

Maître de stage : François Chambaud
Tuteur universitaire : Sophie Le Bot

Année universitaire : 2016–2017

UFR des Sciences et Techniques
Master Sciences des Environnements Continentaux et Côtiers

Tests méthodologiques pour la localisation des zones humides dans le bassin Rhône–Méditerranée et la qualification des fonctions et pressions



Rapport de stage de fin d'étude en tant que chargée d'étude SIG et zones humides
Réalisé par Suzanne CATTEAU



Remis le 1^{er} septembre 2017



Remerciements

Mes premiers remerciements vont à François Chambaud pour la confiance qu'il m'a accordée, son accompagnement tout au long de ce stage ainsi que pour l'ensemble des connaissances qu'il m'a transmises. Je remercie également Jean-Louis Simonnot qui a suivi le projet et m'a apporté de la rigueur concernant le vocabulaire à employer.

Merci à Sylvain Maillard pour l'ensemble de ses explications et conseils concernant l'utilisation du logiciel GRASS GIS et merci à Julien Verholle pour sa disponibilité et son aide apportée.

Je tiens également à remercier Anis Guelmami avec qui j'ai pu avoir des échanges très enrichissants à propos des méthodes employées pour appréhender les zones humides dans d'autres contextes.

Enfin, je remercie ceux qui ont relu mon rapport, l'équipe du Département de la Planification et de la Programmation pour leur accueil et particulièrement Mélisse Liogier avec qui j'ai eu la chance de partager mon bureau pendant ces quelques mois.

Table des matières

Introduction.....	1
1. Contexte et problématique.....	2
1.1 Les zones humides, un objet polysémique et polymorphe	2
1.2 Pour un suivi opérationnel des zones humides	5
1.3 Les démarches entreprises et à entreprendre.....	7
1.4 Présentation des sites d'étude	9
2. Matériels et méthodes.....	13
2.1 Localisation des zones humides sur la base de facteurs abiotiques.....	13
2.1.1 Analyse du relief	13
2.1.2 Analyse de la géologie	22
2.1.3 Croisement des données issues de l'analyse de la topographie et de la géologie.....	23
2.1.4 Dédution des surfaces imperméabilisées.....	25
2.1.5 Validation des résultats.....	26
2.2 Diagnostic des zones humides	27
2.2.1 Evaluation des fonctions	27
2.2.2 Estimation des pressions	35
3. Résultats	37
3.1 Localisation des zones humides.....	37
3.2 Fonctions et pressions des zones humides	42
4. Discussions et perspectives.....	47
Conclusion	49
Bilan personnel du stage.....	50
Références	51

Liste des figures

Figure 1 : Caractéristiques hydromorphologiques de divers types de milieux humides (Barnaud & Fustec, 2007).....	2
Figure 2 : Schéma représentant la valorisation des connaissances relatives aux zones humides du bassin Rhône-Méditerranée pour la localisation des zones humides à partir d'une modélisation par SIG	9
Figure 3 : Carte représentant l'occupation des sols dans le bassin de la Veyle et la délimitation des écorégions	11
Figure 4 : Carte représentant l'occupation des sols dans le bassin de la Tille et la délimitation des écorégions	12
Figure 5 : Formes élémentaires du relief : Plan, Talweg, Crête, Col, Sommet, Dépression (Wood, 1996).....	14
Figure 6 : Schéma représentant une fenêtre de calcul	15
Figure 7 : Aperçu des vallons (en bleu) repérés à partir du raster d'accumulation de flux selon différents seuils	16
Figure 8 : Angles du zénith et angles du nadir au sein de rayons de recherche (Jasiewicz & Stepinski, 2013) ..	17
Figure 9 : Localisation des points visibles les plus lointains sur les 8 axes autour de la cellule centrale	17
Figure 10 : Formes élémentaires du relief : plan (1), sommet (2), crête (3), haut de versant (4), éperon (5), pente (6), dépression (10), vallée (9), bas de versant (8), creux sur versant (7) (Jasiewicz & Stepinski, 2013)..	18
Figure 11 : Secteurs favorables aux zones humides (a : croisement à une maille de 25 m ; b : croisement à une maille de 13 m)	24
Figure 12 : Erreurs de commission (A) et d'omission (B) calculées à partir de la comparaison entre les zones humides inventoriées (en bleu) et les zones humides calculées (en rouge) (Sanchez et al., 2015).....	27
Figure 13 : Schéma illustrant la méthode de Clerici et al. (2011) pour appréhender le fond de vallée	30
Figure 14 : Carte des surfaces imperméabilisées et pression de l'urbanisation à Vonnas, associée à une prise de vue aérienne	35
Figure 15 : Localisation des zones humides sur le bassin versant de la Veyle	37
Figure 16 : Validation des résultats par des sondages pédologiques réalisés le long d'un transect perpendiculaire au fond de la vallée de la Veyle à l'est de Vonnas	38
Figure 17 : Schéma simplifié de la localisation des zones humides le long d'un versant du bassin de la Veyle.	38
Figure 18 : Localisation des zones humides sur le bassin versant de la Tille.....	39
Figure 19 : Schéma simplifié de la localisation des zones humides le long d'un versant de l'écorégion 10 – Côtes calcaires est.....	40
Figure 20 : Nombre de fonctions remplies par les zones humides du bassin versant de la Veyle	43
Figure 21 : Nombre de fonctions remplies par les zones humides du bassin versant de la Tille	44
Figure 22 : Fonctions remplies et pressions subies par les zones humides au niveau de la commune de Condeissiat.....	45
Figure 23 : Fonctions remplies et pressions subies par les zones humides au niveau de la commune de Lamargelle	46

Liste des tableaux

Tableau 1 : Analyse des enjeux selon l'état de la fonction et les pressions exercées (d'après Duffy et al., 2013)	7
Tableau 2 : Seuils proposés dans la littérature à partir duquel les pentes sont contraignantes pour la présence de zones humides (les seuils adaptés aux zones humides d'altitude ne sont pas renseignés)	18
Tableau 3: Distribution cumulée des surfaces de zones humides selon différents seuils de pente	19
Tableau 4 : Schéma représentant les différentes formes de versants selon la pente et la courbure	20
Tableau 5 : Conditions à remplir pour mettre en évidence les configurations type	21
Tableau 6 : Caractéristiques du relief à rechercher selon le guide pour l'écorégion 8 (Plaine alluviale de la Saône et de la Bresse) et les configurations type auxquelles elles s'apparentent	21
Tableau 7 : Caractéristiques du relief à rechercher selon le guide pour l'écorégion 9 (Dombes) et les configurations type auxquelles elles s'apparentent.....	22
Tableau 8 : Caractéristiques du relief à rechercher selon le guide pour l'écorégion 10 (Côtes calcaires Est) et les configurations type auxquelles elles s'apparentent	22
Tableau 9 : Caractéristiques du relief à rechercher selon le guide pour l'écorégion 56 (Plateaux Haut-Saônois) et les configurations type auxquelles elles s'apparentent	22
Tableau 10 : Caractéristiques géologiques à rechercher selon Chambaud et al. (2012b) pour l'écorégion 8 (Plaine de la Saône et de la Bresse) et exemples de quelques formations repérées.....	23
Tableau 11 : Indicateurs permettant de mettre en évidence les fonctions	34
Tableau 12 : Groupes de cultures identifiés par le Registre Parcellaire Graphique	36
Tableau 13 : Matrice de confusion entre les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides auxquels ont été déduites les surfaces imperméabilisées par rapport aux inventaires départementaux de référence sur le bassin versant de la Veyle	41
Tableau 14 : Matrice de confusion entre les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides auxquels ont été déduites les surfaces imperméabilisées par rapport aux inventaires départementaux de référence sur le bassin versant de la Tille	41
Tableau 15 : Matrice de confusion entre les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides sans déduction des surfaces imperméabilisées par rapport aux inventaires départementaux de référence sur le bassin versant de la Veyle	41
Tableau 16 : Matrice de confusion entre les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides sans déduction des surfaces imperméabilisées par rapport aux inventaires départementaux de référence sur le bassin versant de la Tille	42

Introduction

La dégradation et la disparition des zones humides suscitent auprès de la sphère politique locale et internationale un intérêt croissant. En effet, ces milieux sont reconnus pour jouer un rôle dans différentes problématiques, telles que les inondations, la dégradation de la qualité de l'eau ou de la qualité de l'air par exemple (Barnaud & Fustec, 2007 ; Fustec & Lefevre, 2000).

Les zones humides sont caractérisées par des sols hydromorphes et/ou une végétation dominée par des plantes hygrophiles. Le terme générique « zone humide » renvoie à des réalités diverses et se décline selon une multiplicité de termes, tels que tourbière, marais ou lagune par exemple, en fonction des typologies (Barnaud & Fustec, 2007 ; Bouzillé, 2014). Ces milieux humides, longtemps perçus négativement, notamment en raison du courant hygiéniste de la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle, font, depuis la fin de la seconde guerre mondiale l'objet d'une attention particulière au sein de la communauté scientifique (Fustec & Lefevre, 2000). A partir des années 1980, la notion de fonction des zones humides est définie et étudiée (Barnaud & Fustec, 2007). Une fonction désigne « l'activité propre d'un élément ou d'un organe dans un ensemble dont il fait partie » (Fustec & Lefevre, 2000). En bon état, les zones humides remplissent trois fonctions majeures, à savoir la fonction hydrologique, géochimique et écologique ; elles-mêmes déclinables en plusieurs sous-fonctions (Barnaud & Fustec, 2007 ; Bouzillé, 2014). Ces fonctions sont à l'origine de services rendus pour la société, tels que l'écêtement des crues, le stockage du carbone ou la dénitrification (Barnaud & Fustec, 2007 ; Bouzillé, 2014 ; Fustec & Lefevre, 2000). L'évaluation économique de ces services a notamment permis de souligner l'importance de la protection de ces milieux particuliers (Barnaud & Fustec, 2007).

Ces écosystèmes sont soumis à diverses pressions anthropiques, notamment en raison de l'urbanisation ou de certaines pratiques agricoles (Barnaud & Fustec, 2007 ; Fustec & Lefevre, 2000). Le changement climatique représente également une menace pour les zones humides dont les étendues peuvent être réduites en raison de l'augmentation du niveau marin par exemple (Chambaud et al., 2012a). Ainsi, il est indispensable de protéger et restaurer le fonctionnement des zones humides, en vue de renforcer leur pouvoir de résilience (Duffy et al., 2013).

Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux 2016-2021 a pour ambition d'enrayer la disparition des zones humides et de maintenir leurs fonctions pour assurer la pérennité de ces milieux stratégiques (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse, 2015). Pour faciliter leur suivi et orienter les actions à entreprendre, il s'avère nécessaire de disposer d'un outil qui localise les zones humides, qualifie les fonctions qu'elles remplissent ainsi que les pressions qu'elles subissent.

