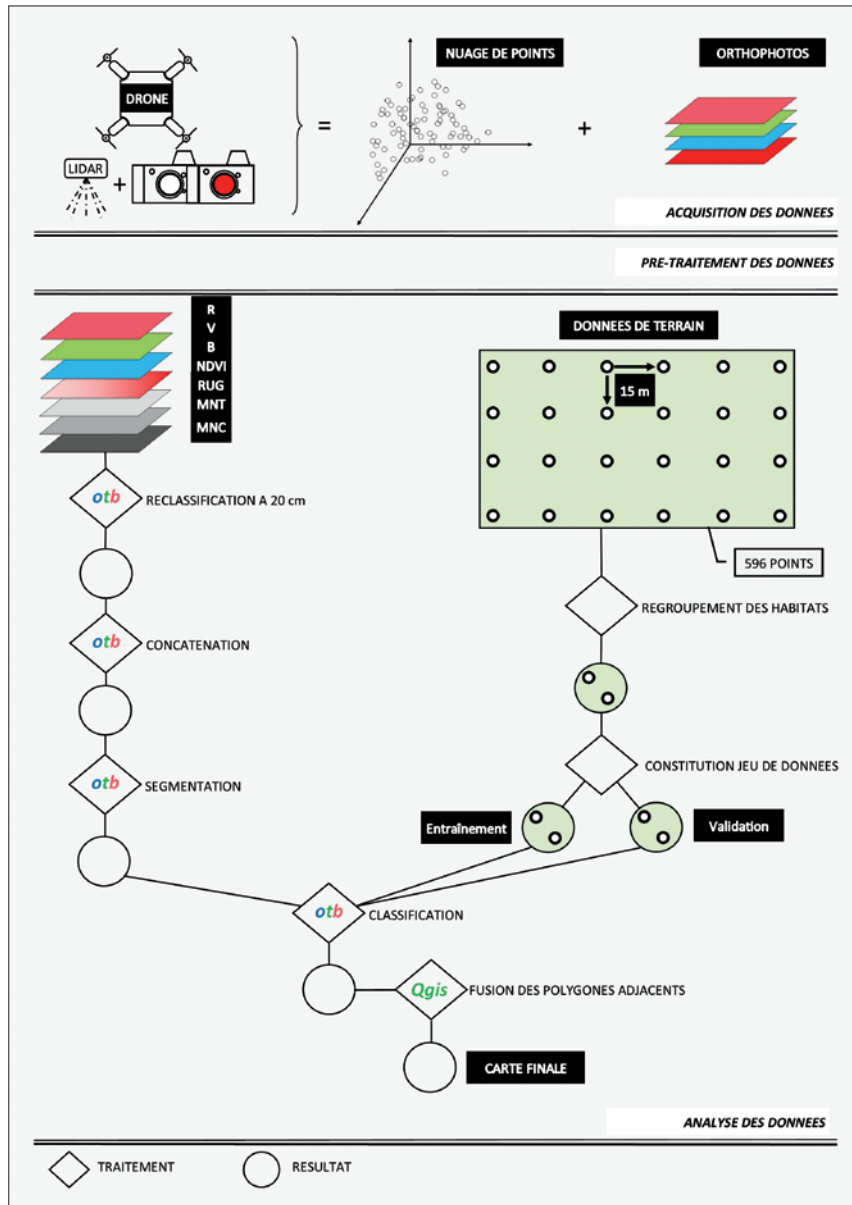
Pour cette étude, la segmentation s'est opérée sur une image composée des canaux suivants :

- canal : rouge / (vert + bleu) ;
- canal : vert / (rouge + bleu) ;
- canal : bleu / (rouge + vert) ;
- NDVI : (Proche infrarouge – rouge) / (Proche infrarouge + rouge) ;

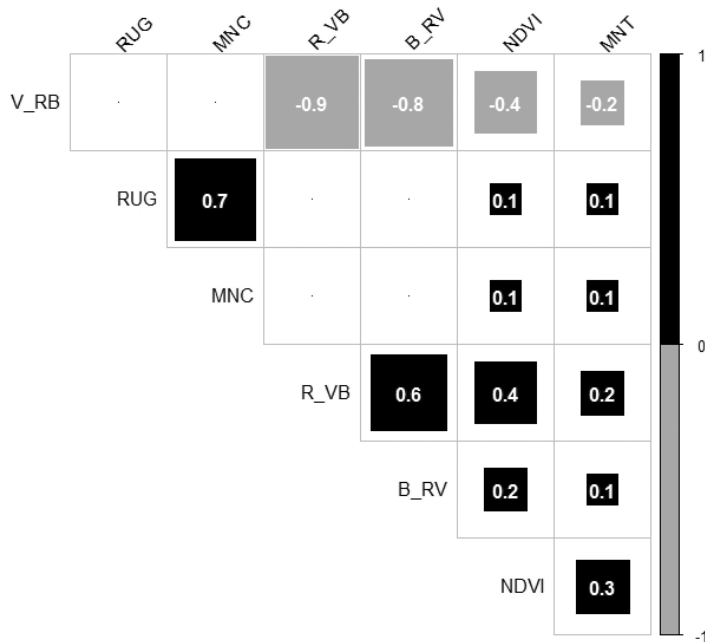
- rugosité des hauteurs ;
- modèle numérique de terrain (MNT, figure 2b, p. 572) ;
- modèle numérique de canopée (MNC, figure 2c, p. 572).

