HAL
open science

Cartographie des zones humides par télédétection : approche multi-scalaire pour une planification environnementale

Sebastien Rapinel, Bernard Clement, Laurence Hubert-Moy

To cite this version:

Sebastien Rapinel, Bernard Clement, Laurence Hubert-Moy. Cartographie des zones humides par télédétection : approche multi-scalaire pour une planification environnementale. Cybergeo : Revue européenne de géographie / European journal of geography, 2019, 10.4000/cybergeo.31606 . hal-02172049

HAL Id: hal-02172049

https://hal.science/hal-02172049v1

Submitted on 30 Sep 2020

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

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

La revue *Cybergeo* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 3.0 non transposé.

Cartographie des zones humides par télédétection : approche multi-scalaire pour une planification environnementale

Delineation and characterization of wetlands using remote-sensing: a multiscalar approach to environmental planning

Sébastien Rapinel, Bernard Clément et Laurence Hubert-Moy

Ces recherches ont été financées par le programme européen Interreg-Water And Territories. Les auteurs remercient Mélanie Ozenne, Olivier Guerri et Guy Pustelnik (EPIDOR) pour leurs échanges constructifs. Les auteurs remercient également Alban Thomas et Cécile Maréchal (LETG) et Yann Jeandenans (SIAH Lizonne) pour leur aide sur le terrain.

Un besoin d'outils pour la planification environnementale

1 Les zones humides, à l'interface entre terre et eau, sont des milieux riches et diversifiés, aux fonctions et valeurs multiples aujourd'hui largement reconnues (Fustec, Lefeuvre, 2000 ; Mitsch, Gosselink, 2007). Néanmoins, ces milieux ont largement régressé au niveau mondial et ont connu de fortes dégradations depuis plusieurs décennies (Maltby, Barker, 2009) en raison des pressions anthropiques, mais aussi du changement climatique (Williams, 1990). L'emprise spatiale et l'état de conservation des zones humides, en particulier dans les paysages fortement anthropisés, représentent actuellement des enjeux environnementaux majeurs, tant au niveau de la ressource en eau (Bullock, Acreman, 2003) que de la biodiversité (Gopal, 2009). Au cours de ces dernières décennies, les dégradations des zones humides causées par l'intensification agricole et l'urbanisation ont contribué non seulement à une réduction de la faune et de la flore mais aussi à une

augmentation de la pollution de l'eau et de la fréquence des étiages et des crues (Acreman, McCartney, 2009).

2 Face à la sensibilité grandissante des acteurs territoriaux et des citoyens vis-à-vis de la disparition des zones humides et de leurs fonctions, l'inventaire, la délimitation, la caractérisation et le suivi de ces milieux sont apparus comme des éléments prioritaires de programmes d'action européens et régionaux visant à la reconquête de la qualité de l'eau et de la biodiversité (Gramond, 2014). Les programmes de recherche menés spécifiquement sur ces milieux ont permis d'apporter des réponses aux questions touchant à leur délimitation et à leur caractérisation (Barnaud, Dausse, 2000 ; Hubert-Moy, 2003), mais aussi à leurs fonctions et valeurs (Maltby, Acreman, 2011). Ces résultats ont été pris en compte en France dans la législation à travers les lois « Développement des Territoires Ruraux » en 2005 (DTR) et la Loi sur l'Eau en 2006 qui reconnaissent les fonctions et valeurs des zones humides dans le dispositif de régulation et de protection des eaux. Néanmoins, la délimitation et l'évaluation des fonctions des zones humides sont encore mal appréhendées, en raison d'une part de l'hétérogénéité et de la dynamique de ces milieux (Maltby, Barker, Linstead, 2009), et d'autre part de l'absence d'outils et de méthodes adaptés (Mahdavi et al., 2017).

3 Les grandes zones humides, en raison de leur biodiversité remarquable, sont pour la plupart connues et inventoriées à travers le monde depuis leur reconnaissance en 1971 lors de la Conférence de Ramsar (Hettiarachchi, Morrison, McAlpine, 2015). De même, les zones humides françaises à caractère patrimonial, qui ont très tôt focalisé l'attention des gestionnaires et des décideurs (Dimitrakopoulos et al., 2010 ; Duncan et al., 1999) sont protégées à travers différents dispositifs tels que les ZNIEFF, sites Natura 2000 ou Parcs Naturels Régionaux. Cependant, il existe un très grand nombre de zones humides qualifiées « d'ordinaires » d'un point de vue patrimonial mais remarquables vis-à-vis des fonctions hydrologiques (atténuation des crues, soutien d'étiages...), biogéochimiques (contribution à l'épuration des eaux, dénitrification...) et écologiques (corridors, habitats naturels...) et qui ne sont pas encore inventoriées. Pour cette raison, les gestionnaires souhaitent non seulement délimiter toutes les zones humides de leur territoire, mais aussi évaluer leurs fonctions afin d'y mener des actions de protection, d'entretien ou de réhabilitation efficaces.

4 Si la délimitation et l'évaluation fonctionnelle des zones humides est applicable *in situ* sur des zones de quelques hectares (Janssen et al., 2005), des difficultés apparaissent sur des sites d'étude de plusieurs centaines d'hectares en raison de la disponibilité partielle des données (Rapinel, Hubert-Moy, Clément, Maltby, 2016). Les données de télédétection, dont l'intérêt pour le suivi spatial et temporel de différents types de milieux a été démontré, peuvent contribuer à une meilleure connaissance des zones humides sur de grandes étendues. Jusqu'à présent, les données de télédétection existantes décrivaient trop grossièrement les zones humides pour évaluer leurs fonctions (Hubert-Moy, Michel, Corpetti, Clément, 2006). Or les avancées technologiques récentes qui ont eu lieu dans l'industrie spatiale ouvrent des perspectives intéressantes pour cela (Mahdavi et al., 2017). Par exemple, la collecte de nouvelles données satellitaires à une très haute résolution spatiale (1-10 mètres) par des capteurs tels que Quickbird, IKONOS ou SPOT-5, permet de réaliser une cartographie détaillée des patches de végétations à une échelle spatiale très fine (Corbane et al., 2015). Les résolutions spectrales (visible et proche-infrarouge) et radiométriques (11 bits, 2048 couleurs) de ces capteurs sont des atouts pour distinguer des nuances au niveau de la structure et de la biomasse de la végétation

(Dusseux, Hubert-Moy, Corpetti, Vertès, 2015). De même, l'exploitation de lasers aéroportés LiDAR offre l'opportunité de restituer finement la micro-topographie et le réseau hydrologique (S Rapinel, Hubert-Moy, Clément, Nabucet, Cudennec, 2015).

5 Cet article vise à développer - tant sur un plan conceptuel que méthodologique - une approche géomatique opérationnelle de délimitation et d'évaluation des fonctions des zones humides sur l'ensemble d'un bassin versant. Cette nouvelle approche basée sur l'exploitation de données de télédétection est destinée à la planification environnementale territoriale. Elle est structurée en trois niveaux scalaires : le premier niveau vise à délimiter les zones humides selon une approche descriptive à l'échelle d'un grand bassin versant (plusieurs milliers de km²) ; le second niveau correspond à l'évaluation des zones humides selon une approche fonctionnelle à l'échelle de petits bassins versants (plusieurs centaines de km²) ; le troisième niveau est focalisé sur la délimitation et l'évaluation fonctionnelle des zones humide selon des observations *in situ* (sites de quelques hectares). Une application de l'approche a été menée sur un sous-bassin versant de 650 km².

Cadre conceptuel : une approche multi-scalaire

6 Les trois niveaux scalaires utilisés pour la cartographie des zones humides selon l'approche que nous proposons sont détaillés dans le Tableau 1.