Cette étude s'attache donc à répondre à la problématique suivante : quelle est la méthode la plus adaptée pour construire un support cartographique qui permet de planifier l'action relative aux zones humides dans le bassin Rhône-Méditerranée avec une localisation et une qualification des fonctions ainsi que des pressions de ces écosystèmes ?

Une première partie présente les éléments de contexte concernant les enjeux afférents aux zones humides puis la demande formulée par l'Agence de l'eau, mise en perspective avec les travaux menés précédemment sur cette thématique. Les sites d'étude sélectionnés pour la réalisation de tests méthodologiques y sont également introduits. Une seconde partie traite de la démarche adoptée pour la construction d'un protocole basé sur les inventaires existants qui localise les zones humides à partir de critères abiotiques et qui estime les fonctions et pressions associées. Il s'agit de présenter la réflexion menée qui concerne les différentes approches employées pour traiter ces thématiques. Pour finir, les résultats obtenus sont présentés, interprétés, puis discutés afin de mettre en lumière les atouts et les limites de la méthode ainsi que les perspectives offertes.

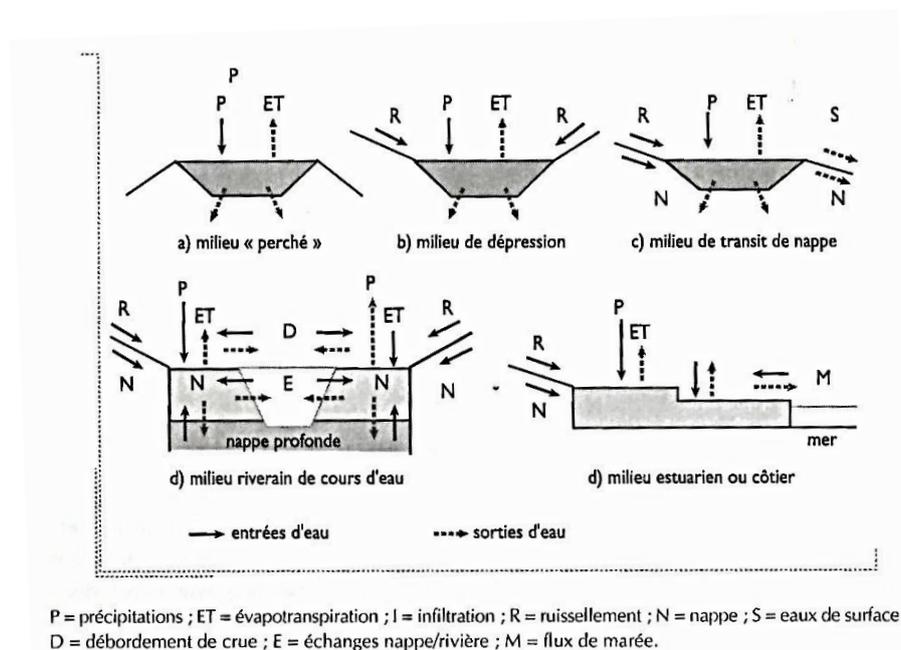
1. Contexte et problématique

1.1 Les zones humides, un objet polysémique et polymorphe

Une pluralité de zones humides résultant de conditions abiotiques variées

Bien que toutes liées à l'abondance d'eau, les zones humides adoptent des formes diverses selon leur fonctionnement en raison de l'origine des flux hydriques, des conditions météorologiques locales, de la perméabilité du substrat sur lequel elle repose ainsi que de la durée et de la fréquence des inondations (Barnaud & Fustec, 2007). Leur position dans le bassin versant, leur taille, leur configuration ainsi que l'origine de leurs apports en eau, caractérisent le fonctionnement hydrologique de ces milieux polymorphes (Barnaud & Fustec, 2007). Il est possible d'identifier plusieurs configurations hydromorphologiques selon leur position dans le paysage et les caractéristiques des flux hydriques (Brinson, 1993) (Figure 1). Ces configurations ne sont pas tout à fait distinctes, une zone humide peut s'apparenter à plusieurs catégories.

Figure 1 : Caractéristiques hydromorphologiques de divers types de milieux humides (Barnaud & Fustec, 2007)



Tout d'abord, il est possible de distinguer les milieux perchés (Fig. 1a). Ces zones humides sont associées à la présence d'une formation géologique imperméable à faible profondeur qui favorise la rétention d'eau à proximité de la surface. L'alimentation de ces zones humides se fait principalement par les précipitations, d'où des variations saisonnières importantes du niveau de la nappe qui affleure (Barnaud & Fustec, 2007).

Les milieux dépressionnaires constituent un relief favorable à l'accumulation des apports par ruissellement (Fig. 1b). Les caractéristiques géologiques peuvent également limiter les sorties d'eau vers les aquifères sous-jacents ou les cours d'eau alentours (Barnaud & Fustec, 2007). Toutefois, lorsque les conditions locales induisent la présence de flux hydriques dominés par les apports de la nappe, le milieu dépressionnaire peut également être assimilé aux milieux de transit de nappe (Fig. 1c). L'intersection de la topographie avec une nappe peut être à l'origine de différentes formes de zones humides dans le paysage, telles que celles associées aux lignes de sources ou de replats topographiques. Il est précisé que les sorties d'eau de la zone humide peuvent se produire en souterrain ou en surface selon la pente et les configurations locales (Fig. 1c) (Barnaud & Fustec, 2007).

Lorsque la nappe affleurante est liée à la présence d'un cours d'eau, les flux hydrologiques s'avèrent davantage complexes ; ils peuvent être verticaux, transversaux et longitudinaux (Fig. 1d). L'importance relative de ces flux varie notamment selon la perméabilité des matériaux sur lesquels s'écoule le cours d'eau et les dimensions de la plaine alluviale. Ces flux varient au plan spatial, entre l'amont et l'aval, et temporel entre les périodes de crues ou d'étiage notamment. Plusieurs types de zones humides résultent de cette variété de situations (Barnaud & Fustec, 2007).

Enfin, les milieux estuariens conservent les dynamiques hydrologiques des milieux humides liés à des cours d'eau (Fig. 1e). Ils intègrent une variabilité journalière supplémentaire liée aux mouvements des marées. L'alimentation par les eaux continentales ou côtières conditionne le gradient de salinité et ainsi la spécificité des zones humides qu'ils accueillent. Les configurations topographiques et géologiques des environnements côtiers induisent une variété de zones humides (Brinson, 1993), telle que les lagunes ou les marais d'arrière-dunes par exemple, et jouent un rôle majeur pour la remontée du biseau salé vers l'intérieur des terres (Barnaud & Fustec, 2007).

En raison de la diversité des apports en eau, liée aux conditions topographiques et géologiques locales, chaque zone humide possède des variations hydrologiques dans le temps qui lui sont propres appelées l'« hydropériode » (Mitsch & Gosselink, 2000).

Quel que soit la nature des zones humides, elles sont capables de remplir des fonctions lorsqu'elles sont en bon état. Les fonctions des zones humides peuvent être définies comme un « ensemble d'interactions naturelles mettant en jeu des organismes et l'environnement physique en vue de répondre à un besoin particulier de cet écosystème » (Aidoud & Clément, 2014). Une fonction d'un écosystème peut, potentiellement, fournir des services à la société (Duffy et al., 2013). Il convient de préciser que le terme « fonction » ne doit pas être confondu avec « fonctionnalité » ou « fonctionnement ». Le terme « fonctionnalité » correspond à l'« aptitude des écosystèmes à réaliser ses fonctions et processus fonctionnels » (Aidoud & Clément, 2014). Il est souvent utilisé par les gestionnaires pour évoquer les services rendus par ces écosystèmes et renvoie donc à une vision anthropomorphique (Rapinel, 2012). Le fonctionnement de la zone humide résulte de la réalisation des différentes fonctions (Oberti et al., 2000a). Les trois fonctions majeures (hydrologique, biogéochimique et écologique) assurent le fonctionnement de l'écosystème, c'est-à-dire son organisation dans le temps et l'espace, et renseignent sur l'état des zones humides (Aidoud & Clément, 2014). L'état des zones humides dépend de la composition et de l'agencement des éléments qui la compose (« organisation spatiale »), de son aptitude à faire perdurer ses fonctions (« vigueur ») et de sa capacité à s'adapter à des forçages externes (« résilience ») (Aidoud & Clément, 2014). La préservation ou la restauration des fonctions des zones humides permet de renforcer ces trois aspects.

Les zones humides, une notion encore en évolution

La pluralité de formes, que peuvent revêtir les zones humides, implique des difficultés pour proposer une définition unique. Or, les zones humides peuvent être soumises à diverses pressions liées aux activités anthropiques en raison des prélèvements d'eau, de l'agriculture et des activités industrielles ou de loisirs par exemple (OZHM, 2000). Les zones humides peuvent également subir des pressions qui ont pour origine le changement climatique, telles que les zones humides liées aux régimes d'enneigement (Centre de Recherche sur les Ecosystèmes d'Altitude, s.d.). Ainsi, en vue de mieux prendre en compte ces milieux pour les protéger vis-à-vis de ces pressions, de multiples définitions ont été proposées (Bendjoudi & De Marsily, 2000).

G. Barnaud et E. Fustec (2007) soulignent le fait que chaque définition correspond à la posture des personnes qui en sont à l'origine, un pédologue n'ayant pas le même regard qu'un sociologue par exemple, et ses objectifs, politiques ou scientifiques. Ainsi, les premières définitions sont issues de travaux menés par des ornithologues qui s' alarmaient de la disparition de ces biotopes (Barnaud, 2000).

En 1964, au cours de la conférence internationale des Saintes-Maries-de-la-Mer, les zones humides sont définies comme « toutes les régions marécageuses et toutes les étendues d'eau de moins de six mètres de profondeur, qu'elles soient douces ou salées, temporaires ou permanentes, stagnantes ou courantes » (Oberti et al., 2000b).

La « Convention de Ramsar relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau », adoptée le 2 février 1971, apporte aux milieux humides une définition juridique à portée internationale (Barnaud, 2000). L'article premier indique que « les zones humides sont des étendues de marais, de fagnes, de tourbières ou d'eaux naturelles ou artificielles, permanentes ou temporaires, où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres » (Convention de Ramsar, 1971). Cette définition large sert de cadre général pour les définitions adoptées à l'échelle nationale (Oberti et al., 2000b).