Les quatre premiers canaux sont des ratios s'étalant entre les valeurs - 1 et 1. L'intérêt étant de standardiser les différentes longueurs d'onde afin de minimiser leur variabilité. L'inconvénient de ce type de normalisation est d'engendrer des corrélations comme en témoigne la figure 4 (p. 575).

FIGURE 3 ORGANIGRAMME MÉTHODOLOGIQUE



**FIGURE 4 MATRICE DES CORRÉLATIONS ENTRE LES BANDES DU RASTER MULTICANNAUX :**  
 R\_VB = rouge / (vert + bleu) ; V\_RB = vert / (rouge + bleu) ; B\_RV = bleu / (rouge + vert) ; NDVI ;  
 RUG = Rugosité des hauteurs ; MNT = Modèle numérique de terrain ; MNC = Modèle numérique de canopée.



Concernant la rugosité (RUG), cette dernière a été calculée à partir du MNC. Comme le montre la figure 4 (ci-dessus), il y a bien une corrélation positive entre ces deux variables. Néanmoins la rugosité s'avère être une donnée pertinente pour le suivi des ripisylves par télédétection comme en témoigne la revue bibliographique de Dufour *et al.* (2012). Elle se caractérise par le degré d'irrégularité des hauteurs en mesurant la plus grande différence entre un pixel central et ses cellules environnantes.

Pour cette expérimentation, nous avons choisi une segmentation multirésolution par regroupement itératif d'objets. Cette approche s'initie avec un ou plusieurs objets d'un seul pixel. Au fur et à mesure du traitement, ces petits objets sont fusionnés en fonction de critère de forme et de couleur grâce à l'information contenue dans les différents canaux. Il en va ainsi jusqu'à ce qu'un seuil d'hétérogénéité maximale (défini à l'avance par l'opérateur) soit franchi. Pour ce faire, trois paramètres sont obligatoires :

— Échelle

Il s'agit d'une valeur abstraite représentant le seuil d'hétérogénéité maximale. Pour simplifier, dans un contexte hétérogène les polygones segmentés sont plus petits et inversement en contexte homogène. Ce seuil a donc un effet sur la taille des objets.

— Homogénéité spectrale

L'opérateur peut saisir une valeur entre 0 et 1. Un indice proche de 1 donne la priorité à l'homogénéité spectrale, les pixels sont agrégés en fonction de leur similitude radiométrique. Pour un seuil proche de 0, la fonction regroupe les objets en fonction de leur forme.

– Homogénéité spatiale

Tout comme précédemment, le télédécteur peut choisir entre 0 et 1. Plus on se rapprochera du seuil liminaire plus la compacité sera exprimée. Pour un périmètre plus sinueux, on affectera un indice proche de 1. On entend ici par compacité, des objets avec de simples contours, traduisant un périmètre plus court.

Pour notre étude, nous nous sommes appuyés sur les travaux de Dunford *et al.* (2009) traitant de la caractérisation des ripisylves méditerranéennes. Il s’agissait avec le même algorithme de détecter des éléments naturels fins, l’équipe avait donné la priorité à une échelle petite, et à une radiométrie forte. Ainsi, pour nos travaux, les seuils ont été définis comme suit : échelle = 1, homogénéité spectrale = 0,9 et homogénéité spatiale = 0,2.

La segmentation fournit un ensemble de données vectorielles de plus de 1 000 000 d’entités. À ce stade, les objets ne sont pas encore classés.

• Regroupement des types d’habitats

Sur le complexe des îles de Mareau-aux-Prés, les habitats ne sont pas équitablement représentés. C’est en partie lié à la discontinuité topographique (figure 2b, p. 572), où l’on constate une élévation plus importante sur le plus grand îlot. Aussi, nous avons délibérément regroupé des formations végétales faiblement réparties et assez similaires, voir tableau I (p. 577). La figure 5 (ci-dessous) propose une toposéquence possible et éclaire sur la répartition spatiale des divers groupements végétaux.