7 *Le niveau 1*, qui correspond à l'approche descriptive des zones humides, vise à porter à connaissance la présence de zones humides auprès des acteurs territoriaux. Le repérage, la délimitation des zones humides et leur caractérisation grossière en termes d'occupation et d'utilisation des sols sont réalisés à ce niveau. Les zones humides y sont cartographiées à une échelle moyenne (1 :50 000ème) mais sur des superficies importantes (> 1000 km²). Les inventaires réalisés à ce niveau visent à faciliter l'appropriation de ces milieux par les acteurs territoriaux, par exemple à l'échelle régionale d'un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). L'intérêt de ce niveau est qu'il permet de repérer et d'inventorier l'ensemble des zones humides, parmi lesquelles des sites qualifiés de banals sur le plan de la biodiversité mais pouvant présenter un fort potentiel vis-à-vis d'autres fonctions.

8 *Le niveau 2* correspond à l'approche fonctionnelle. Il vise à élaborer un système d'aide à la décision pour la planification des documents d'urbanisme et d'aménagement du territoire (SCOT, PLU, SAGE...). Ce niveau est celui de la caractérisation des fonctions des zones humides et de leur évaluation. En effet, la préservation et la restauration des zones humides nécessitent de qualifier leurs principales fonctions à partir d'une démarche diagnostique à l'échelle du territoire où elles s'expriment (10-1000 km²). A ce deuxième niveau, les zones humides sont cartographiées à une échelle fine (1 :10 000) pour évaluer - *i.e.* estimer qualitativement - la performance de leurs fonctions. La caractérisation des végétations naturelles et du réseau hydrographique permet de conduire un diagnostic de la zone humide. La végétation est un des intégrateurs de l'hydrodynamique passée et présente et un indicateur du degré d'humidité et de fertilité des sols (Bouzillé, 2014). Ainsi, la caractérisation de la végétation permet de repérer des phénomènes hydrodynamiques se déroulant sur un pas de temps significatif, alors que des variations accidentelles, telles que des épisodes de crue isolés et de courte durée, n'auront pas d'impact sur l'évolution de la végétation. Ainsi, le développement d'une démarche d'évaluation des fonctions des zones humides sur l'ensemble d'un bassin versant suppose

donc de caractériser la végétation à un niveau de précision détaillé (1 :10 000ème). Par ailleurs, les cours d'eau et fossés conditionnent une partie de l'hydrodynamique d'une zone humide. C'est pourquoi l'établissement d'une cartographie exhaustive du réseau hydrographique à l'échelle d'un bassin versant est également nécessaire pour pouvoir procéder à l'évaluation fonctionnelle des zones humides.

9 *Le niveau 3* correspond à l'approche terrain. Il est celui de l'aide à la gestion réalisée sur des sites de quelques ha pour mettre en œuvre une démarche diagnostic *in situ* (relevés géomorphologiques, de sols et de végétations) en vue d'entreprendre, le cas échéant, des actions de conservation, de restauration ou de réhabilitation des états et des fonctions des zones humides. C'est à ce niveau que s'appliquent les textes réglementaires tels que la Loi sur l'eau et les milieux aquatiques. Les fonctions des zones humides sont évaluées qualitativement sur le terrain à partir d'approches développées dans le cadre de plusieurs programmes de recherche européens qui ont permis de mesurer et de comprendre le fonctionnement des zones humides dans le temps et l'espace sur une quinzaine de sites à travers l'Europe (Maltby, Barker, 2009). Pour cela, des zones humides de « calibration » ont été sélectionnées dans des régions climatiques contrastées de l'Europe de l'ouest allant de l'Irlande à l'Espagne. Sur chaque site, les processus ont pu être étudiés spécifiquement à partir des mesures effectuées régulièrement sur des variables physico-chimiques. Ces programmes de recherche ont démontré que l'intensité d'une fonction est la même au sein d'entités spatiales ayant une hydrodynamique homogène : les Unités HydroGéoMorphologiques ou HGMU (Cole, 2006). Ainsi, des relations ont été établies sur l'existence de fonctions spécifiques aux HGMU comme par exemple l'élimination et la rétention de nitrates (Maltby, Mockler, McInnes, 1996), l'écrêtage de crues (Acreman, Holden, 2013) ou la fonction habitat (Maltby, Barker, 2009). Sur la base de ces travaux scientifiques, une procédure d'évaluation fonctionnelle des zones humides a été développée à destination des gestionnaires. Elle permet, à partir de la combinaison d'observations terrain sur la pédologie, la géomorphologie ou encore la végétation, de délimiter les HGMU puis d'évaluer une ou plusieurs fonctions à l'échelle d'un site : la méthodologie détaillée destinée aux gestionnaires est présentée dans l'ouvrage de Maltby (2009) et a été adaptée en France (Gayet et al., 2017). C'est le niveau le plus couramment utilisé par les acteurs territoriaux pour la cartographie des zones humides.

Tableau 1 : Les trois niveaux scalaires utilisés pour la cartographie des zones humides

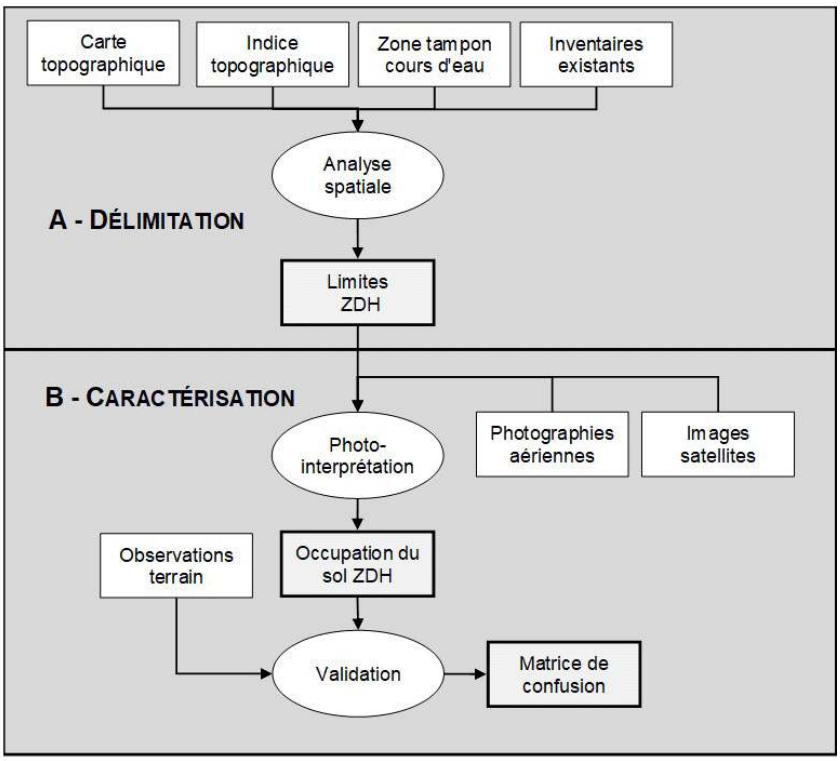
Niv.	Étude	Échelle	Superficie	Description	Planification environnementale
1	Descriptive	1/50 000	> 1000 km²	Délimitation et caractérisation grossières	Porté à connaissance
2	Fonctionnelle	1/10 000	10-1000 km²	Caractérisation fine et évaluation fonctionnelle	Aide à la décision
3	Terrain	1/2 000	< 10 km²	Relevés (géomorphologie, sols, végétations)	Aide à la gestion

Cadre méthodologique

Étude descriptive (niveau 1)