En 1991, le Musée National d'Histoire Naturelle propose une définition scientifique : « les zones humides qui peuvent être naturelles ou artificielles se caractérisent par la présence, permanente ou temporaire, d'eau douce ou salée à la surface du sol ou à proximité de celle-ci. En position d'interface entre milieux terrestres et aquatiques, elles se distinguent par leurs sols hydromorphes qui supportent une végétation dominante composée d'hydrophytes typiquement adaptées à ces conditions ». Toutefois, cette définition fait l'objet de débats, notamment en raison de l'intérêt scientifique récent vis-à-vis de ces milieux (Fustec & Lefeuvre, 2000). Le choix des termes employés et les critères choisis font l'objet de remarques qui aboutissent à la formulation de deux définitions, l'une scientifique et l'autre juridique (Oberti et al., 2000b).

C'est pourquoi, bien qu'ayant ratifié la convention de Ramsar en 1986, la France propose une définition nationale des zones humides uniquement à partir de 1992 dans les textes de la loi sur l'eau (Barnaud & Fustec, 2007 ; Bouzillé, 2014, Fustec & Lefeuvre, 2000). Cette définition, intégrée par la suite à l'article L.211-1 du code de l'environnement, définit ces milieux comme des « terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année ».

En conséquence, le premier Plan National d'action pour les Zones Humides (PNZH) est initié en 1995, avec pour objectif d'affiner les connaissances sur ces milieux, de promouvoir la restauration de zones humides dégradées, la cohérence des politiques publiques et la communication auprès du grand public (Barnaud & Fustec, 2007 ; Bouzillé, 2014).

Malgré les différentes définitions qui ont émergées, la délimitation des zones humides sur le terrain s'avère complexe. En effet, les définitions soulignent que la présence d'eau est un facteur essentiel à la présence de zones humides. Toutefois, ce critère n'est pas un indicateur pertinent, notamment en raison de sa variabilité temporelle liée au concept d'hydropériode (Bendjoudi & De Marsily, 2000, Hubert-Moy & Clément, 2014). Seuls les critères de sols et de végétation permettent de définir les zones humides sur le terrain. Ces critères alternatifs sont détaillés dans l'arrêté du 1^{er} octobre 2009 modifiant l'arrêté du 24 juin 2008, qui précise les critères de définition et de délimitation des zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du code de l'environnement. Ils sont explicités dans la circulaire du 18/01/2010 relative à la délimitation des zones humides. Par ailleurs, il est à noter qu'une délimitation précise et absolue des zones humides est considérée comme impossible par certains auteurs (Barnaud, 2000). Néanmoins, si le caractère absolu n'est pas atteignable, il convient tout de même de proposer une délimitation en vue d'établir des objectifs et de planifier l'action.

Aujourd'hui encore, les critères de définition des zones humides peuvent faire l'objet de vifs débats. En effet, l'arrêt du Conseil d'Etat n°386325 du 22 février 2017 remet en question le caractère alternatif des critères de sol et de végétation. Or, si ces critères deviennent cumulatifs, de nombreux secteurs définis fonctionnellement comme zones humides pourraient ne plus être considérés comme tels. Les zones humides sur lesquelles se trouvent des parcelles agricoles cultivées par exemple, ne possèdent plus de

végétation caractéristique mais remplissent cependant *a minima* la fonction hydrologique. Cette décision du Conseil d'Etat peut donc démunir de nombreuses zones humides de leur statut. Or, celui-ci leur permet d'être éligibles à des mesures de protection ou de restauration. De plus, cette approche ne permet pas d'appréhender le fonctionnement des zones humides dans sa globalité car elle implique une vision parcellaire, liée au mode d'occupation des sols et de leurs usages.

1.2 Pour un suivi opérationnel des zones humides

L'Agence de l'eau, établissement structurant de la politique de l'eau en France

Les agences de l'eau sont des établissements publics administratifs de l'Etat dépendant du Ministère de la transition écologique et solidaire (<http://www.lesagencesdeleau.fr/>). Issues de la loi sur l'eau de 1964, elles constituent des structures décentralisées dédiées à la gestion de la ressource en eau par bassin hydrographique (Office International de l'Eau, 2009). Il existe six agences en France métropolitaine pour sept bassins (<http://www.lesagencesdeleau.fr/>). Ces structures s'appuient sur un système financier incitatif spécifique. Elles prélèvent des redevances auprès des usagers selon les principes de « pollueur-payeur » et d'« utilisateur-payeur » et les redistribuent pour financer des actions visant à protéger la ressource en eau, sur le plan quantitatif et qualitatif. Les agences de l'eau, organes exécutifs, œuvrent conjointement avec les comités de bassin, entités consultatives, pour élaborer les documents visant à organiser la concertation et la coordination de ces actions (Office International de l'Eau, 2009). Ainsi, pour chaque bassin hydrographique, il existe un comité dont les membres sont issus de l'Etat, des collectivités territoriales et des usagers (N. CHANTEPY, directeur général adjoint, communication personnelle, 2017).

Les priorités de financement et les domaines d'intervention sont détaillés par agence au sein d'un programme d'actions pluriannuel (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse, 2013). Depuis la loi sur l'eau n° 92-3 du 3 janvier 1992, ce programme est décliné en Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) qui, à l'échelle du bassin, permettent d'orienter et de planifier la gestion de l'eau. Ceux-ci sont déclinés à l'échelon local en Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) et contrats de milieux (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse, 2015). En outre, depuis la Directive Cadre sur l'Eau du 23 octobre 2000 (DCE 2000/60/CE), ces schémas doivent être en conformité avec les objectifs d'atteinte du bon état des eaux d'ici 2015, délais pouvant être reporté à 2027. De plus, ils doivent s'accompagner d'un Programme De Mesures (PDM) qui présente les moyens mis en œuvre pour atteindre ces objectifs (Office International de l'Eau, 2009). Il est à noter que les états ont pour obligation de fournir des rapports à la Commission européenne concernant les objectifs prévus, les actions entreprises et les résultats atteints (Office International de l'Eau, 2009). Par ailleurs, il convient de préciser que ces documents ont une portée qui s'élargit en raison d'évolutions structurelles ou administratives. Ainsi, ces documents doivent prendre en compte de nouveaux territoires situés plus au large des côtes, en lien avec la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin (DCSMM) (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse, 2015). De même, depuis 2016, la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, confère aux agences une compétence Biodiversité (Les agences de l'eau, s.d.).

Entre 2013 et 2018, l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse suit son 10^{ème} programme intitulé « Sauvons l'eau ! », dont le budget s'élève à plus de 3,8 milliards d'euros pour six ans (Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, s.d.). Cette agence, dont le territoire d'action représente près d'un quart de la France a la particularité de gérer deux bassins hydrographiques : le bassin Rhône-Méditerranée et celui de la Corse (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2013). C'est pourquoi le programme d'action est décliné en deux SDAGE (N. CHANTEPY, com. pers., 2017).

Au sein de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, le département de la Planification et de la Programmation (DPP) a notamment pour mission d'élaborer le SDAGE et de superviser le suivi de sa mise

en œuvre. En raison de la prise en compte croissante de la nécessité de protéger les zones humides depuis plusieurs décennies (Barnaud & Fustec, 2007 ; Fustec & Lefeuvre, 2000), ces milieux font l'objet d'une orientation fondamentale dans le SDAGE Rhône-Méditerranée, intitulée « Préserver, restaurer et gérer les zones humides » (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse, 2015). L'importance accordée à ces milieux devrait s'accroître davantage avec l'adoption du 11^{ème} programme (2019/2024) qui a notamment pour ambition de préserver et de restaurer 10 000 hectares de zones humides.

Les zones humides, des milieux difficiles à appréhender pour l'état des lieux

En 2016, une réunion relative à l'état des lieux de 2019, souligne la nécessité de disposer d'un document cartographique homogène pour l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée afin de localiser les zones humides et de suivre l'évolution de leurs fonctions et des pressions subies. En effet, le département de la Planification et de la Programmation a désormais pour objectif d'améliorer les méthodes employées pour mieux cibler l'action (Kristell ASTIER-COHU, directrice de département, com. pers., mai 2017).

L'hétérogénéité des données issues des inventaires de zones humides dans le bassin Rhône-Méditerranée révèle des spécificités locales concernant l'orientation des prospections sur le terrain et les critères privilégiés pour la délimitation des zones humides (stratégies d'inventaire hétérogènes). Dans certains cas, les zones humides côtières ou de fond de vallée apparaissent de manière prépondérante sur les cartes d'inventaires en raison de la priorisation et de la hiérarchisation des secteurs à prospector. Ainsi, il est possible de constater que la majorité des zones humides de grandes dimensions sont inventoriées et font l'objet de nombreuses études concernant leur patrimoine naturel, notamment suite à la Convention de Ramsar signée en 1971 (Bouzillé, 2014). Elles bénéficient donc de nombreux instruments de protection, d'ordre réglementaire, foncier ou contractuel (Cizel, 2010). En revanche, les zones humides qualifiées d'« ordinaires » ou de « banales » ne sont pas systématiquement délimitées lors des inventaires bien qu'elles remplissent également des fonctions (Bouzillé, 2014 ; Rapinel, 2012). Par ailleurs, il est possible d'observer que, selon les régions et les départements, le seuil à partir duquel les zones humides de petites dimensions ne sont plus cartographiées diffère entre 0,1 et 4 hectares.

Les discontinuités entre les inventaires, observables au niveau des limites administratives régionales ou départementales, traduisent la diversité des modes de représentation cartographique des zones humides malgré la Charte pour les zones humides du bassin Rhône-Méditerranée de 2000 recommandant une méthode unique d'inventaire par bassin versant.

L'objectif : une méthode homogène et reproductible

L'hétérogénéité des inventaires de zones humides conduit le service Planification du DPP à porter une réflexion pragmatique quant aux moyens qui permettent de mettre en évidence les zones humides, tout en suivant une méthode homogène et reproductible sur l'ensemble du territoire. Cette méthode actualisable permettrait de conserver une continuité entre les états des lieux successifs et de mettre en lumière le résultat des actions engagées en faveur des zones humides.

Le fait que la délimitation repose sur des critères factuels et non leur valeur patrimoniale exige de considérer les zones humides à travers le prisme des fonctions qu'elles remplissent (Duffy et al., 2013). L'évaluation des fonctions des zones humides permet de dresser un bilan et de cibler précisément les fonctions qui doivent être préservées ou restaurées (Rapinel, 2012). Il s'agit d'orienter le mode de gestion à mettre en œuvre (Duffy et al., 2013). Une qualification des fonctions (hydrologiques, biogéochimiques et écologiques) et des pressions (urbanisation, agriculture) des zones humides sur de vastes échelles pourrait être réalisée à pas de temps régulier (tous les 6 ans, en cohérence avec le cycle du SDAGE). Ainsi, il serait

possible de suivre l'évolution des zones humides du bassin et d'évaluer l'impact des actions soutenues par l'Agence de l'eau dans le cadre du programme de mesures (Duffy et al., 2013).