FIGURE 5 UN EXEMPLE DE TOPOSÉQUENCE SUR LES ÎLES DE MAREAU-AUX-PRÉS

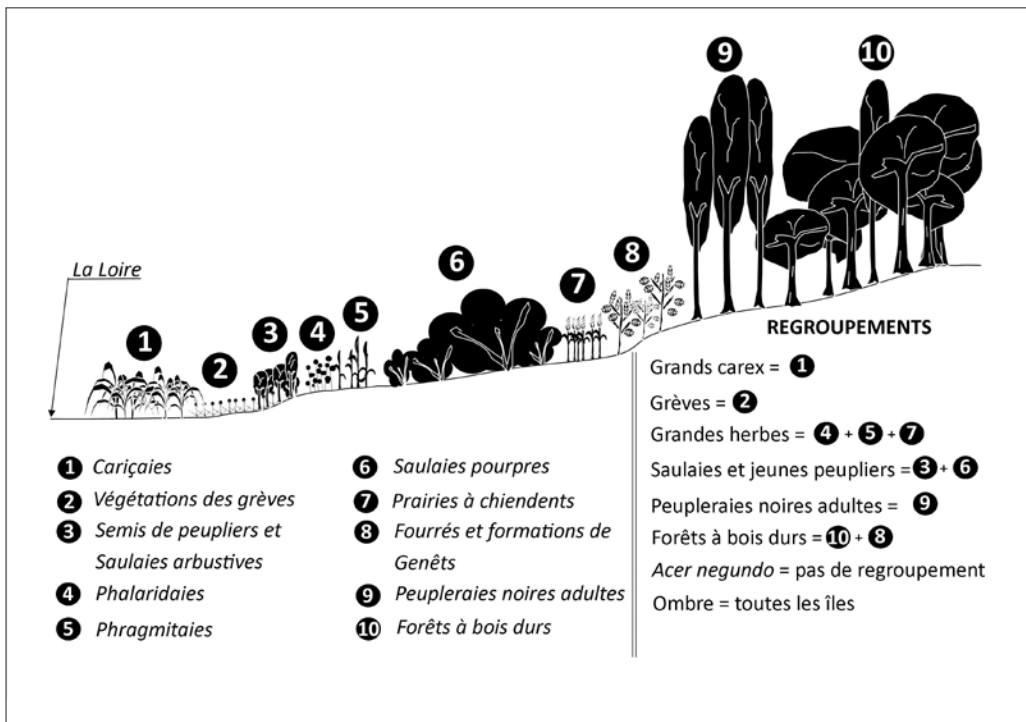


TABLEAU I

## Regroupement des types d'habitats

SIEL : Système d'information des évolutions du Lit de la Loire et de ses affluents

Regroupement	Dénomination SIEL	Typologie SIEL
Grèves	Végétations des sables et vases humides à annuelles + Végétations pionnières alluviales des sables secs du lit mineur	2.200 2.300
Grands carex	Roselières et magnocariçaies	1.220 <i>pour partie</i>
Hautes herbes	Roselières (Phalaris, Phragmites) + Prairies à chiens-dents	1.220 <i>pour partie</i> 3.230
Saulaies et jeunes peupliers noirs	Saulaies pourpres + Jeunes semis de <i>Populus nigra</i>	4.111
Peupleraies noires adultes	Saulaies-peupleraies arborescentes hygrophiles	4.120
Forêts à bois durs	Fourrés et formations de Genêt à balais + Forêts alluviales de bois durs	3.600 4.2
<i>Acer negundo</i>	Peuplements denses à Érable négundo	7.310
Ombre		

Une classe atypique peut ici interpeller le lecteur, il s'agit de la classe « Ombre ». Il est en effet difficile d'utiliser des pixels qui se retrouvent à l'ombre sur l'image au risque de pénaliser la qualité de la classification finale. Ce constat nous a amené à considérer ce souci optique comme une classe à part entière.

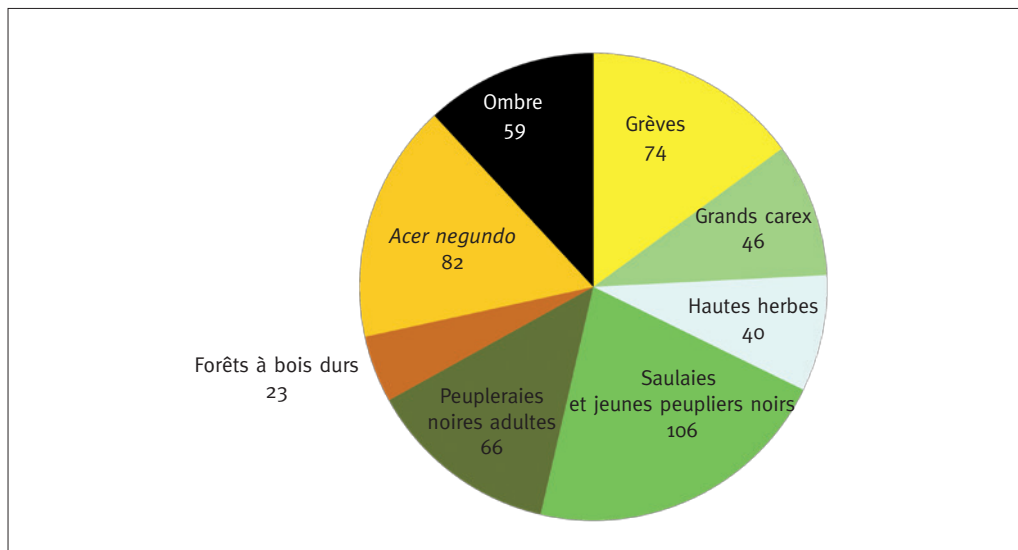
Nous avons fusionné les végétations des grèves humide et sèche, en raison du faible nombre de points de sables humides. Pour les « Roselières et magnocariçaies », nous avons séparé les formations à grands carex des phalaridaies et phragmitaies. En effet, l'implantation des grandes « laîches » sous forme de touradons entre lesquels circulent de nombreux filets d'eau traduit un fonctionnement hydrosédimentaire très différent de celui des phalaridaies-phragmitaies, avec des conséquences attendues sur la dynamique d'installation des ligneux. En revanche, et c'est plus discutable, nous avons regroupé les « phalaridaies et phragmitaies » avec les « Prairies à chiens-dents », sous la dénomination « Hautes herbes ». Ces dernières sont topographiquement plus élevées mais leur occurrence dans cette étude ne permet pas de créer une classe unique.