10 L'approche descriptive repose sur une méthode qui combine traitements analogiques et numériques, données géomatiques et terrain. Son échelle de validité est le 1 :50 000ème. L'unité minimale de cartographie a été fixée à 1 hectare. Son intérêt est de produire une cartographie homogène, sur de grands territoires, des zones à dominante humide (ZDH), c'est-à-dire des enveloppes de zones humides effectives (Mérot et al., 2006). La méthode développée pour cartographier des ZDH comprend une première étape de délimitation et une seconde étape de caractérisation (Figure 1). La délimitation des ZDH repose sur la combinaison (analyse spatiale additive) de plusieurs couches géographiques : 1- le fond topographique (scan25®, IGN), qui permet d'identifier les fonds de vallée grâce aux courbes de niveaux ; 2- un indice topographique (Beven, Kirkby, 1979) calculé à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de la BD Alti ®(IGN) qui estime les secteurs potentiellement hydromorphes ; 3- les zones tampon autour des cours d'eau et plans d'eau identifiés sur la BD Carthage® (IGN) ; 4- les inventaires existants tels que les ZNIEFF, les sites Natura 2000 et autres inventaires jugés majoritairement humides (Inventaire National du Patrimoine Naturel). Dans une seconde étape, les ZDH sont caractérisées selon une typologie comprenant 8 classes : 1- les eaux de surface ; 2- les formations forestières humides ; 3- les prairies humides ; 4- les tourbières, landes, roselières et mégaphorbiaies ; 5- les zones humides littorales ; 6- les terres arables ; 7- les zones urbaines et artificialisées et 8- les mosaïques d'entités < 1ha. Pour cela, une photo-interprétation basée sur des photographies aériennes et complétée par une image satellite à haute résolution spatiale (10-30 m) est effectuée au sein des ZDH. Des missions terrain, qui combinent des collectes de relevés pédologiques avec des observations de végétation, sont effectuées pour valider la cartographie des ZDH. Cette méthodologie a déjà été appliquée avec succès sur l'ensemble du bassin versant de Seine-Normandie (I-MAGE CONSULT, 2006).

Figure 1 Méthode de cartographie des zones à dominante humide (ZDH) - niveau 1



Étude fonctionnelle (niveau 2)

11 L'objectif à ce niveau est d'adapter l'approche *Functional Assessment Procedure* (FAP) - initialement développée pour des sites de quelques hectares - afin de l'appliquer sur des sites de plus d'une centaine de Km². Autrement dit, il s'agit d'élaborer des indicateurs fonctionnels à partir des couches d'informations dérivées de données de télédétection. À ce niveau, l'analyse fonctionnelle des zones humides comporte quatre échelles d'analyse emboîtées allant de l'observation à la planification (Figure 2).

L'observation

12 L'observation des zones humides s'effectue par télédétection à l'échelle du pixel, unité élémentaire d'une image. La complexité de la structure paysagère des zones humides et des variations micro-topographiques induit l'utilisation de données de télédétection à très haute résolution spatiale (1-10 m). Plus précisément, trois types de données sont nécessaires : (i) les données aéroportées LiDAR à partir desquelles sont calculées un modèle numérique de terrain (MNT) et un modèle numérique de canopée (MNC) avec des précisions altimétriques centimétriques ; (ii) une image multispectrale de type SPOT-5 acquise durant la période végétative et incluant *a minima* une bande rouge et une bande infrarouge et (iii) une photographie aérienne avec une résolution sub-métrique.

La caractérisation

13 La caractérisation des zones humides passe par la classification des données de télédétection qui consiste à affecter les pixels de l'image à des classes thématiques selon

une nomenclature donnée. La superficie d'un objet varie d'une dizaine (ex. : un arbre) à une centaine de pixels (ex. : une prairie). Au total, quatre couches thématiques, qui constituent les variables de contrôle des processus fonctionnels, sont produites : (i) une carte du réseau hydrographique – incluant les fossés – dérivée automatiquement du MNT LiDAR par l'application d'un filtre linéaire puis corrigée par photo-interprétation (voir Rapinel et al., (2015) pour une description complète de la méthode) ; (ii) une carte des végétations obtenue en combinant le MNT et le MNC LiDAR avec l'image multispectrale par classification orientée-objet (voir (Rapinel, Hubert-Moy, Clément, (2015) pour une description complète de la méthode) ; (iii) une carte de biomasse estimée à partir de l'indice de végétation NDVI lui-même calculé avec les bandes rouges et proche infrarouge de l'image multispectrale ; et (iv) une carte du mode de gestion des prairies déclinée en deux classes (fauche et pâture) et issue de l'interprétation de la texture de la photographie aérienne.

L'évaluation des fonctions

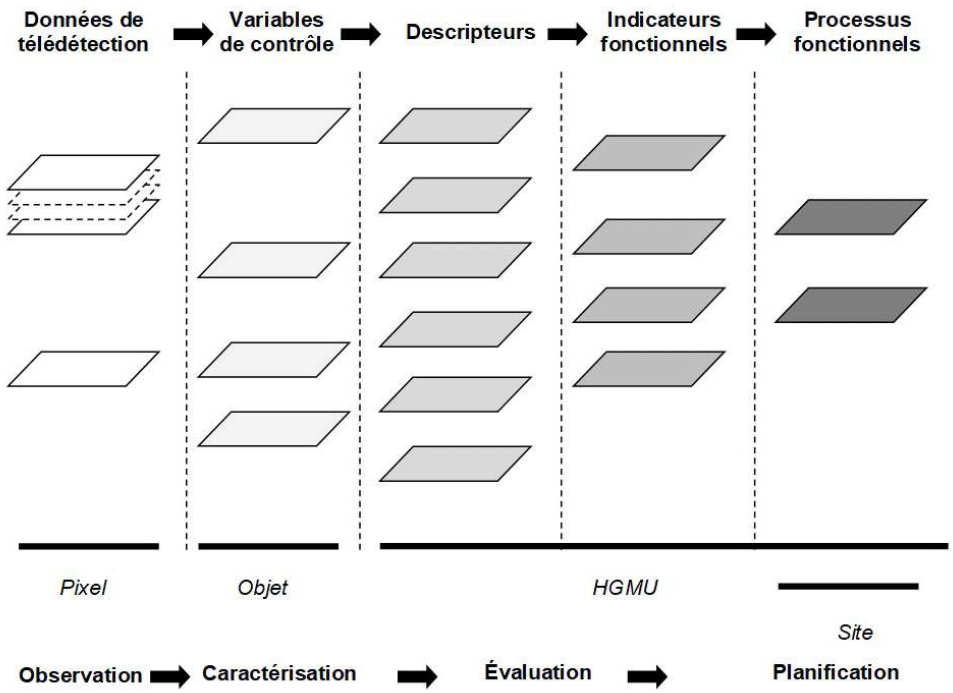
14 L'évaluation des fonctions des zones humides s'effectue à l'échelle des HGMU. La superficie d'une HGMU est généralement comprise entre 0,5 et 5 hectares. Les HGMU sont délimitées à partir du MNT LiDAR sur lequel est appliquée une segmentation qui regroupe des pixels adjacents ayant des valeurs altimétriques similaires (Rapinel, 2012). La détermination de la performance d'une fonction est basée sur la performance d'un ou plusieurs processus sous-jacents - décrits par des indicateurs fonctionnels – eux-mêmes basés sur le degré de fonctionnement des descripteurs – décrits par des variables de contrôle (Maltby, 2009). Ainsi, chaque descripteur ou groupe de descripteurs est utilisé comme élément de calibration d'un processus relevant d'une fonction donnée (Figure 2). Par exemple, les haies et leur connectivité participent à l'évaluation de la fonction écologique. Dans un premier temps, un lot de 19 descripteurs est produit à partir des 4 couches thématiques dérivées des données de télédétection. Dans un second temps, une analyse multicritère est appliquée : 14 indicateurs fonctionnels sont produits à partir de la combinaison des descripteurs ; et 4 fonctions (écrêtage de crue, soutien à l'étiage, dénitrification et habitat) sont évaluées à travers la combinaison des indicateurs fonctionnels. Les scores des processus fonctionnels sont classés par intervalles égaux en 5 classes d'intérêts fonctionnels : très faible, faible, moyenne, forte et très forte.

15 La description complète de la méthode d'évaluation des fonctions ainsi que les définitions détaillées de chaque descripteur et indicateur fonctionnel sont publiées dans Rapinel et al. (2016).

La planification

16 Afin de faciliter la lecture des cartes réalisées, les résultats d'évaluation fonctionnelle sont agrégés par site dont la superficie est comprise entre 10 et 100 ha. Le site correspond à l'unité de gestion des zones humides. Les limites des sites ont été extraites par photo-interprétation des cartes des végétations, du MNT LiDAR, des limites des zones humides et des limites des sous bassins versants. Pour chaque fonction un score global est affecté par site : il correspond à la moyenne des valeurs des processus fonctionnels pondérée par la superficie de chacune des HGMU qui le compose.