Les stratégies relatives aux zones humides sont pertinentes à l'échelle des sous-bassins du SDAGE ; 209 sous-bassins sont identifiés dans le bassin Rhône-Méditerranée par le SDAGE 2016. Il s'agit également d'une échelle cohérente avec les structures locales capables de déployer des actions qui visent à éviter, réduire ou compenser la dégradation des fonctions des zones humides (Duffy et al., 2013).

Le croisement des fonctions avec les pressions auxquelles sont soumises les zones humides permet de mettre en évidence les secteurs à enjeux selon les objectifs fixés (Tableau 1).

Tableau 1 : Analyse des enjeux selon l'état de la fonction et les pressions exercées (d'après Duffy et al., 2013)

Etat de la fonction \ Pression	Bon	Dégradé
Non significative	Non dégradation	Restauration
Significative	Maîtrise de la pression	Restauration Réduction de la pression

1.3 Les démarches entreprises et à entreprendre

Démarches de localisation des zones humides en France métropolitaine

A l'échelle de la France métropolitaine, le développement d'une méthode homogène pour localiser les enveloppes des milieux potentiellement humides sur l'ensemble du territoire a été entrepris (MEDDE & GIS Sol, 2014). Il s'agit d'une estimation à petite et moyenne échelle réalisée à partir de données topographiques, météorologiques, pédologiques et hydrologiques.

La localisation et la caractérisation des zones humides par les structures de gestion de l'eau suivent divers objectifs. En conséquence, plusieurs approches, ascendantes ou descendantes, sont employées (Barnaud & Fustec, 2007).

L. Hubert-Moy et B. Clément (2014) soulignent le besoin qu'émettent les agences de l'eau de bénéficier d'une délimitation des zones humides à l'échelle de leur territoire d'actions. Actuellement, la majorité des agences de l'eau propose des démarches descendantes (Barnaud & Fustec, 2007) dans le but de disposer d'un outil de planification et de connaissance (Agence de l'Eau Artois-Picardie, s.d.). Les méthodes consistent en la recherche d'« enveloppes » correspondant soit à de grandes zones humides, telles que des marais, soit à des réseaux de petites zones humides (Gallia Sana et al., 2006). Il s'agit de localiser les secteurs dont la probabilité de présence de zones humides est importante, appelées selon les cas « zones à dominante humides » (Agence de l'Eau Artois-Picardie, s.d. ; Asconit Consultants & Isthme, 2011 ; Gallia Sana et al., 2006) ou « zones humides potentielles » (Agence de l'eau Rhin-Meuse, 2014). La notion de « zones humides potentielles » renvoie à l'approche de Mérot et al. (2006) qui distingue les zones humides potentielles, existantes et efficaces. Les zones humides potentielles correspondent aux secteurs dont la géomorphologie est favorable mais pour lesquels les pressions agricoles, notamment dues au drainage, empêchent leur expression. Les zones humides existantes peuvent être définies selon les critères de sol ou de végétation de l'arrêté ministériel du 1^{er} octobre 2009. Enfin, les zones humides efficaces correspondent aux zones humides appréhendées par rapport à une fonction donnée (Mérot et al, 2006). Néanmoins, le terme « potentiel » peut être controversé car une zone humide, bien que soumise à une pression agricole, peut conserver des traits pédologiques hydromorphes. En effet, malgré l'altération des fonctions par les pratiques agricoles, elle peut répondre à la définition réglementaire des zones humides. De plus, le fait que des zones humides qui remplissent des fonctions puissent être considérées comme

potentielles pose question. C'est pourquoi l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse affirme une volonté de se détacher du concept de zone humide potentielle.

La majorité des agences de l'eau utilisent une méthode relativement similaire à la démarche nationale, fondée notamment sur le traitement de données géologiques, altimétriques, météorologiques, piézométriques, d'occupation du sol ou la proximité au réseau hydrographique. Néanmoins, certaines agences, s'appuient avant tout sur des données acquises par photo-interprétation (Agence de l'Eau Artois-Picardie, s.d.).

Par ailleurs, les agences de l'eau Seine-Normandie et Adour-Garonne, ont mené en parallèle des études pour évaluer les fonctions des zones humides en vue de mieux cibler les actions (Asconit Consultants & Isthme, 2011 ; Gaillard et al., 2001).

L'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse a privilégié une démarche ascendante en encourageant le déploiement d'inventaires par les acteurs locaux et le développement de connaissances sur les zones humides et leur espace de bon fonctionnement. Ainsi, depuis 2003, elle s'attache à développer des outils spécifiques pour mieux cerner les zones humides du bassin Rhône-Méditerranée. Il s'agit notamment du programme Rhône Méditerranée Observatoire (RhoMéo) qui propose une série d'indicateurs pour mettre en exergue les fonctions et les pressions des zones humides (Collectif RhoMéo, 2014) et le guide pour la reconnaissance des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée (Chambaud et al., 2012a ; Chambaud et al., 2012b). Ce dernier, élaboré à partir de prospections de terrain, renseigne sur les spécificités des zones humides selon les configurations locales liées à leur position géographique.

A l'échelle des SAGE, des recherches concernant les méthodes de pré-localisation des aires favorables à l'existence des zones humides sont également entreprises. Il s'agit de repérer des « enveloppes de probabilité de présence » (TTI Production & Acer Campestre, 2012). Les méthodes utilisées sont similaires à celles employées à l'échelle des SDAGE : analyse de données issues de la télédétection, la topographie, la géologie et la pédologie (Pierre, 2002). Il est à noter que l'accès à certaines données, telles que les cartes pédologiques de résolution fine, peut être facilité lorsque la zone d'étude est peu étendue et que le bassin hydrographique est peu divisé par des limites administratives, départementales ou régionales.

Une approche basée sur l'analyse des facteurs abiotiques par écorégion

En 2012, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse a publié un guide pour la reconnaissance des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée (Chambaud et al., 2012a ; Chambaud et al., 2012b). Ce document détaille la méthode utilisée pour discerner au sein du bassin Rhône-Méditerranée 62 écorégions (Annexe 1), « territoires dotés de caractéristiques globales bien distinctes » (Ivol-Rigault, 1998). La délimitation des écorégions à l'échelle du bassin est basée sur la prise en compte de la géologie, du relief, du climat, de l'altitude et des étages de végétation (Chambaud et al., 2012a). Puis, à l'échelle de chaque écorégion préalablement définie, les caractéristiques de trois facteurs abiotiques majeurs que sont, la lithologie, la géomorphologie et les facteurs climatiques locaux, sont mises en évidence pour la localisation des zones humides. Ce guide comprend une méthode d'identification et de caractérisation des zones humides, des clés d'identification ainsi que des fiches établies par écorégion. Ces dernières présentent la description des configurations locales qui concourent à la forte probabilité de présence de zones humides (Annexe 2). Il convient cependant d'être vigilant à l'égard de certains schémas récapitulatifs qui décrivent davantage les conditions générales de l'écorégion que les configurations favorables aux zones humides. C'est pourquoi, la lecture du paragraphe intitulé « Probabilité de zones humides » est fortement encouragée.

Ce guide définit donc les conditions abiotiques favorables aux zones humides pour chacune des 62 écorégions du bassin Rhône-Méditerranée à partir d'un micromodèle validé sur le terrain (Chambaud et al.,

2012a). L'objectif du stage consiste à repérer ces configurations favorables avec l'utilisation de Systèmes d'Information Géographique (SIG) (Fig. 2).

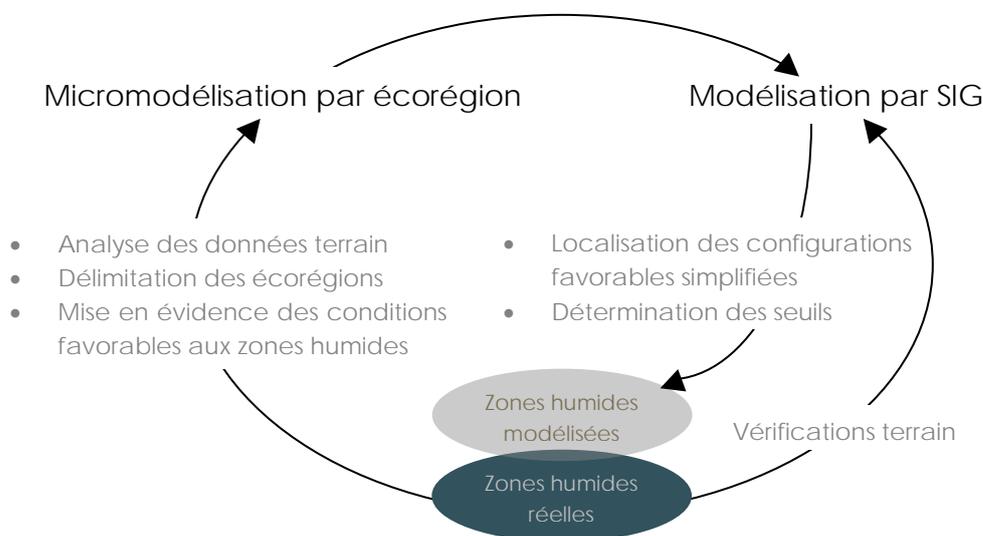


Figure 2 : Schéma représentant la valorisation des connaissances relatives aux zones humides du bassin Rhône-Méditerranée pour la localisation des zones humides à partir d'une modélisation par SIG

1.4 Présentation des sites d'étude

La stratégie de préservation et de reconquête des zones humides étant définie à l'échelle de sous-bassin du SDAGE (Duffy et al., 2013), quatre sous-bassins versants délimités pour le SDAGE en 2016 ont été présélectionnés dans le bassin Rhône-Méditerranée pour définir les sites sur lesquels appliquer les tests méthodologiques. Ceux-ci ont été choisis avant tout selon des critères physiques : leur taille (environ 1 000 km²) ainsi que le nombre et la nature des écorégions qu'ils recoupent pour mettre en évidence des secteurs représentatifs du bassin et de son hétérogénéité. Un second filtre a été appliqué selon la disponibilité des données, notamment l'existence d'une couche de référence à laquelle comparer les zones humides modélisées. C'est pourquoi la répartition des inventaires réglementaires de zones humides sur chaque bassin versant a été prise en considération. Cela a donc requis l'analyse des métadonnées relatives aux méthodologies d'inventaires. Ce critère étant fortement lié aux limites administratives, les bassins versants recoupés par peu de départements ont été privilégiés. Enfin, les sites porteurs d'enjeux ont été prioritaires.

Ainsi, d'amont en aval, les bassins de la Tille, la Veyle, la Drôme et la Têt ont été retenus. Leurs limites correspondent à celles des sous-bassins versants du SDAGE 2016.

Les premiers tests méthodologiques ont été réalisés pour le bassin versant de la Veyle. La méthode a ensuite été transposée et adaptée au bassin versant de la Tille. Ces bassins versants se distinguent par leur géologie, leur géomorphologie et les pressions qu'ils subissent, notamment en termes d'urbanisation et d'agriculture.