Les « Saulaies pourpres de bas niveau topographique » ainsi que les jeunes semis de *Populus nigra* ont été rassemblés sous la même étiquette de par leur proximité spatiale. Les grandes peupleraies noires adultes n'ont pas fait l'objet de regroupement. Enfin, les « Fourrés et formations de Genêt à balais » et les « Forêts à bois durs » ont été réunies en raison de leur proximité topographique.

La figure 6 (p. 578) synthétise les regroupements et renseigne sur leur nombre de points respectif. Sur les 8 habitats à peu près équilibrés (7 + l'Ombre) du complexe de Mareau-aux-Prés, un seul conserve un nombre d'occurrence bien plus faible : les Forêts à bois durs (23 points).

FIGURE 6

## NOMBRE DE POINTS PAR REGROUPEMENTS D'HABITATS



## Outils de Classification

Le logiciel OTB propose différents « classifieurs » et ce sont les forêts aléatoires qui ont été utilisées pour cette étude. Ces méthodes de classification sont largement éprouvées pour la modélisation des ripisylves (Laslier *et al.*, 2019). Elles s'appuient sur des données de référence qui doivent être le plus équitablement réparties (Breiman, 2001) justifiant ainsi nos regroupements d'habitats.

Cet algorithme a été testé avec les jeux de données d'apprentissage et de vérification. L'indice de Kappa a été retenu pour déterminer la qualité de la classification ; il mesure la concordance entre apprentissage et vérification en s'assurant qu'elle ne soit du fait du hasard. Le logiciel OTB fournit également trois valeurs : la précision, le rappel et le « F-mesure ». La précision mesure l'exactitude de la prédiction, tandis que le rappel renseigne sur son exhaustivité (Baghdadi *et al.*, 2018). Le « F-mesure » étant la moyenne harmonique entre ces deux indices, il ne sera pas utilisé dans cette analyse afin de ne pas alourdir notre propos.

## RÉSULTATS

Le produit issu de cette classification est un ensemble de données vectorielles d'environ 1 000 polygones et dont la résolution finale est de 5 m<sup>2</sup> (figure 7, p. 580). L'indice de Kappa présente un k de 0,52, au regard de la littérature cette valeur illustre plutôt une qualité de classification moyenne (Baghdadi et Zribi, 2016). Le tableau II (p. 579) présente la matrice de confusion pour les regroupements d'habitats. Notons ici que l'« Ombre » a été sorti de ce commentaire. Les valeurs de cette classe sont à peu près les mêmes entre précision et rappel : 0,30. C'est l'entité la moins bien détectée.

Pour une meilleure lecture, nous avons préféré présenter les résultats en deux grands thèmes : les milieux ouverts et semi-ouverts, puis les milieux arborés.

TABLEAU II Matrice de confusion

Lignes = référence terrain, colonnes = prédiction

	Grèves	Grands carex	Hautes herbes	Saulaies et jeunes peupliers noirs	Peupleraies noires adultes	Forêts à bois durs	<i>Acer negundo</i>	Ombre	Rappel
Grèves	17	1	2	20	1	0	0	0	0,41
Grands carex	1	18	0	0	0	0	0	2	0,86
Hautes herbes	3	4	9	5	1	0	2	4	0,32
Saulaies et jeunes peupliers noirs	5	1	0	35	0	0	1	1	0,81
Peupleraies noires adultes	1	0	0	3	20	0	5	6	0,57
Forêts à bois durs	0	0	0	0	1	9	1	1	0,75
<i>Acer negundo</i>	1	0	1	0	3	0	28	6	0,72
Ombre	5	1	0	0	5	2	6	10	0,34
Précision	0,52	0,72	0,75	0,56	0,65	0,82	0,65	0,33	

### Résultats par milieux ouverts et semi-ouverts

Les formations à grands carex (« Grands carex ») sont les mieux prédites avec une bonne concordance entre précision (0,72) et rappel (0,86).

En revanche, les « Grèves » ne sont repérées qu'une fois sur deux (précision 0,52). En regardant la matrice de confusion, on remarque que la chaîne de traitement classe 20 polygones « Saulaies et jeunes semis » alors qu'il s'agit sur le terrain de « Grèves », d'où une mauvaise valeur de rappel (0,40).

Sur les îles, les « Hautes herbes » sont en mosaïque fine avec les « Saulaies et jeunes peupliers noirs » et les « Grands carex ». La précision de cette végétation herbacée est supérieure à 0,75, mais le taux de rappel affiche un mauvais score en raison de la confusion avec les habitats cités auparavant mais également avec l'« Ombre ».

Les « Saulaies et jeunes peupliers noirs » ne sont reconnus qu'une fois sur deux de par leur juxtaposition avec les autres milieux ouverts, cependant le rappel de 0,81 souligne que presque tous ces ligneux sont correctement cartographiés.

### Résultats par milieux arborés

Les « Forêts à bois durs » sont bien localisées (précision = 0,80) et presque toutes ces surfaces arborées sur les îles sont recensées (rappel = 0,75).