Figure 2 Évaluation multicritère des fonctions des zones humides - niveau 2

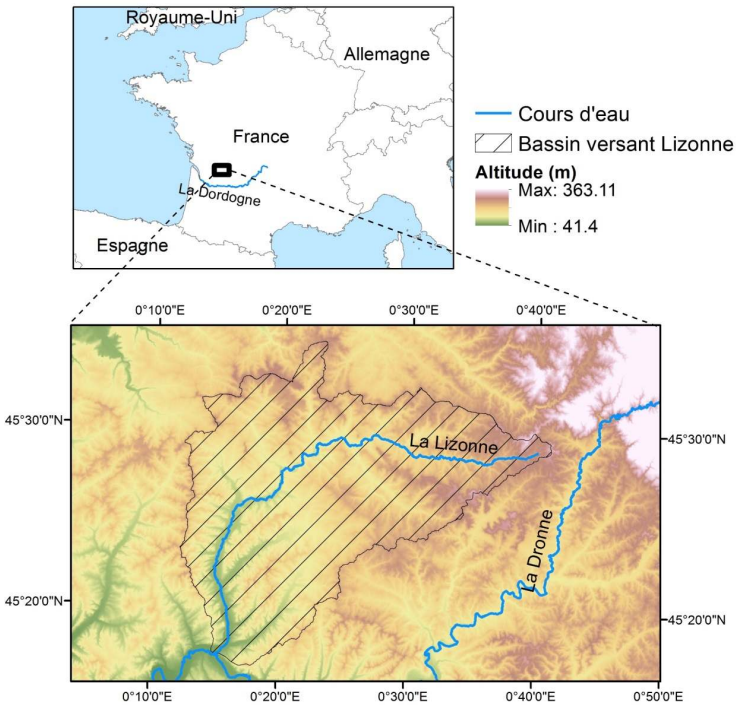


Application au bassin versant de la Lizonne, France

17 Le bassin versant de la Lizonne, d'une superficie de 650 km², est situé au sud-ouest de la France. Il s'agit d'un sous-bassin versant de la Dordogne (Figure 3). Le climat y est de type océanique dégradé avec des hivers doux, des étés chauds et un cumul annuel de précipitations compris entre 800 et 1 000 mm/an. Les zones humides du sous-bassin versant de la Lizonne présentent des contextes géomorphologiques variés avec la présence de zones de tourbières, de vastes plaines alluviales associées à d'anciens chenaux ou bien encore de vallées étroites et encaissées. Le dénivelé y est marqué entre les plateaux calcaires amont situés à 250 mètres et l'exutoire du sous-bassin situé à 50 mètres d'altitude. Plusieurs zones humides du sous-bassin versant sont dégradées par l'agriculture céréalière intensive (terres arables). Ce mode de gestion agricole, qui nécessite à la fois un drainage des sols et une irrigation importante, engendre des étiages estivaux sévères depuis les années 1990 (Lemoine, 2009). A l'inverse, les zones humides situées en amont du sous-bassin versant sont protégées et inclues dans les périmètres du Parc Naturel Régional (PNR) du Périgord-Limousin et Natura 2000.

18 Dans ce contexte, les gestionnaires cherchent à limiter les étiages du sous-bassin versant en restaurant les fonctions hydrologiques des zones humides.

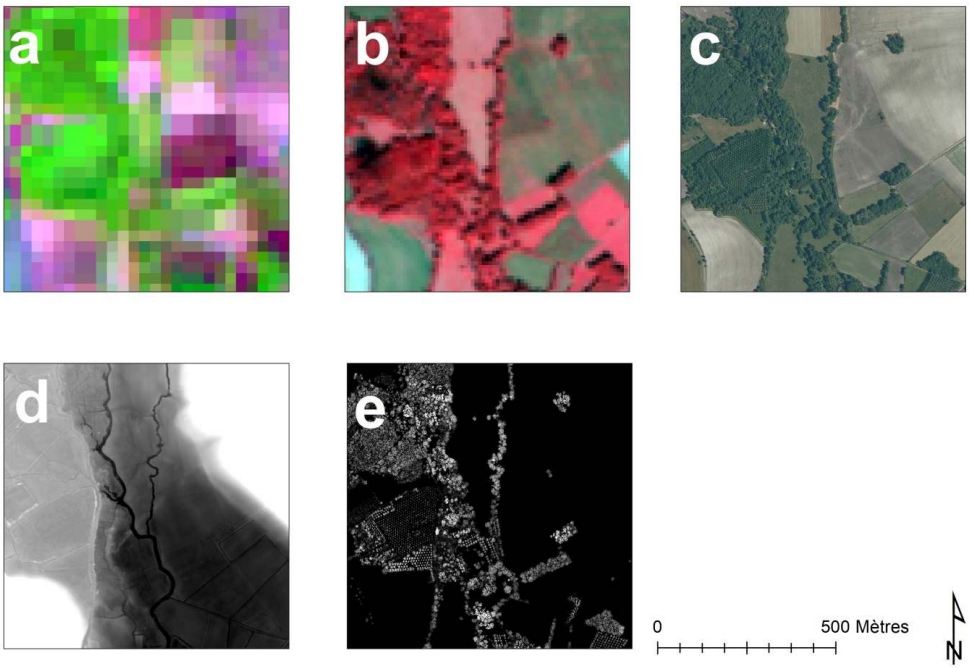
Figure 3 Présentation du site d'étude (Source : IGN BD ALTI, BD CARTHAGE)



Données

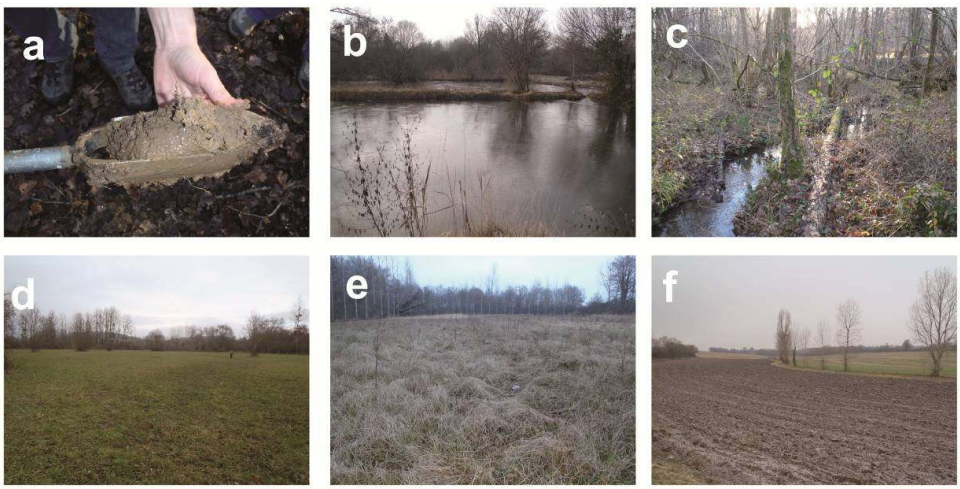
19 La base de données SIG est constituée d'images de télédétection, de couches thématiques et d'observations terrain. Les données de télédétection incluent : (i) une image satellite Landsat-5 TM acquise le 14 juin 2006 dans le visible et le proche et moyen infrarouge à une résolution spatiale de 30 m ; (ii) une image SPOT-5 acquise le 25 septembre 2009 dans le visible et le proche et moyen infrarouge à une résolution de 10 m ; (iii) une photographie aérienne (BD ORTHO®, IGN) acquise le 25 mai 2009 dans le visible à une résolution de 0,5 m et (iv) des données LiDAR aéroportées acquises pour l'Établissement Public Territorial du Bassin de la Dordogne (EPIDOR) entre le 11 mars et le 16 mars 2010 avec un densité de 4 points/m². Un MNT et un MNC avec une résolution spatiale de 0,5 m ont été dérivés des données LiDAR. L'ensemble des données de télédétection utilisées est présenté Figure 4. En complément, des couches thématiques décrivant la topographie et le réseau hydrographique (Scan 25, BD ALTI, BD Carthage ®) ont été collectées auprès de l'IGN et des couches décrivant les milieux naturels (ZNIEFF, zone NATURA 2000) ont été collectées auprès de l'inventaire national du patrimoine naturel (INPN).