A ce stade, les bassins versants de la Drôme et de la Têt n'ont pas encore été analysés suivant le protocole établi.

1.4.1 La Veyle

Le bassin versant de la Veyle, d'une superficie d'environ 670 km², se situe dans le département de l'Ain entre Mâcon, Bourg-en-Bresse et Lyon (Syndicat Mixte Veyle Vivante, 2013) (Fig. 3). La Veyle s'écoule du sud vers le nord-ouest depuis sa source située au niveau de la commune de Châtenay jusqu'à la Saône, dont elle est un affluent en rive gauche. Son relief est peu contrasté ; son altitude varie entre 170 et 320 m. La partie sud, occupée par le plateau de la Dombes est légèrement ondulée et caractérisée par des vallées peu encaissées (moins de 10 m), tandis qu'au nord les larges vallées à fond plat sont légèrement plus encaissées (environ 20 m) mais conservent des versants à pente douce. Avec près de 600 km de cours d'eau, le réseau hydrographique apparaît particulièrement dense (Syndicat Mixte Veyle Vivante, 2013).

Ce bassin versant est composé de deux écorégions (Fig. 3) : la Dombes (écorégion 9) en amont et la Plaine de la Saône et de la Bresse en aval (écorégion 8). Cette dernière correspond au fossé bressan hérité de l'Eocène. Il a été comblé au Pliocène de matériaux détritiques, notamment des marnes et des sables, souvent masqués par des alluvions et limons quaternaires (Lorenchet de Montjamont & Tegye, s.d.). Ainsi, le plateau au Nord de la basse vallée de la Veyle est composé de matériaux fluvio-lacustres du plio-quaternaires (marnes, argiles ou sables) surmontés de limons (Lorenchet de Montjamont & Tegye, s.d.).

L'écorégion de la Dombes présente des conditions relativement similaires mais se différencie par la présence d'une couverture morainique caractéristique au sommet du plateau (Fleury et al., s.d.). La Dombes est caractérisée par la présence de nombreux étangs reliés par un dense réseau de fossés mis en place au XII^{ème} siècle par les moines, facilité par les conditions géologiques locales favorables à la rétention d'eau (Syndicat Mixte Veyle Vivante, 2013). Ces étangs à vocation piscicole, ont la particularité d'être mis en assec tous les 3 à 4 ans dans le but de minéraliser les vases par une mise en culture (Chambaud et al., 2012b). Bien qu'anthropisé, ce système apparaît néanmoins propice à l'accueil d'espèces patrimoniales (Barnaud & Fustec, 2007 ; Chambaud et al., 2012b). G. Barnaud et E. Fustec (2007) notent que le nombre d'étangs permet une « complémentarité d'utilisation par la faune et la flore, dans l'espace et le temps » palliant ainsi la disparition momentanée de surfaces en eau. Toutefois, les régions d'étangs se révèlent particulièrement sensibles aux pratiques piscicoles, à la rectification des berges, à l'utilisation de phytosanitaires à proximité des plans d'eau ou la prolifération d'espèces exotiques envahissantes par exemple (Barnaud & Fustec, 2007).

Ce bassin versant étant majoritairement rural, il est dominé par la présence de surfaces agricoles. L'habitat y est très diffus en amont et concentré autour de quelques centres urbains en basse vallée de la Veyle. Toutefois, ce territoire subit une croissance démographique relativement importante qui concourt à l'expansion des zones urbaines au détriment des surfaces agricoles (Syndicat Mixte Veyle Vivante, 2013).

L'étude de ce sous bassin versant apparaît particulièrement intéressante pour réaliser les premiers tests méthodologiques car il est composé de vastes ensembles géologiques relativement homogènes. De plus, le secteur de la Dombes fait partie des grandes zones humides identifiées dans le bassin Rhône-Méditerranée.

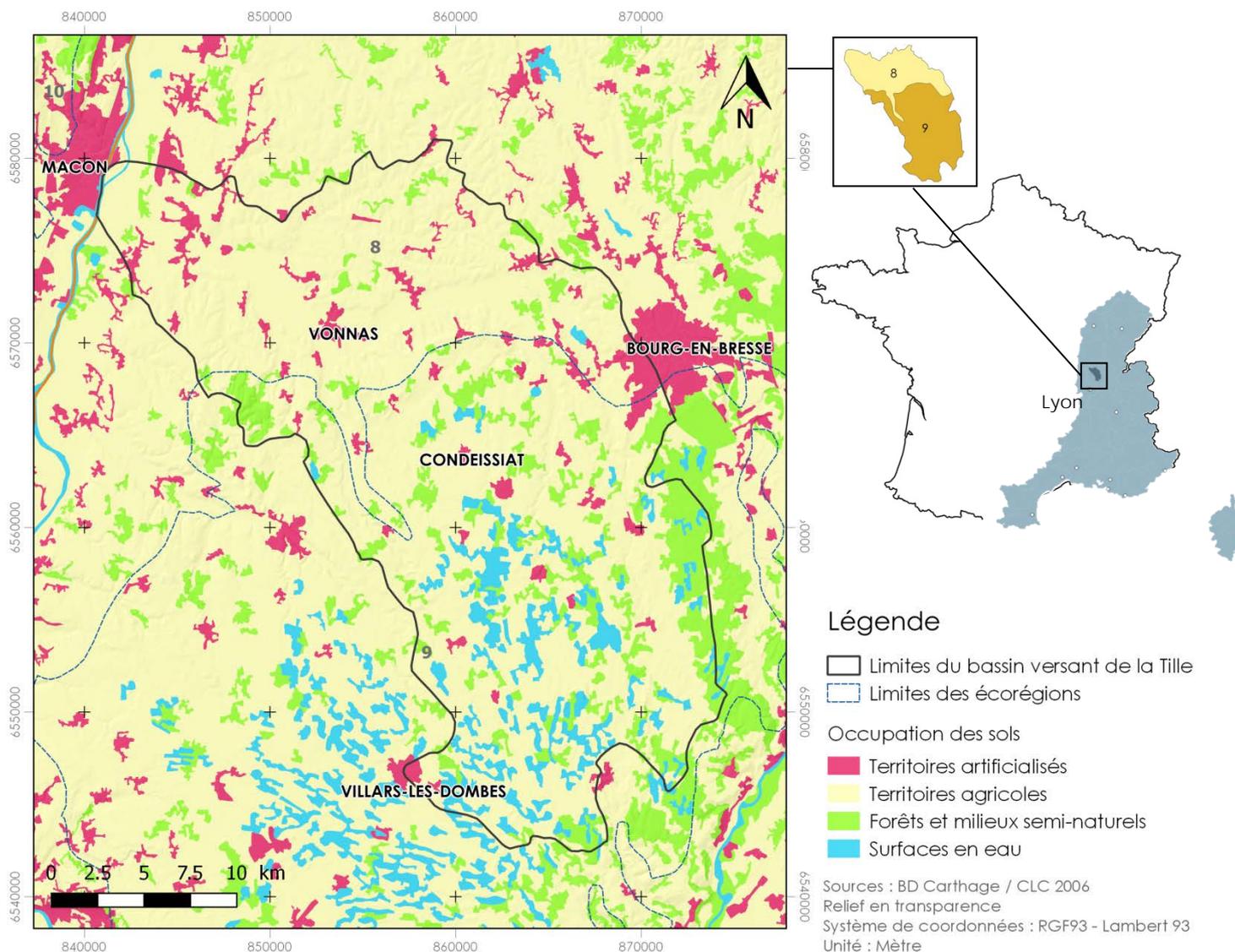


Figure 3 : Carte représentant l'occupation des sols dans le bassin de la Veyle et la délimitation des écorégions (8 : Plaine de la Saône et de la Bresse / 9 : Dombes)

1.4.2 La Tille

Le bassin versant de la Tille est situé au Nord-Est de la ville de Dijon, dont il couvre une partie de la commune. La majorité de son territoire fait partie de la Côte d'Or, hormis 70 km² en tête du bassin qui appartiennent à la Haute-Marne. La Tille s'écoule globalement depuis le nord-ouest vers le sud-est où elle conflue dans la Saône en rive droite. Le linéaire de cours d'eau cumulé est d'environ 500 km pour une superficie de 1280 km² (EPTB Saône&Doubs, 2011), son réseau hydrographique est donc moins dense que celui de la Veyle.

Ce bassin versant traverse trois écorégions (Fig. 4) : les côtes calcaires Est (10) en amont, les plateaux Haut-Saônois (56) dans sa partie centrale et en aval la Plaine de la Saône et de la Bresse (8), à l'instar de la Veyle (Chambaud et al., 2012b). Ainsi, la partie amont est dominée par des formations de calcaires massifs fracturés très perméables et d'affleurements marno-calcaires hérités du Secondaire et érodés au cours du Tertiaire et du Quaternaire. Ce plateau est entaillé par de nombreuses vallées de taille modeste. Il est à noter que certaines combes sont sèches. Les mouvements tectoniques liés à

la surélévation du seuil de Bourgogne et à l'effondrement du fossé bressan sont à l'origine de cette organisation structurale. Il en résulte également un réseau de failles particulièrement important qui peut influencer les écoulements de surface. Les plateaux Haut-Saônois, en position intermédiaire sur le bassin, possède une géologie comparable ; l'écorégion est composée de calcaires massifs et d'affleurements marno-calcaires du Jurassique (Chambaud et al., 2012b).

Comme pour la Veyle, le bassin versant de la Tille est majoritairement rural. La partie amont est marquée par une faible densité de population ; seul 20% de la population réside dans la partie amont du bassin. Des forêts couvrent les interfluves tandis que les vallées sont occupées par des prairies pâturées. (EPTB Saône&Doubs, 2011). *A contrario*, les alentours de Dijon sont particulièrement attractifs en raison de l'influence de ce pôle urbain. Outre la pression foncière qui existe en périphérie de la ville, il est à noter que de nombreuses industries sont présentes dans sa partie est (EPTB Saône&Doubs, 2011).

Le choix de ce sous bassin versant permet de confronter la méthode à une région disposant d'une géologie et d'une géomorphologie davantage contrastée par rapport à la Veyle.