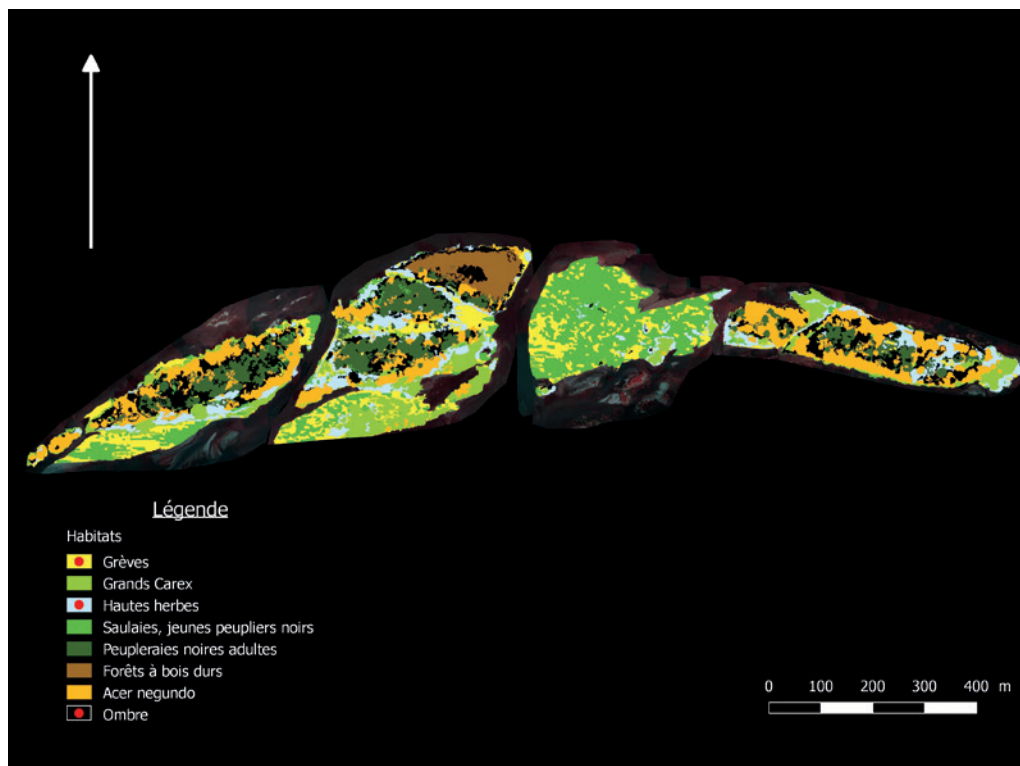
Un peu moins bien reconnu, l'Érable américain affiche une prédiction correcte de 0,65 et un rappel de 0,70. La matrice de confusion confirme que la classe « Ombre » perturbe le processus de classification.

On retrouve pour les « Peupleraies noires adultes » à peu près la même valeur de précision que pour l'Érable américain avec en revanche un indice de rappel inférieur à 0,60. Comme précédemment, on observe des confusions avec l'« Ombre », l'Érable américain et, dans une moindre mesure, les « Saulaies et les jeunes peupliers noirs ».

La figure 7 (ci-dessous) présente la cartographie des prédictions pour les quatre îlets.

**FIGURE 7** **CARTOGRAPHIE DE LA PRÉDICTION DES HABITATS**

Les points rouges dans la légende désignent les habitats les moins bien détectés.



## DISCUSSION

Le présent article vise à tester la cartographie automatisée d'habitats à partir de drone équipé de capteurs lidar et photogrammétrique. Cette expérimentation s'est déroulée sur une mosaïque d'îlots ligériens d'environ 13 ha dans la réserve naturelle de Saint-Mesmin à 10 km en aval de la ville d'Orléans (Loiret).

L'indice global de prédiction « kappa » est de 0,52, ce qui souligne une qualité de détection moyenne due à des prédictions discutables de certains habitats ouverts. Plusieurs paramètres peuvent influencer sur ces résultats. En premier lieu, nous avons été contraint de rééchantillonner nos orthophotos à 0,2 m afin de pouvoir les analyser conjointement avec les modèles numériques de

terrain et de canopée. Ceci permet un gain de temps de traitement informatique puisque la résolution est divisée par dix. En revanche, cette dégradation perturbe grandement la classification des milieux ouverts, notamment les grèves dont la taille de la végétation peut varier sur le terrain, de quelques centimètres à quelques décimètres (figure 8a, 8b et 8c, ci-dessous).

**FIGURE 8** **EXEMPLE DE CONFUSION D'HABITAT**

- (a) : Végétation de grèves avec un faible taux de recouvrement.
- (b) : Le même habitat que précédemment mais plus enherbé.
- (c) : Jeunes semis de Peupliers noirs sur grève.
- (d) : Un exemple du regroupement « Hautes herbes ».

Crédits photographiques : Jeanne Menanteau photos 8a, 8b et 8d, Marc Villar photo 8c.