Figure 4 Données de télédétection utilisées pour cartographier les zones humides du bassin versant de la Lizonne : (a) image Landsat-5 (composition colorée rouge, proche-infrarouge & moyen-infrarouge) ; (b) image SPOT-5 (composition colorée : vert, rouge & proche-infrarouge) ; (c) photographie aérienne (BD ORTHO, IGN) ; (d) modèle numérique de terrain LiDAR et (e) modèle numérique de canopée LiDAR.



20 Une mission terrain, effectuée en collaboration avec les gestionnaires du sous-bassin versant, s'est déroulée en décembre 2010 pour valider les cartes dérivées des données de télédétection. Lors de cette mission, 35 relevés de sols et de végétations ont été collectés (Figure 5).

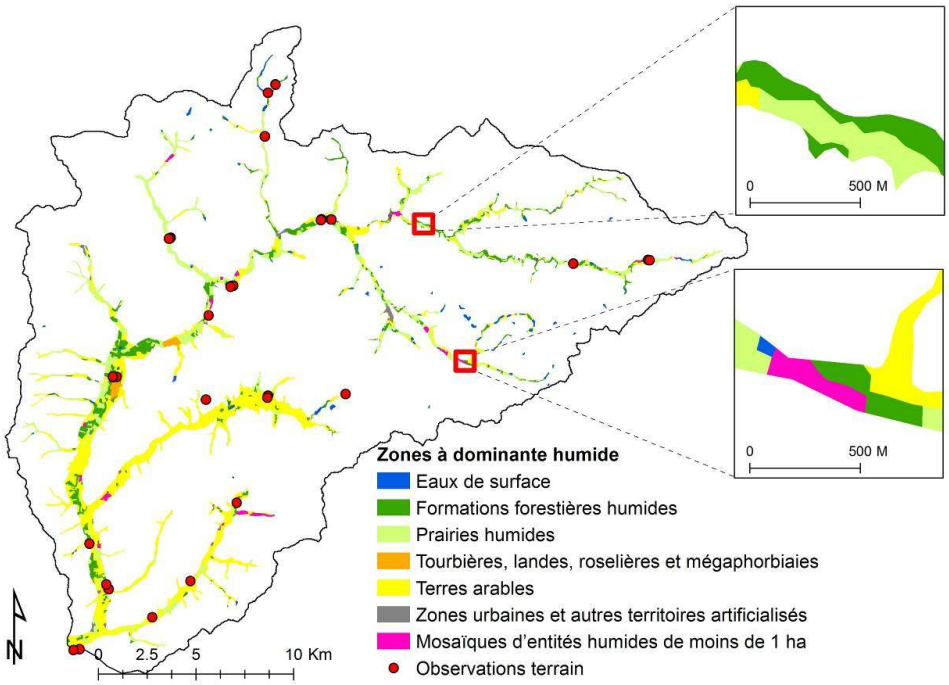
Figure 5 Photographies caractérisant le sol et la végétation des zones humides : a- sol hydromorphe, b- eaux de surface, c- formations forestières humides, d- prairies humides, e- tourbières, f- terres arables. Crédits photos : Auteurs, décembre 2010



Cartographie descriptive des zones humides (Niveau 1)

21 L'inventaire des zones humides a été effectué en 2009 par un bureau d'étude à la demande de d'EPIDOR qui souhaitait disposer d'un document de porter à connaissance à destination des élus locaux. Il constitue une « situation zéro » pour suivre l'évolution des zones humides du sous-bassin versant. Les résultats cartographiques obtenus révèlent que les zones humides représentent environ 9 % de la superficie totale du sous-bassin versant (Figure 6). Elles sont majoritairement composées de terres arables (47,6 % de la surface totale) situées à l'aval du sous-bassin versant. Les prairies humides et les formations forestières humides, qui représentent respectivement 28,1 et 16.2 % de la superficie totale des zones humides, sont essentiellement localisées sur la partie amont du sous-bassin versant même si plusieurs peupleraies sont localisées sur les parties intermédiaires et aval de la Lizonne. Les tourbières représentent 1 % de la surface totale et sont concentrées sur deux sites dans la partie intermédiaire de la vallée de la Lizonne.

Figure 6 Zones à dominante humide (Niveau 1). Sources : carte zones humides : EPIDOR ; observations terrain : Auteurs



22 L'analyse de la matrice de confusion (Tableau 2) montre des résultats satisfaisants (précision globale 80 %, indice de Kappa 0,74). La reconnaissance, par photo-interprétation, des eaux de surface, des formations forestières humides et des mosaïques de zones humides < 1 ha est fiable (erreurs de sous-détection et de sur-détection < 15 %). Pour les autres classes, quelques confusions peuvent être soulignées : les prairies humides sont parfois confondues avec les tourbières ou les terres arables, ceci pouvant s'expliquer par des physionomies de végétation très proches et/ou des décalages temporels entre les dates d'acquisition des données de télédétection et la mission terrain. Par ailleurs, une petite parcelle de terre arable (largeur < 50 m) située en tête de zone humide a été classée en zone non humide : cette erreur n'est pas liée à un problème de photo-interprétation de l'image Landsat ou la photographie aérienne mais plutôt à l'échelle cartographique de

restitution. En effet, au niveau 1, l'échelle de restitution (1 :50 000ème) a été définie en fonction des données ayant la plus faible résolution spatiale, à savoir le modèle numérique de terrain issu de la BD ALTI (IGN) à 50 m. A cette échelle, les petites zones humides de tête de bassin versant ne sont pas identifiées. L'intégration d'un MNT issu du référentiel à grande échelle récemment mis à disposition par l'IGN combinée à l'exploitation d'une série temporelle satellitaire à très haute résolution spatiale de type SPOT-5/6 ou Sentinel-1/2 affinerait l'échelle cartographique de restitution. Ceci permettrait d'une part de préciser la limite externe des petites zones humides (Rapinel, Clément, Dufour, Hubert-Moy, 2018) et d'autre part de mieux discriminer les différentes unités de végétation au sein de la zone humide (Amani, Salehi, Mahdavi, Brisco, 2018).

Tableau 2. Matrice de confusion entre la carte des zones humides et les observations terrain (EC = erreur de sur-détection en %, EO = erreur de sous-détection en %)

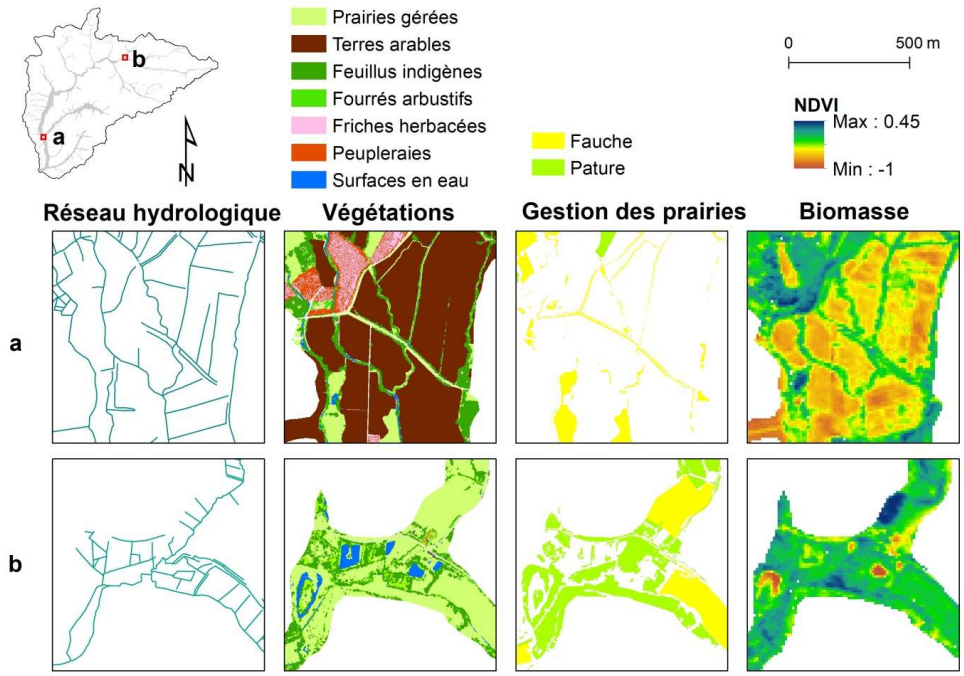
		Observations terrain								
Photo-interprétation	Code	1	2	3	4	5	6	7	8	EC
Eaux de surface	1	3								0
Formations forestières humides	2		7		1					12
Prairies humides	3			11	3					22
Tourbières, landes, roselières	4				1					0
Terres arables	5			2		3				40
Zones urbaines	6									
Mosaïques humides < 1 ha	7							1		0
Zones non humides	8					1			2	33
EO		0	0	15	80	25		0	0	
Précision globale (%)	80									
Indice de Kappa	0.74									