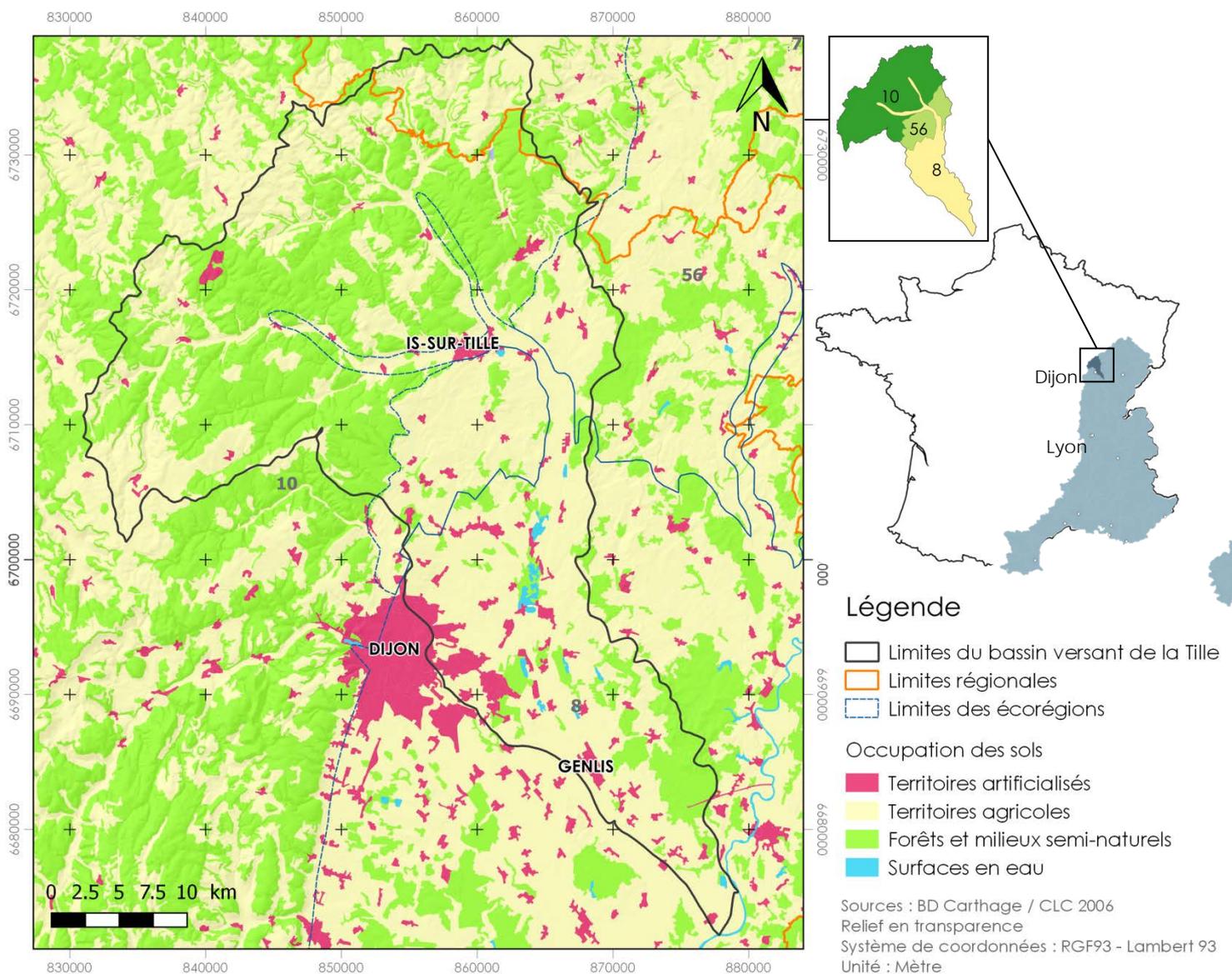


Figure 4 : Carte représentant l'occupation des sols dans le bassin de la Tille et la délimitation des écorégions (8 : Plaine de la Saône et de la Bresse / 56 : Plateaux Haut-Saônois / 10 : Côtes calcaires Est)

2. Matériels et méthodes

Les agences de l'eau utilisent désormais exclusivement des logiciels libres. C'est pourquoi l'ensemble des tests méthodologiques sont réalisés à partir de QGIS (QGIS Development Team, 2017), GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017) et SAGA GIS (Conrad et al., 2015).

2.1 Localisation des zones humides sur la base de facteurs abiotiques

Dans un premier temps, les bassins versants retenus pour cette étude sont divisés selon les limites des écorégions, unités élémentaires pour l'application de la méthode, en vue de rendre compte des spécificités locales. La présence de zones humides est conditionnée par l'existence de configurations de relief propices couplée à une géologie favorable. Il est décidé d'étudier ces deux éléments indépendamment puis de les confronter pour mettre en lumière les secteurs qui cumulent ces deux critères. Il est à noter que le facteur climatique, intégré dans la délimitation des écorégions, ne fait pas l'objet d'une approche à une échelle plus fine.

2.1.1 Analyse du relief

Les caractéristiques topographiques et géomorphologiques favorables pour chacune des écorégions, décrites dans le guide pour la reconnaissance des zones humides (Chambaud et al., 2012b), peuvent être résumées en cinq types de configurations propices aux zones humides :

- Les secteurs plats, tels que les larges fonds de vallée, les plateaux, les plaines, les replats topographiques ;
- Les dépressions et micro-dépressions ;
- Les talwegs et les vallons ;
- Les pentes favorables ;
- Les secteurs situés en altitude.

Il apparaît donc nécessaire de s'interroger sur les méthodes qui permettent de distinguer ces différentes configurations dans le paysage.

L'indice topographique d'humidité

Plusieurs études (Asconit Consultants & Isthme, 2011 ; MEDDE & GIS Sol, 2014 ; TTI Production & Acer Campestre, 2012) prennent en considération un indice topographique pour déterminer les secteurs favorables aux zones humides. Afin de déterminer si cet indice peut apporter un élément complémentaire à l'approche par écorégion, des essais sont réalisés sur les bassins versants retenus.

Cet indice, basé sur les travaux de Beven et Kirkby (1979), permet de localiser, à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT), les secteurs propices à la concentration et au ralentissement du ruissellement. En effet, il s'agit de prendre en compte, pour chaque cellule du MNT, l'aire drainée en amont, également appelée « aire contributive », et la pente locale. Cet indice est basé sur le calcul suivant :

$$\text{Indice Topographique d'Humidité} = \ln\left(\frac{a}{\tan(b)}\right)$$

a : aire drainée en amont
b : pente locale

Ainsi, plus l'aire drainée en amont est vaste et plus la pente locale est faible, plus le secteur est favorable à l'accumulation de l'eau.

Toutefois, il est à noter que cet indice topographique se révèle peu opérationnels dans les vallées caractérisées par des fonds plats puisque les pentes nulles engendrent des divisions par zéro. Le *SAGA Wetness Index* permet de contourner ce problème en basant ses calculs sur les surfaces contributives modifiées (Conrad et al., 2015).

Néanmoins, cette approche par l'indice topographique d'humidité semble restrictive puisqu'elle ne permet pas de mettre en évidence les secteurs propices à la rétention de l'eau au sommet des plateaux par exemple, en raison des valeurs faibles de l'aire drainée. Cette approche topographique omet certains secteurs qui pourraient être favorables s'ils sont associés à des conditions géologiques propices. C'est la raison pour laquelle l'étude menée à l'échelle de la France métropolitaine qui intègre ce paramètre exclut les Alpes, le Massif central et les Pyrénées des secteurs favorables aux zones humides (MEDDE & GIS Sol, 2014). Ainsi, bien que régulièrement utilisée dans la littérature, cette méthode n'est pas retenue pour la localisation des zones humides par écorégion.

L'indice de position topographique de Wood (1996), une première approche des formes du relief

Afin d'appréhender les formes du relief pour localiser les zones à dominante humide, l'Agence de l'eau Adour-Garonne (Asconit Consultants & Isthme, 2011) utilise le module *r.param.scale* de GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017) qui permet d'obtenir l'Indice de Position Topographique (*Topographic Position Index*). L'option « feature » de ce module discerne, à partir du MNT, les formes du relief. Basé sur les travaux de Wood (1996), cet outil compare la valeur de chaque maille du MNT à celle des cellules avoisinantes. Ainsi, six configurations, assimilées à des formes du relief, peuvent être discernées (Fig. 5).

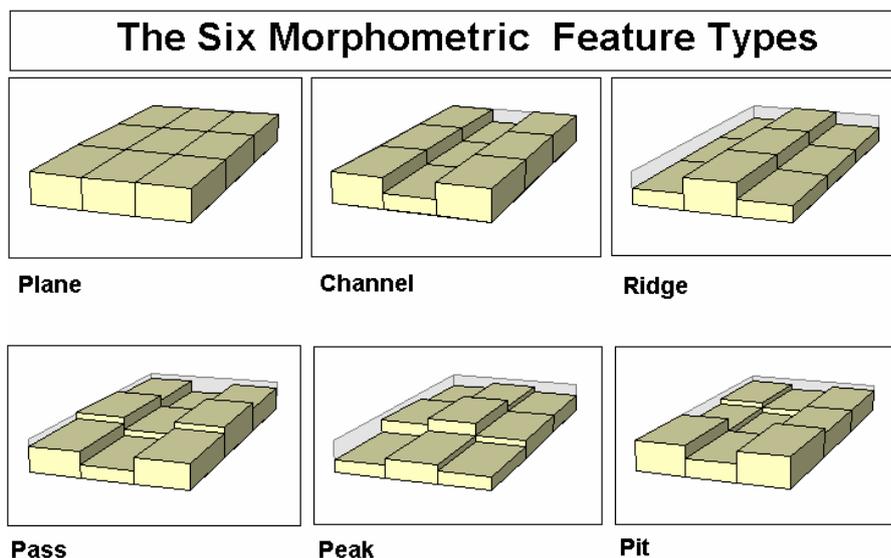


Figure 5 : Formes élémentaires du relief : Plan, Talweg, Crête, Col, Sommet, Dépression (Wood, 1996)

La taille de la fenêtre mobile, de largeur Δ , détermine le nombre de cellules concomitantes à la cellule centrale (z) pris en considération (Fig. 6). La valeur Δ peut être ajustée ; plus elle est importante, plus le résultat final est lissé. Il convient de préciser que lorsque Δ augmente, les secteurs qualifiés de « plats » entre « crête » et « talweg » ont tendance à être surestimés, en raison de l'effet de lissage.

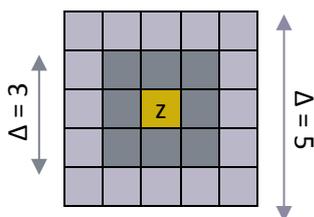


Figure 6 : Schéma représentant une fenêtre de calcul

Ces formes du relief peuvent être reclassées, avec le module *r.reclass* de GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017), selon leur potentiel à accueillir des zones humides (Asconit Consultants & Isthme, 2011) :

- Potentiel faible : crête (ridge) et sommet (peak)
- Potentiel moyen : col (pass) et plan (plane)
- Potentiel élevé : talweg (channel) et dépression (pit)

Toutefois cette classification générale doit être relativisée. Les campagnes de terrain réalisées dans le cadre de l'élaboration du guide pour la reconnaissance des zones humides mettent en évidence qu'au-delà d'une certaine altitude, variable selon la localisation géographique, les territoires sont caractérisés par la présence de zones humides (Chambaud et al., 2012a). Cela s'explique par la prédominance du facteur météorologique (précipitations abondantes, humidité ambiante importante, températures qui limitent l'évapotranspiration). Quels que soient le relief (pente, exposition) et les matériaux géologiques, les sondages pédologiques présentent des traces et des taches d'hydromorphie dès la surface. Ainsi, dans la méthode SIG développée, toutes les surfaces seront considérées comme zones humides au-delà d'une certaine altitude propre à chaque écorégion concernée.