En second lieu, la mauvaise prédiction de l'ombre génère des artefacts de classification. C'est particulièrement le cas dans les peupleraies noires adultes, où le Castor d'Europe crée des trouées de tailles variables induisant d'importantes ombres projetées. Un autre biais provient de la colorimétrie de certains végétaux qui présentent des pigmentations dans des champs chromatiques proche du vert foncé. Ces derniers se retrouvent prédits en « Ombre », ce qui aurait tendance à surinterpréter cette classe. Enfin, l'interprétation phytosociologique sur le terrain peut être à l'origine de nos biais d'identification. C'est par exemple le cas des végétations des grèves, où sur le cahier d'habitats (Bensettiti et *al.*, 2001 ; Cornier, 2002) il est précisé que le recouvrement peut varier de moins de 5 % à 80 % sur le terrain. Pour un même habitat, nous pouvons osciller entre une étendue de sable avec quelques rares végétaux jusqu'à une surface presque entièrement végétalisée (figure 8a et 8b, ci-dessus). S'il est possible pour l'œil humain d'identifier des habitats végétalisés en prenant en compte certaines espèces indicatrices indépendamment du taux

de recouvrement, le meilleur des algorithmes est en revanche incapable actuellement de discriminer ces variations. La qualité de nos prédictions est entachée par ces mélanges entre végétations de grèves, salicacées (figure 8c, p. 581) et hautes herbes (figure 8d, p. 581). Ce type de confusion n'est pas inhérent à notre étude puisque la synthèse bibliographique de Dufour *et al.* (2012) évoque déjà ces problèmes de discrimination entre habitats pionniers et prairiaux.

Ainsi, pour de futures études, il serait préférable pour ces milieux complexes ligériens de rester à un niveau de classification supérieure avec par exemple grèves nues-grèves végétalisées (avec un recouvrement liminaire de 20 % pour les grèves végétalisées). Une autre option aurait pu consister à analyser séparément les milieux ouverts des milieux fermés. C'est par exemple le cas pour la qualification des marais littoraux dans les travaux de Rapinel *et al.* (2015). En ne se focalisant que sur un objet, leur matrice de confusion présente de bons scores sur le gradient d'hygrophilie, largement exprimé par le MNT. Cependant, ce type d'approche thématique va à l'encontre de notre souhait initial de cartographier en un seul traitement, l'ensemble des habitats de la Loire moyenne.

Pour autant, d'autres formations végétales présentent des qualités de prédiction très satisfaisantes. Le cas des cariçaies est intéressant aux regards des attentes du gestionnaire sur cet habitat ligérien typique. Nos données collectées par drone (images multi-spectrales + lidar) augurent une bonne détection de ces cypéracées comparées aux images satellitaires utilisées dans l'étude de Sellin *et al.* (2015).

Les forêts à bois durs montrent également de bon taux de prédiction. Situées topographiquement plus en hauteur que le reste des formations arborées ligériennes, elles se détectent plus aisément grâce au modèle numérique de terrain. Les peupleraies noires adultes ainsi que l'Érable américain se distinguent par des taux quasi similaires de potentielles présences. Les valeurs de précision et de rappel (respectivement 0,65 ; 0,72) pour *Acer negundo* sont encourageantes compte tenu des enjeux liés à la présence de cette espèce introduite dans les ripisylves et à la forte consommation du Peuplier noir par le Castor d'Europe. On remarque sur la figure 7 (p. 580) que l'Érable américain se situe le plus au contact des grèves et très localement au sein des cariçaies. En revanche, notre classification ne perce pas la canopée des grands arbres et ne détecte pas la présence de l'Érable sous les houppiers des grands Peupliers noirs. La présence de cette espèce sous la canopée est pourtant bien avérée vis-à-vis des inventaires de terrain. L'abondance et le couvert de l'Érable américain sont alors sous-estimés avec nos prédictions.

Concernant la détection des habitats liés *sensu stricto* à la ripisylve, nos résultats vont dans le même sens que ceux décrits dans la littérature. Ainsi, l'expérimentation menée par l'équipe de Dunford *et al.* (2009) dans la Drôme, sur les mêmes types de végétation, affiche des scores de détection supérieurs aux nôtres, notamment pour le Peuplier noir. Il est à préciser ici, que leur télédétection ne s'est focalisée que sur les ligneux avec 5 classes : *Populus nigra*, *Salix sp.*, *Pinus nigra*, *Pinus sylvestris* et autres. Notre étude comporte 7 classes calées non pas sur des essences forestières mais bien sur des différences physiologiques de groupements végétaux. Là encore, la qualité de notre cartographie automatisée aurait différé si nous nous étions concentrés uniquement sur la biomasse arborée.

Les dernières innovations technologiques en matière de télédétection des ripisylves par drone font appel à plusieurs survols au cours d'une même saison de végétation. Ces explorations multi-temporelles améliorent grandement la détection des espèces arborées (avec en moyenne une précision globale > 80 %) notamment pour une étude menée sur des ripisylves belges (Michez *et al.*, 2016). Plus loin encore, les auteurs utilisent ces vols répétés comme analyse rétrospective pour quantifier l'aspect sanitaire de *Alnus glutinosa* (L.) face au parasite *Phytophthora alni*.

La comparaison de nuages de points lidar entre plusieurs dates offre une meilleure représentation des structures arborées. Ainsi Laslier *et al.* (2019) en Normandie proposent une construction

d'indicateurs de ripisylves fondés entre autres sur la forme des arbres. Les auteurs montrent des différences morphologiques au sein d'une même essence le long d'une rivière présentant plusieurs faciès (barrage, réservoir). Dans notre cas, cette solution affinerait le suivi de la consommation du Peuplier noir par le Castor d'Europe. Les Érables américains présents sous la canopée des grandes peupleraies pourraient être plus facilement cartographiés.