Cartographie des fonctions des zones humides (Niveau 2)

23 Les variables de contrôle des processus fonctionnels ont été déterminées à partir de données de télédétection à très haute résolution spatiale (Figure 7). La longueur cumulée du réseau hydrographique est de 840 km. Une forte variabilité de la densité de ce réseau est observée au sein du sous-bassin versant (entre 1 à 120 m de linéaire /ha) avec une densification progressive vers l'aval et dans les secteurs où la zone humide est la plus large, c'est-à-dire la branche principale de la Lizonne et ses principaux affluents. La

végétation a été classée avec une précision de 96 % (Rapinel, 2012). Les terres arables constituent la classe majoritaire (37,4 % de la superficie totale des zones humides). Situées principalement sur la partie avale des zones humides du sous-bassin versant, elles sont présentes ponctuellement sur la partie amont. Les surfaces en prairies gérées représentent près d'un tiers de la superficie totale des zones humides. A l'inverse des terres arables, celles-ci sont essentiellement présentes sur la partie amont des zones humides du sous-bassin versant. Les friches herbacées représentent 22,4 % de la superficie totale des zones humides et sont souvent associées à des formations de fourrés arbustifs (5,6 %) et de feuillus indigènes (13,1 %). La présence de ces formations végétales traduit un abandon des pratiques de gestion agricoles. Elles sont localisées dans la partie amont des zones humides, en particulier dans les secteurs les plus encaissés et les plus étroits. Les peupleraies, qui en représentent 4,0 %, sont majoritairement localisées sur la partie intermédiaire et avale de la vallée de la Lizonne. Les surfaces en eau représentent 2,3 % de la superficie totale des zones humides. Le mode de gestion des prairies est majoritairement caractérisé par du pâturage (76 % de la surface totale des prairies). L'indice de végétation dérivé de l'image SPOT-5 à 10 m de résolution spatiale met en évidence des variations de biomasse inter et intra-parcellaires : les valeurs de NDVI négatives traduisent une absence de végétation alors que les valeurs proches de 0,4 traduisent une forte biomasse.

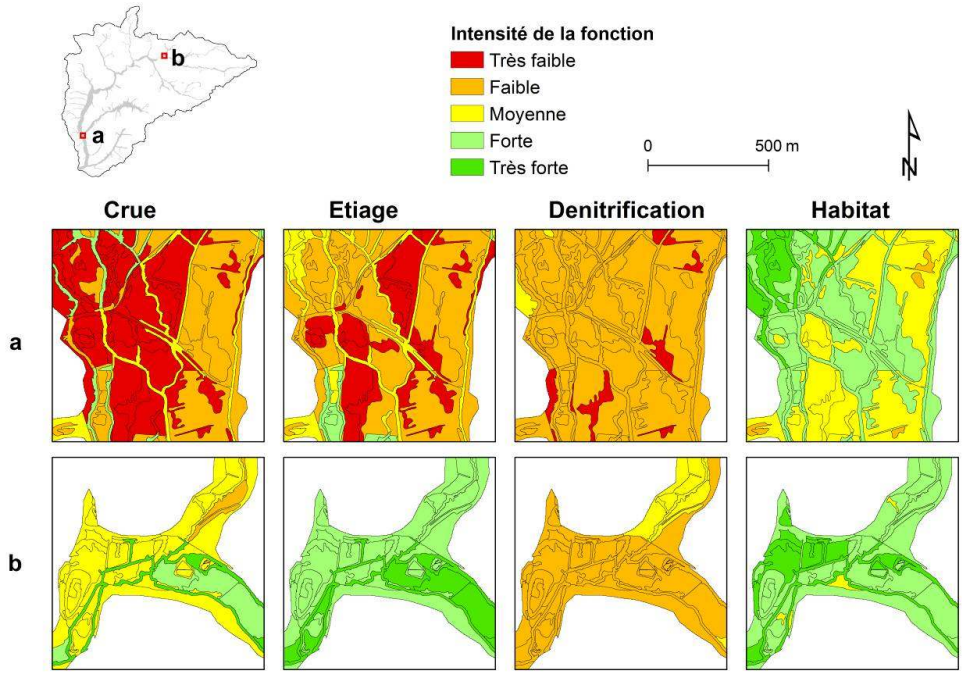
Figure 7 Variables de contrôle extraites des données de télédétection utilisées pour l'évaluation fonctionnelle des zones humides



24 Plus de 6400 HGMU ont été cartographiées sur l'ensemble des zones humides du sous-bassin versant de la Lizonne. La superficie des HGMU est variable et comprend aussi bien des petites unités inférieures à 0,1 ha que de vastes zones supérieures à 20 ha. Au total, 159 sites d'une superficie comprise entre 5 et 465 ha ont été cartographiés sur le sous-bassin versant. Cette carte des sites est emboîtée avec les limites des HGMU.

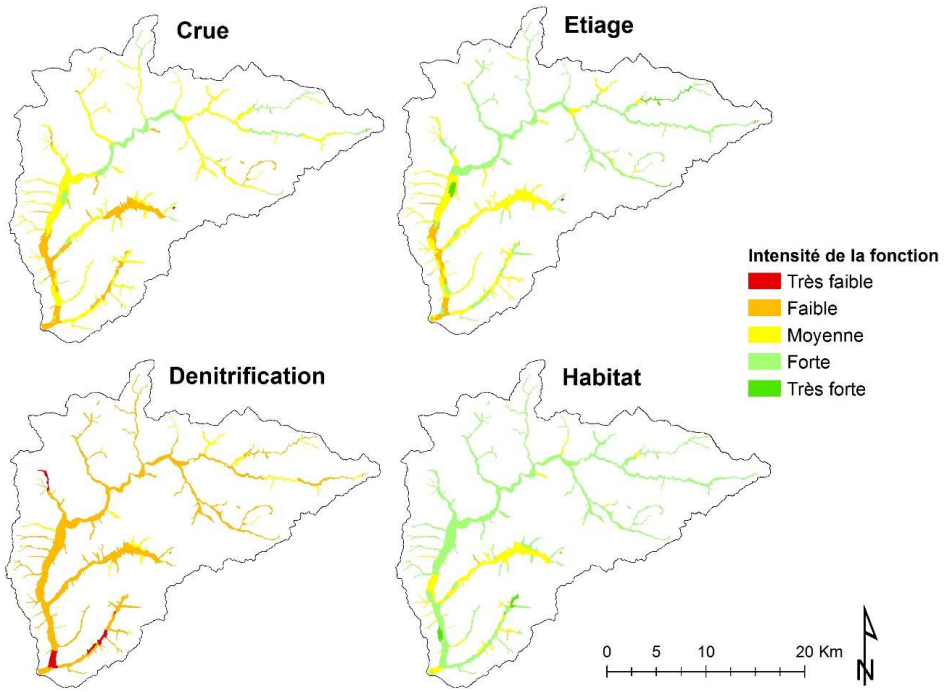
25 Les résultats détaillés à l'échelle des HGMU montrent les disparités spatiales de l'état fonctionnel de la zone humide au sein d'un même site (Figure 8). Par exemple, pour la fonction « soutien à l'étiage », la majorité du secteur aval a un faible intérêt, certaines HGMU correspondant toutefois à des prairies préservées qui ont un potentiel fort (Figure 8, a). A l'inverse, pour le même secteur aval, le potentiel d'habitat est essentiellement moyen à fort avec néanmoins certaines HGMU de faible intensité située sur des parcelles de cultures intensives sans présence de haies bocagères. La comparaison des intensités des quatre fonctions illustre bien les antagonismes entre ces fonctions : par exemple, sur le secteur amont le potentiel d'écrêtage de crue et de dénitrification est majoritairement faible à moyen alors que le potentiel de soutien à l'étiage ou d'habitat est fort à très fort (Figure 8, b).