Des talwegs et vallons difficiles à appréhender

La transposition de configurations spatiales en formes du paysage induit l'émergence de questions méthodologiques. En effet, cette première approche du relief apporte une vision biaisée des vallons car le module *r.param.scale* considère les talwegs comme une rangée de cellule plus basse que les deux rangées de cellules adjacentes dans la fenêtre de calcul. Or, cela génère des talwegs qui suivent les lignes horizontales et verticales du maillage du MNT puisque les diagonales ne sont pas prises en compte. L'utilisation du module *r.param.scale* (Wood, 1996) est donc abandonnée.

Dans le dictionnaire encyclopédique de l'Écologie et des Sciences de l'Environnement, les vallons sont définis comme une « structure géomorphologique caractérisée par une dépression allongée généralement creusée dans le substratum rocheux par l'érosion due à un cours d'eau » (Ramade, 2002). Il semble en effet important de considérer l'aspect hydrologique, car les vallons correspondent à des dépressions allongées décimétriques au sein desquels se concentre le ruissellement.

Pour distinguer les surfaces en aval qui concentrent le ruissellement et l'aire drainée en amont, il est nécessaire de définir un seuil de manière empirique pour le raster d'accumulation de flux. Les rasters d'accumulation de flux indiquent en chaque maille la surface drainée depuis l'amont. Plusieurs méthodes existent pour les logiciels SAGA (Conrad et al., 2015) et GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017). Celle retenue est disponible à partir du logiciel SAGA GIS et se nomme *Catchment Area (Parallel)*. Il est à noter qu'il s'avère nécessaire de corriger le MNT au préalable, à l'aide du module *r.fill.dir* de GRASS GIS, pour permettre la continuité des écoulements de l'amont vers l'aval puis le calcul de l'aire drainée.

Plusieurs essais semblent attester que le seuil de 50 000 m² est le plus approprié pour discerner les vallons par rapport aux surfaces ruisselantes en amont pour les bassins versants de la Tille et de la Veyle (Fig. 7 et annexe 3).

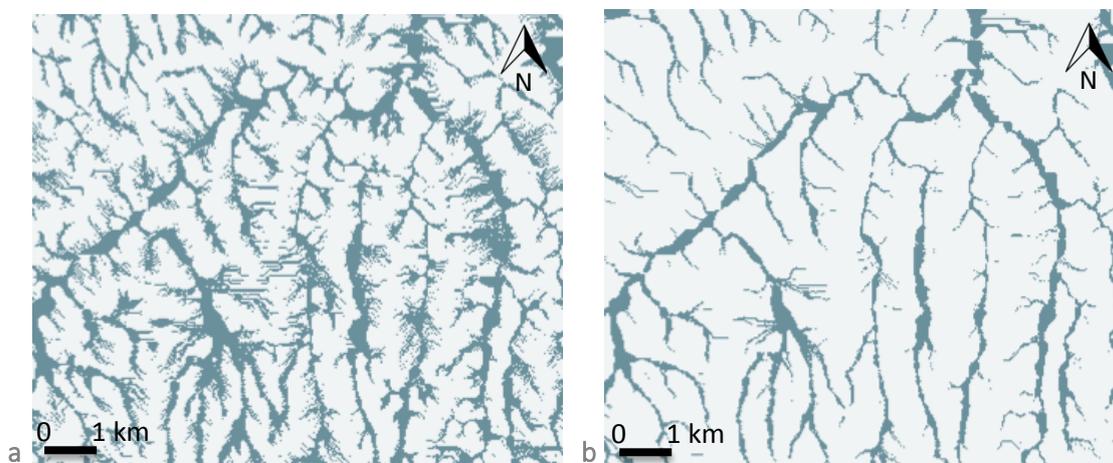


Figure 7 : Aperçu des vallons (en bleu) repérés à partir du raster d'accumulation de flux selon différents seuils (a : seuil = 10 000 m² ; b : seuil = 50 000 m²)

Une nouvelle méthode de classification des formes du relief : *r.geomorphon*

L'extension *r.geomorphon* de GRASS GIS (disponible avec la version 7) permet également de mettre en évidence les formes du relief. Cette méthode, contrairement à *r.param.scale*, ne prend pas en compte les valeurs des cellules voisines immédiates mais s'inspire du principe de ligne de mire développé par Yokoyama et al. (2002). En effet, cette méthode, basée sur les travaux de Jasiewicz et Stepinski (2013), adapte la distance à prendre en compte selon la notion de « *terrain openness* ». Il s'agit de calculer le rapport entre ce qui est appelé l'angle au zénith (*zenith angle*) et l'angle au nadir (*nadir angle*) au sein d'un rayon défini par l'utilisateur (*lookup distance*) (Fig. 8). Ce rapport entre les angles du zénith et du nadir, calculé pour chaque maille du MNT dans huit directions, permet de considérer uniquement les voisins visibles les plus lointains compris dans le rayon de recherche (*lookup distance / search distance*) (Fig. 9). Ce concept permet de s'affranchir des petites variations locales que peut engendrer l'étude des voisins immédiats (Jasiewicz & Stepinski, 2013), c'est pourquoi ce module est préféré au module *r.param.scale*.

Un petit rayon de recherche permet de détecter les formes du relief locales de dimension restreinte. *A contrario*, une valeur élevée permet de mettre en évidence les grandes formes du relief qui structurent le paysage (Jasiewicz & Stepinski, 2013). Ce rayon a été fixé à 500 m car une valeur supérieure engendre davantage de temps de calcul pour un résultat relativement similaire et une valeur inférieure met moins en évidence les formes structurantes du paysage. En outre, le seuil qui permet de distinguer les secteurs plats a été fixé de manière empirique à 2°. Ce seuil permet de s'affranchir des artefacts présents dans les fonds de vallée, notamment liés à la microtopographie ou aux courbes de niveau.

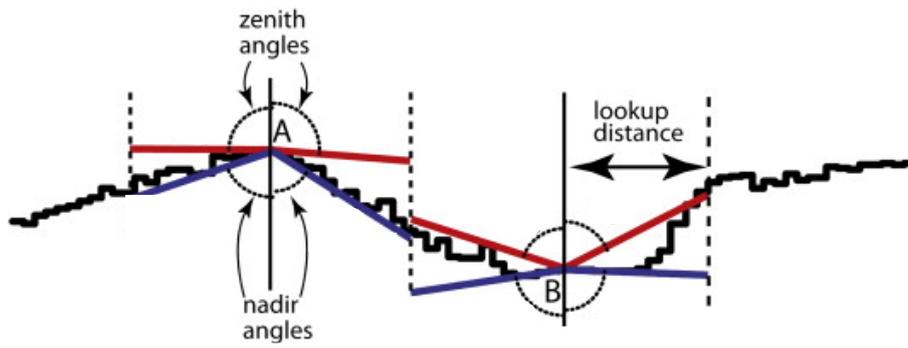


Figure 8 : Angles du zénith et angles du nadir au sein de rayons de recherche (Jasiewicz & Stepinski, 2013)

Chaque cellule du MNT est donc comparée aux 8 valeurs des voisins visibles les plus lointains (Fig. 9). Les altitudes équivalentes à la valeur de la cellule centrale sont représentées par un point vert, celles plus basses en bleu et celles plus hautes en rouge.

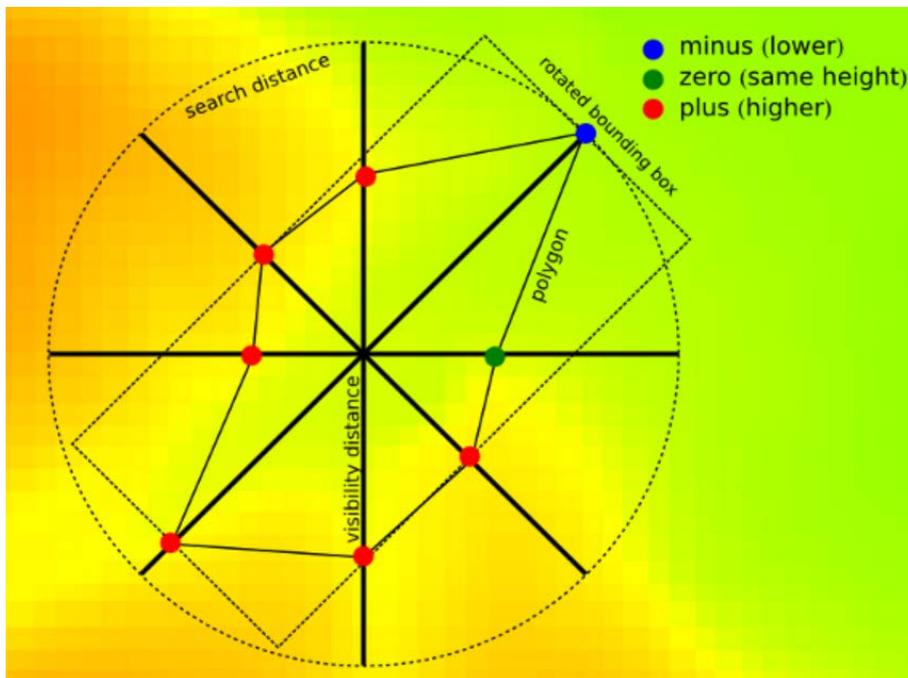


Figure 9 : Localisation des points visibles les plus lointains sur les 8 axes autour de la cellule centrale (D'après le manuel de GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017))

Selon la configuration des huit valeurs, dix formes peuvent être distinguées (Fig. 10).