D'une manière générale, c'est bien la variabilité annuelle du régime hydrosédimentaire de la Loire qui nécessite des survols répétés pour mieux appréhender les mosaïques des milieux ouverts et plus particulièrement pionniers. Une rotation de 5 ans serait vraiment appropriée d'autant plus que le SIEL (système d'information des évolutions du Lit de la Loire : <http://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/les-donnees-du-siel-r557.html>) s'attèle à ce chantier. Nous pourrions envisager qu'à chaque campagne, soient effectués un vol de printemps et un vol de fin d'été afin d'observer des discontinuités dans les différentes canopées.

Notre travail ouvre alors des perspectives très intéressantes avec la limite qu'il ne s'est intéressé qu'à un complexe d'îles de Loire moyenne. Une étude à plus vaste échelle, comme l'ensemble de la Loire moyenne, mérite d'être initiée pour valider et ajuster les prédictions établies pour les îles de Mareau. La technologie lidar avance très rapidement et il pourrait être intéressant d'y adjoindre l'imagerie hyperspectrale afin d'explorer un maximum de longueur d'ondes pour améliorer la qualité des classifications notamment pour les milieux ouverts.

**Hilaire MARTIN**

Service SIG  
Unité de recherche Écosystèmes forestiers  
INRAE  
Domaine des Barres  
F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON  
(hilaire.martin@inrae.fr)

**Ophélie BESLIN**

Chargée d'études scientifiques  
DREAL Centre / CBNBP  
5 avenue Buffon  
CS 96407  
F-45064 ORLEANS CEDEX 2  
(ophelie.beslin@developpement-durable.gouv.fr)

**Marie de BOISVILLIERS**

Ingénieure, Chargée de projets  
L'AVION JAUNE  
1 chemin du Fescau  
F-34980 MONTFERRIER-SUR-LEZ  
(marie.deboisvilliers@lavionjaune.fr)

**Richard CHEVALIER**

Botanique, phytoécologie  
Unité de recherche Écosystèmes forestiers  
INRAE  
Domaine des Barres  
F-45290 NOGENT-SUR-VERNISSON  
(richard.chevalier@inrae.fr)

**Marc VILLAR**

Directeur UMR 0588 INRA-ONF BioForA  
INRAE Val de Loire  
2163 avenue de la pomme de pin  
CS 40001  
Ardon  
F-45075 ORLÉANS CEDEX 2  
(marc.villar@inrae.fr)

## Remerciements

Cette étude fait partie du projet BioMareau, financé dans le cadre du « programme interrégional Loire, 2014-2020 ». Les institutions de financement sont la région Centre-Val de Loire (n° 2016 - 00108348), l'INRA, l'Irstea et l'Union européenne (l'Europe est engagée dans le bassin de la Loire par le biais du programme opérationnel de l'UE avec le Fonds européen de développement régional, n° 2016 - EX000604). Le projet BioMareau a été labellisé par la Zone Atelier Loire du CNRS Loire LTER et le réseau thématique de recherche de la Région Centre-Val de Loire MIDI (Habitat et diversité) et le pôle de compétitivité DREAM Eau et milieux. Michel Chantereau et Damien Hémeray, de la réserve naturelle nationale de Saint-Mesmin, sont reconnus et remerciés pour leur intérêt et leur soutien à nos travaux.

## BIBLIOGRAPHIE

- BAGHDADI N., MALLET C., ZRIBI M., 2018. *Série Utilisation de QGIS en télédétection : Qgis et applications en agriculture et forêt*. Iste éditions. Vol. II, pp. 310-317.
- BAGHDADI N., ZRIBI M., 2016. *Observation des Surfaces Continentales par Télédétection : techniques et méthodes*. Iste éditions. Tome 1, pp. 73-133.
- BENSETTI F., GAUDILLAT V., HAURY J., 2001. *Cahier d'habitats Natura 2000. Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire : Habitats forestiers*. Paris : MATE/MAP/MNHN, La Documentation française. Tome 1 : 339 p. et 423 p.
- BESLIN O., GAZEAU J.-C., 2016. *Système d'Information des Évolutions du Lit de la Loire et de ses affluents. Typologie Cornier révisée des habitats du SIEL (CBNBP 2016). Guide de terrain et de lecture pour la cartographie*. DREAL Centre-Val de Loire ; Conservatoire national du Bassin Parisien, délégation Centre-Val de Loire. pp. 1-27.
- BREIMAN L., 2001. Random Forests. *Maching Learning*, 45, pp. 5-32.
- CORNIER T., 2002. *La Végétation alluviale de la Loire entre le Charolais et l'Anjou : essai de modélisation de l'hydrosystème*. Tours : Université François Rabelais. Écosystèmes. 238 p. [En ligne] disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00853584/document>
- DUFOUR S., MULLER E., STRAATSMA M., CORGNE S., 2012. Image Utilisation for the Study and Management of Riparian Vegetation: Overview and Applications. *Fluvial Remote Sensing for Science and Management*, pp. 1-36.
- DUMAS Y., 2019. Que savons-nous de l'Érable négondo *Acer negundo* L. ? *Naturae*, (10), pp. 257-283.
- DUNFORD R., MICHEL K., GAGNAGE M., PIÉGAY H., TRÉMELO M.-L., 2009. Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *International Journal of Remote Sensing*, vol. XXX (19), pp. 4915-4935.
- GASOWSKI Z., 1994. L'Enfoncement du lit de la Loire. *Revue de Géographie de Lyon*, vol LXIX, pp. 41-45.
- GRIVEL S., GAUTIER E., 2012. Mise en place des îles fluviales en Loire moyenne, du 19<sup>e</sup> siècle à aujourd'hui. *Cybergeo : European Journal of Geography*, document 615 [En ligne] disponible sur : <https://journals.openedition.org/cybergeo/25451> (consulté le 10 mai 2019).
- GURNELL A., 2014. Plants as river system engineers. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. XXXIX, pp. 4-25.
- INGLADA J., CHRISTOPHE E., 2009. The Orfeo Toolbox remote sensing image processing software. *In: Proceedings of the 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Cape Town, South Africa, 12-17 July 2009. Volume 4, pp. IV-733-IV-736.
- LABBÉ S., ROUX B., BÉGUÉ A., LEBOURGEOIS V., MALLAVAN B., 2007. An operational solution to acquire multi-spectral images with standard light cameras : Characterization and acquisition guidelines. *In: Workshop Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems*, Newcastle, Royaume-Uni, 11-14 Septembre 2007.
- LASLIER M., HUBERT-MOY L., DUFOUR S., 2019. Mapping Riparian Vegetation Functions Using 3D Bispectral LIDAR Data. *Water*, 11 (483), pp. 1-19.
- MICHEZ A., PIÉGAY H., LISEIN J., CLAESSENS H., LEJEUNE P., 2016. Classification of riparian forest species and health condition using multi-temporal and hyperspatial imagery from unmanned aerial system. *Environ Monit Assess.*, 188 (146), pp. 1-19.
- NATURE CENTRE, CONSERVATOIRE BOTANIQUE NATIONAL DU BASSIN PARISIEN (CBNBP), 2014. *Livre rouge des habitats naturels et des espèces menacées de la région Centre*. Orléans : Nature Centre édition. 504 p.
- PETTORELLI N., LAURANCE W.F., O'BRIEN T.G., WEGMANN M., NAGENDRA H., TURNER W., 2014. Satellite remote sensing for applied ecologist: opportunities and challenges. *Journal of applied ecology*, LI, pp. 839-848.