Figure 8 Spatialisation des fonctions des zones humides à l'échelle des HGMU (Niveau 2).



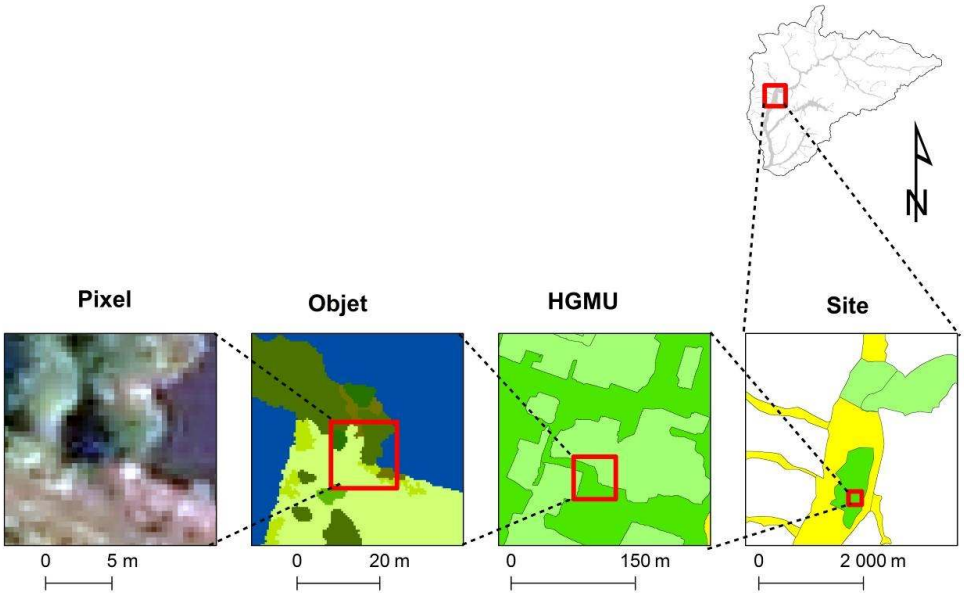
26 La figure 9 illustre la spatialisation des quatre fonctions des zones humides étudiées sur l'ensemble du sous-bassin versant de la Lizonne. Pour la fonction « écrêtage de crue », 42 % des zones humides ont un intérêt moyen et 29 % un intérêt faible. Le potentiel de soutien à l'étiage est essentiellement moyen (34 %) à fort (36 %) sur le sous-bassin versant. Une dichotomie spatiale nette est observée pour cette fonction, les intensités d'intérêt les plus fortes étant observées en amont et les plus faibles à l'aval. Le potentiel de dénitrification est majoritairement faible sur l'ensemble des zones humides (83 %), aucun secteur ne présentant d'intérêt fort. Ceci s'explique par l'importance du réseau de fossés qui empêche l'entrée et le stockage d'azote dans la zone humide. Le potentiel d'habitat pour les espèces de milieux humides est essentiellement fort (63 %). Il est néanmoins moyen (24 %) sur certaines vallées dégradées par l'agriculture intensive et où les trames vertes et bleues sont discontinues, voire absentes.

Figure 9 Spatialisation des fonctions des zones humides à l'échelle des sites sur le bassin-versant de la Lizonne



27 La dimension multi-scalaire de l'analyse fonctionnelle est illustrée figure 10. Au niveau scalaire le plus fin, la résolution des pixels (~ 1 m) est suffisante pour détecter la végétation et le réseau hydrographique des zones humides. Ces éléments ont été cartographiés sous forme d'objets. L'évaluation fonctionnelle a été menée à l'échelle des HGMU. L'échelle la plus grossière et aussi la plus synthétique est celle des sites, qui correspond à des unités de gestion territoriale. Cette dimension multiscalaire est à considérer dans toute action de restauration ou de compensation des zones humides : pour une même fonction, un site peu présenter différentes potentialités, elles-mêmes structurées par la géomorphologie, la végétation et le réseau hydrographique. L'évaluation des fonctions des zones humides, même à l'échelle d'un site, nécessite des données d'observation de la Terre suffisamment résolues spatialement pour détecter et caractériser finement les éléments structurant la zone humide.

Figure 10 Analyse multi-scalaire des zones humides : de l'observation (pixel) à la planification (site)



Conclusion

28 L'approche proposée dans cet article est novatrice car elle permet, à partir de données de télédétection, d'inventorier, de délimiter, de caractériser les zones humides et d'évaluer leurs fonctions sur l'ensemble d'un bassin versant de plusieurs centaines à milliers de km². Si les parties descriptive (niveau 1) et fonctionnelle (niveau 2) avaient déjà été expérimentées une fois (sur le bassin versant Seine-Normandie et sur les marais du Couesnon respectivement), il s'agit de la première application de l'approche dans sa globalité sur un même site. Les résultats soulignent d'une part la complémentarité des deux niveaux scalaires d'analyse et d'autre part l'opérationnalité de la démarche. En effet, les données de télédétection utilisées sont accessibles à bas coût (portail de diffusion Equipex GEOSUD, Pôle de données THEIA). Environ trois mois ont été nécessaires pour appliquer cette approche multi-scalaire sur le sous-bassin versant de la Lizonne (640 km²) répartis comme suit : deux journées de relevés terrain, deux semaines pour la délimitation et la caractérisation des ZDH, deux mois pour l'extraction des variables de contrôle et 1 semaine pour l'évaluation des fonctions. Cette approche multi-scalaire constitue un outil de planification pour les acteurs territoriaux, que ce soit pour des actions de porter à connaissance, d'aide à la décision ou d'aide à la gestion. Elle répond à des enjeux de maintien et/ou de restauration des ressources en eau et de la biodiversité, et permet de cibler les actions de conservation ou de compensation à entreprendre à travers la localisation des sites les plus intéressants d'un point de vue fonctionnel.

BIBLIOGRAPHIE

Acreman M. C., McCartney M. P., 2009, "Hydrological Impacts in and around wetlands", *The wetlands handbook*, 643–666.

Acreman M., Holden J., 2013, How Wetlands Affect Floods », Wetlands, Vol.33, No.5, 773-786.

Amani M., Salehi B., Mahdavi S., Brisco B., 2018, "Spectral analysis of wetlands using multi-source optical satellite imagery", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol.144, 119-136.

Barnaud G., Dausse A., 2000, "Vers une standardisation des méthodes d'identification de détermination, de délimitation des zones humides", *ZH, Infos*, Vol.29.

Beven K., Kirkby M., 1979, "A physically based, variable contributing area model of basin hydrology", *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol.24, No.1, 43–69.

Bullock A., Acreman M., 2003, "The role of wetlands in the hydrological cycle", *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol.7, No.3, 358-389.

Cole C. A., 2006, "HGM and wetland functional assessment: Six degrees of separation from the data?", Ecological Indicators, Vol.6, No.3, 485-493.