- RAPINEL S., BONIS A., OSZWALD J., TAUREAU F., MANSONS J., BOUZILLÉ J.-B., 2015. Cartographie des végétations herbacées des marais littoraux à partir de données topographiques Lidar. *Revue française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 210, pp. 17-21.
- RODRIGUES S., BRÉHÉRET J.-G., MACAIRE J.-J., GREULICH S., VILLAR M., 2006. In-channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the River Loire, France. *Sedimentology*, LIV (1), pp. 223-242.
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SHELL J.A., DEERING D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS pp. 309-317. In: *Third ERTS Symposium, NASA SP-351*. Washington, DC : NASA.
- SELLIN V., MAGNANON S., GOURMELON F., DEBAINE F., NABUCET J., 2015. Étude expérimentale en cartographie de la végétation par télédétection. *Cybergeo : European Journal of Geography*, document 730 [En ligne] disponible sur : <https://journals.openedition.org/cybergeo/27067> (mis en ligne le 13 juin 2015, consulté le 05 juin 2019).

---

### **TÉLÉDÉTECTION DES HABITATS INSULAIRES LIGÉRIENS PAR DRONE : RETOUR D'EXPÉRIENCE SUR LES ÎLES DE MAREAU-AUX-PRÉS (LOIRET) (Résumé)**

Le présent article fait état d'une expérimentation qui s'est déroulée en août 2017 sur un complexe d'îles de Loire d'environ 13 hectares, en aval d'Orléans et dont le sujet portait sur la détection automatique des habitats. Nous avons utilisé un drone couplé à un lidar avec des appareils photos dont un était modifié pour accéder aux infrarouges. Après différentes analyses, nous avons comparé nos prédictions à nos données de terrain classées selon la typologie des habitats de Loire (SIEL). Le kappa moyen (0,52) de notre carte reflète des discontinuités de qualité de prédiction notamment entre les milieux ouverts et semi-ouverts. Pour ces derniers, nos résultats montrent qu'il est préférable de rester au niveau supérieur de classification particulièrement pour les végétations de grèves. En revanche, le point positif de ce retour d'expérience montre que les cariçales, les forêts à bois durs ainsi que dans une moindre mesure les peupleraies noires et les zones à Érable américain, sont correctement prédites.

### **REMOTE SENSING OF ISLAND HABITATS IN THE LOIRE VALLEY USING A DRONE – REPORT ON EXPERIMENT AT ÎLES DE MAREAU-AUX-PRÉS (LOIRET) (Abstract)**

This article reports on an experiment conducted in August 2017 in a group of islands in the Loire river covering some 13 hectares downstream of Orleans involving automated sensing of habitats. We used a drone in combination with a Lidar equipped with photo cameras. One of these cameras was altered to access infrared. Following various analyses, we compared our predictions with our field data categorised under the SIEL (Loire habitats) typology. The kappa value (0.52) of our map reflects discontinuities in the quality of prediction, particularly as between open and semi-open environments. For the latter, our findings show that it is preferable to stay at the upper level of the classification, particularly for bank vegetation. On the other hand, the positive aspect of this feedback is that it shows that sedge meadows, hardwood forests and, to a lesser extent, birch-leaved poplar groves and areas with boxelder maple, are accurately predicted.

---