Corbane C., Lang S., Pipkins K., Alleaume S., Deshayes M., García Millán V. E., et al., 2015, "Remote sensing for mapping natural habitats and their conservation status – New opportunities and challenges", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.37, 7-16.

Dimitrakopoulos P. G., Jones N., Iosifides T., Florokapi I., Lasda O., Paliouras F., et al., 2010, "Local attitudes on protected areas: Evidence from three Natura 2000 wetland sites in Greece", *Journal of Environmental Management*, Vol.91, No.9, 1847-1854.

Duncan P., Hewison A. J. M., Houte S., Rosoux R., Tournebize T., Dubs F., et al., 1999, "Long-term changes in agricultural practices and wildfowling in an internationally important wetland, and their effects on the guild of wintering ducks", *Journal of Applied Ecology*, Vol.36, No.1, 11-23.

Dusseux P., Hubert-Moy L., Corpetti T., Vertès F., 2015, "Evaluation of SPOT imagery for the estimation of grassland biomass", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.38, 72-77.

Fustec E., Lefeuvre J. C., 2000, Fonctions et valeurs des zones humides. 426 p .

Gayet G., Baptist F., Caessteker P., Clement B., Gaucherand S., Isselin-Nondedeu F., et al., 2017, "Une méthode nationale pour évaluer les fonctions des zones humides dans le cadre de la compensation écologique des impacts", *Sciences Eaux & Territoires*, No.24, 60-65.

Gopal B., 2009, "Biodiversity in wetlands", The wetlands handbook, 65–95.

Gramond D., 2014, "Requalifier les zones humides continentales : Logiques et paradoxes", *Géocarrefour*, Vol.88, No.4, 247-256.

Hettiarachchi M., Morrison T. H., McAlpine C., 2015, "Forty-three years of Ramsar and urban wetlands", *Global Environmental Change*, Vol.32, 57-66.

Hubert-Moy L., 2003, "Approches spatiales des zones humides dans le PNRZH", Photo-Interprétation. *European Journal of Applied Remote Sensing*, Vol.39, No.1, 12-15.

Hubert-Moy L., Michel K., Corpetti T., Clément B., 2006, "Object-oriented mapping and analysis of wetlands using SPOT 5 data", 3347-3350 in: *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Denver.

I-MAGE CONSULT., 2006, Cartographie des zones humides du bassin Seine-Normandie. AESN.

Janssen R., Goosen H., Verhoeven M. L., Verhoeven J. T. A., Omtzigt A. Q. A., Maltby E., 2005, "Decision support for integrated wetland management", *Environmental Modelling & Software*, Vol.20, No.2, 215-229.

Lemoine Y., 2009, *Suivi et analyse de l'étiage 2009 et de sa gestion sur le bassin versant de la Lizonne*. EPIDOR.

Mahdavi S., Salehi B., Granger J., Amani M., Brisco B., Huang W., 2017, "Remote sensing for wetland classification: a comprehensive review", *GIScience & Remote Sensing*, Vol.55, No.5, 623-658.

Maltby E. (Éd.)., 2009, *Functional Assessment of Wetlands: Towards Evaluation of Ecosystem Services*. Cambridge, 672 p .

Maltby E., Acreman M. C., 2011, "Ecosystem services of wetlands: pathfinder for a new paradigm", Hydrological Sciences Journal, Vol.56, No.8, 1341-1359.

Maltby E., Barker T., 2009, *The Wetlands Handbook*. Oxford, 1058 p .

Maltby E., Barker T., Linstead C., 2009, "Development of a European Methodology for the Functional Assessment of Wetlands", 513-544 in: *The Wetlands Handbook*. Oxford, Edward Maltby & Tom Barker.

Maltby E., Mockler N., McInnes R., 1996, "Denitrification rates in river marginal wetlands and buffer zone management", 293-303 in: Merot & Jigorel (ed.), *Les colloques*. Paris, INRA.

Mérot P., Hubert-Moy L., Gascuel-Odoux C., Clement B., Durand P., Baudry J., et al., 2006, "A Method for Improving the Management of Controversial Wetland", *Environmental Management*, Vol.37, No.2, 258-270.

Mitsch W. J., Gosselink J. G., 2007, *Wetlands*. Wiley, 600 p .

Rapinel S., 2012, *Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : de l'observation à la modélisation prospective*. Université Rennes 2. http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00731169

Rapinel S., Clément B., Dufour S., Hubert-Moy L., 2018, "Fine-Scale Monitoring of Long-term Wetland Loss Using LiDAR Data and Historical Aerial Photographs: the Example of the Couesnon Floodplain, France", *Wetlands*, Vol.38, No.3, 423-435.

Rapinel S., Hubert-Moy L., Clément B., 2015, "Combined use of LiDAR data and multispectral earth observation imagery for wetland habitat mapping", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol.37, 56-64.

Rapinel S., Hubert-Moy L., Clément B., Maltby E., 2016, "Mapping wetland functions using Earth observation data and multi-criteria analysis", *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol.188, No.11, 641.

Rapinel S, Hubert-Moy L., Clément B., Nabucet J., Cudennec C., 2015, "Ditches' network extraction and hydrogeomorphological characterization using LiDAR-derived DTM in wetlands", *Hydrology research*, Vol.46, No.2, 276-289.

Williams M., 1990, "Wetlands, a threatened landscape", *Special Publications Series*. 25., 1993.

RÉSUMÉS

Les zones humides sont des milieux qui contribuent fortement au maintien de la biodiversité et de la qualité de l'eau. Elles se sont continuellement dégradées depuis une cinquantaine d'années, principalement sous l'effet de pressions anthropiques, ce qui altère leurs fonctions. Afin de mener des actions de protection et restauration efficaces, il est nécessaire de réaliser l'inventaire de ces milieux non seulement sur des sites de quelques hectares mais aussi sur des bassins versants entiers. L'objectif de cet article est de présenter une approche géomatique visant à délimiter et caractériser les zones humides sur l'ensemble d'un bassin versant. Cette nouvelle approche multiscalaire basée sur des outils de télédétection et d'analyse spatiale a été appliquée ici sur un sous-bassin versant de la Dordogne (France) de 650 km². Elle permet d'une part de délimiter de façon exhaustive et homogène les zones humides et d'autre part de spatialiser leurs fonctions hydrologiques, biogéochimiques et écologiques à l'échelle d'unités de gestion. Ainsi, elle constitue un outil de porter à connaissance et d'aide à la décision pour la planification environnementale.

Wetlands contribute significantly to biodiversity and water resources supports. They have been deteriorated for fifty years, mainly due to human pressures, altering their functions. In order to carry out effective actions of protection and restoration, it is necessary to perform an inventory of these areas not only on specific sites of a few hectares but on entire watersheds. The objective of this article is to present a geomatics approach that was developed to delineate and characterize these environments characterized by high spatial and temporal dynamics on an entire watershed. We propose a new multiscalar approach based on remote sensing tools and spatial analysis. This approach was applied here on a sub-watershed of the Dordogne river basin of 650 km²(France) in order to, on the one hand, comprehensively and uniformly define wetlands and, on the other hand, map hydrologic, biogeochemical and ecological functions at the scale of management units. The results show that it can be a useful awareness and decision support tool for environmental planning and resource management.

INDEX

geographyun 908, 926, 250
Mots-clés : écologie, eau, biodiversité, gestion environnementale, imagerie satellitaire, SIG, évaluation multi-critères
Keywords : ecology, water, biodiversity, environmental planning, satellite imagery, GIS, multicriteria evaluation

AUTEURS

SÉBASTIEN RAPINEL

Université de Rennes, LETG UMR 6554 CNRS, Rennes, France
Ingénieur de recherche
sebastien.rapinel(at)univ-rennes2.fr

BERNARD CLÉMENT

Université de Rennes, ECOBIO UMR 6553 CNRS, Rennes, France
Maitre de Conférence
bemiclement(at)gmail.com

LAURENCE HUBERT-MOY

Université de Rennes, LETG UMR 6554 CNRS, Rennes, France
Professeure des Universités
laurence.moy(at)univ-rennes2.fr