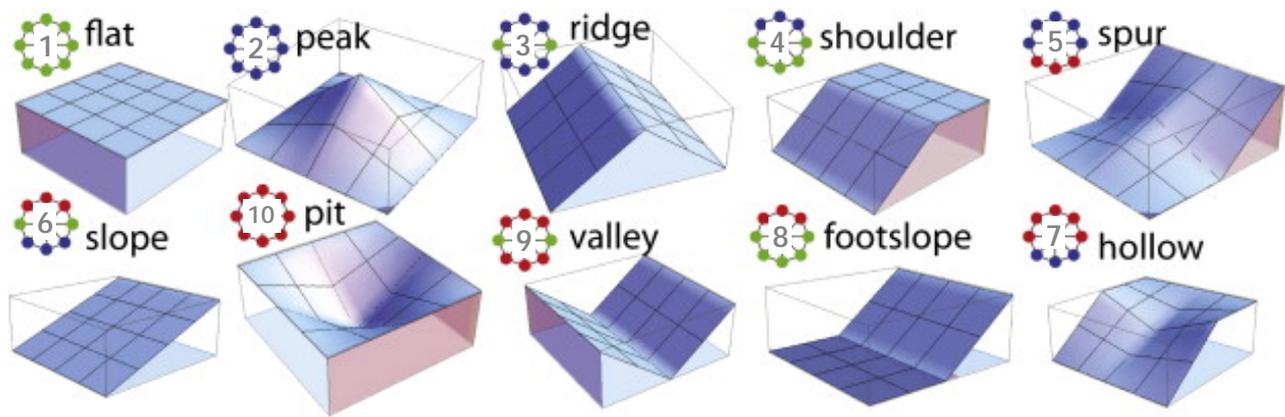


Figure 10 : Formes élémentaires du relief : plan (1), sommet (2), crête (3), haut de versant (4), éperon (5), pente (6), dépression (10), vallée (9), bas de versant (8), creux sur versant (7) (Jasiewicz & Stepinski, 2013)

Mise en évidence des pentes favorables

La pente se révèle un élément essentiel à prendre en compte puisque la topographie constitue le facteur prédominant expliquant les mouvements de l'eau (Mérot et al., 2006). Néanmoins, Mazagol et al. (2008) soulignent qu'aucun seuil précis n'est fourni dans la littérature pour définir les pentes propices au ralentissement du ruissellement qui conditionne la présence de zones humides. En effet, à pente égale, la rétention de l'eau varie selon la texture du sol, sa perméabilité et la rugosité de la végétation sus-jacente (Mazagol et al., 2008).

Le guide pour la reconnaissance des zones humides indique que dans certaines écorégions, les pentes douces peuvent être favorables à la présence de zones humides en raison de leur configuration, du substrat superficiel ou de circulations d'eau hypodermiques (Chambaud et al., 2012a). Ce critère de pente douce s'avère toutefois subjectif et nécessite d'être défini en vue de l'intégrer dans la démarche de localisation des zones humides par SIG.

Les seuils de pente préconisés dans la littérature pour définir celles propices aux zones humides sont très variables (Tab. 2). Pour ne pas avoir à déterminer un seuil fixe, certains proposent un gradient de favorable à défavorable. Toutefois, cela engendre un résultat présentant des zones humides avec différents degrés de probabilité (Jarleton, 2009 ; Jones et al., 2009 ; Pierre, 2002 ; Zro et al., 2014). Il est également possible d'intégrer un seuil de pente différent selon la distance au cours d'eau (TTI Production & Acer Campestre, 2012) ou selon l'altitude (Mazagol et al., 2008). Le seuil de pente est donc un critère qui doit être adapté localement.

Tableau 2 : Seuils proposés dans la littérature à partir duquel les pentes sont contraignantes pour la présence de zones humides (les seuils adaptés aux zones humides d'altitude ne sont pas renseignés)

Références	Pente (°)	Pente (%)
Pierre, 2002	1	1,5
Mazagol et al., 2008	2	3,5
Zro et al., 2014	4	7
Jones et al., 2009	5	9
Niu et al., 2009	5	9
SAGE Clain, 2013	6	10,5
TTI Production & Acer Campestre, 2012	6	10,5

Avec le module *r.slope.aspect* de GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017), il est possible d'extraire à partir du MNT la pente et la courbure du relief pour chaque cellule du MNT. Toutefois, la pente calculée sur une cellule de plusieurs mètres de côté correspond parfois à une réalité plus hétérogène.

Z. Niu et al. (2009) se sont intéressés aux valeurs de pente observées au sein des zones humides inventoriées en Chine en vue de les caractériser. Le calcul des pourcentages cumulés de leur distribution met en exergue que la majorité des zones humides (79,72%) se localise sur des pentes inférieures à 1° et que le seuil de 3° permet de caractériser plus de 90 % d'entre elles. Ils remarquent que seuls 0,83% des zones humides se situent sur des pentes supérieures à 8°. Ils attribuent cela à des imprécisions du MNT (Niu et al., 2009).

Le calcul du pourcentage cumulé des surfaces de zones humides par classe de pente a été reproduit pour les bassins versants de la Veyle et de la Tille à partir des inventaires de zones humides vectorisés disponibles mis à disposition par les portails des Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) (Tab. 3). Ainsi, il est possible de vérifier la distribution des zones humides par rapport aux pentes dérivées du MNT.

A noter que sur GRASS (GRASS Development Team, 2017), l'ajout des inventaires zones humides en tant que masque (*r.mask*) permet de calculer rapidement les classes de pentes en réalisant un rapport statistique à partir du raster de pentes (*r.report*).

Tableau 3: Distribution cumulée des surfaces de zones humides selon différents seuils de pente

Pente	Veyle	Tille	Chine (Niu et al., 2009)
< 1°	69%	68%	80%
< 2°	95%	89%	-
< 3°	98%	92%	94%
< 4°	99%	95%	-
< 5°	100%	96%	98%
< 6°	100%	97%	-
< 7°	100%	98%	-
< 8°	100%	98%	-

Pour le paramétrage des modules qui permettent de classifier les formes du relief, le seuil de 2° a été attribué pour distinguer les surfaces planes des secteurs de pentes. Le choix du seuil qui distingue les pentes douces susceptibles d'accueillir des zones humides et les pentes trop abruptes s'avère complexe. En ce qui concerne la Veyle, il apparaît judicieux de choisir le seuil de 4° comme limite puisque pratiquement la totalité des zones humides de l'inventaire (99%) se situe en deçà de ce seuil de pente. De plus, le relief du bassin versant de la Veyle étant peu marqué, il est nécessaire d'être vigilant et de ne pas surestimer ce seuil pour mettre en évidence les secteurs qui ne sont pas favorables. Des contrôles de terrain ont permis de confirmer la pertinence de ce choix ; 22 sondages ont été réalisés le long de transects prédéfinis, perpendiculaires aux vallées. Deux sites qualifiés de hors zone humide par l'approche SIG en raison du seuil de pente présentaient néanmoins des critères de sols hydromorphes. L'un présentait une microtopographie permettant la présence de zones humides localement. Le second site devait probablement disposer de caractéristiques géologiques particulières car le sondage réalisé sur le versant opposé, possédant une pente similaire, ne présentait pas de caractéristiques hydromorphes.

Par ailleurs, ce seuil a été transposé pour le bassin versant de la Tille car 95% des zones humides inventoriées possèdent des pentes inférieures à 4° et que cela a été considéré comme représentatif.

Outre le degré d'inclinaison, la courbure de la pente joue en rôle essentiel. En effet, les pentes régulières ou concaves se révèlent plus propices que les pentes convexes (Mazagol et al., 2008). Le module *r.slope.aspect* de GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017) est utilisé pour déterminer la courbure du terrain. Les valeurs obtenues qui représentent les formes convexes sont positives tandis que celles qui correspondent aux formes concaves sont négatives. La valeur nulle est réservée aux pentes régulières. Il est possible de représenter de façon schématique les cas de figure possibles (Tab. 4). Hormis les secteurs considérés comme plats (inférieurs à 2°), seuls les pentes douces comprises entre 2 et 4°, et présentant un profil concave ou régulier peuvent être considérées comme propices, sous réserve d'une lithologie favorable.

Tableau 4 : Schéma représentant les différentes formes de versants selon la pente et la courbure

	Peu de pente (0 – 2°)	Pente douces (2 – 4°)	Pente trop élevées (>4°)
Concave			
Régulière			
Convexe			

Echelle de restitution et résolution du MNT

L'échelle de restitution est fixée au 1/25 000 par l'Agence de l'eau ; ce choix s'explique par la problématique à laquelle doit répondre cette carte. C'est à cette échelle que s'organisent la planification et le suivi des actions mises en œuvre dans le cadre du SDAGE. Il est donc pertinent de choisir une résolution des données d'entrée adaptée à cette échelle de restitution. Laurent Couderchet, professeur de géographie à l'université Bordeaux Montaigne et chercheur à l'UMR Passages CNRS, a souligné lors d'une réunion ayant eu lieu en 2016, que si les éléments cartographiés ne varient pas de manière significative, tels que les facteurs abiotiques (géologie, topographie), l'échelle conserve sa robustesse dans le temps. Ainsi, une carte qui localise les secteurs préférentiels à la présence de zones humides à partir des critères liés au relief et à la géologie conserve sa robustesse dans le temps à l'échelle à laquelle elle est élaborée. Toutefois, il convient de préciser qu'au 1/25 000, 1 mm représente 25 m. Ainsi, les périmètres établis devront, au besoin, être affinés sur le terrain s'ils sont réutilisés dans une démarche de délimitation.

Les caractéristiques du relief sont dérivées du Modèle Numérique de Terrain qui constitue une donnée essentielle pour repérer les secteurs favorables à l'accumulation ou au ralentissement du ruissellement (Moore et al., 1991). Il convient de s'interroger sur les dimensions de la maille qui s'avère la plus pertinente. Les résolutions planimétriques choisies par les autres structures qui cherchent à mettre en évidence les secteurs favorables aux zones humides oscillent entre 25 et 100 m (Annexe 4).

Pour déterminer la résolution la plus adaptée, le calcul des formes du relief a été réalisé à partir de deux MNT qui possèdent respectivement une maille de 5 m et de 25 m (Annexe 5). Il en ressort que le MNT à un pas de 25 m permet d'éviter la présence d'artefacts liés à la microtopographie et la mise en évidence de structures favorables aux zones humides de très petites dimensions, telles que les axes de ruissellement sur les parcelles agricoles. En effet, en 2016, L. Couderchet avait notamment alerté sur le fait que les résolutions fines permettaient certes de percevoir davantage de détails mais avait tendance à masquer les

formes générales et structurantes des milieux. Une maille de 25 m permet d'effectuer des calculs plus rapides, compte tenu de la taille des bassins versants étudiés, et reste cohérente avec l'échelle de restitution de 1/25 000 sur laquelle une cellule du MNT représente 1 mm.

Synthèse de la méthode employée

Pour mettre en évidence les secteurs favorables à la présence de zones humides par l'analyse de la topographie, il convient d'avoir à disposition dans un logiciel de SIG (exemples dans GRASS):

- *MNT* : un raster du modèle numérique de terrain au 25 m ;
- *GEOM* : un raster représentant les formes du relief (*r.geomorphon*) dont les codes sont présentés sur la figure 10 ;
- *PENTE* : un raster de pentes (*r.slope.aspect*) ;
- *COURB* : un raster de courbures (*r.slope.aspect*) ;
- *ACCFLX* : un raster d'accumulation de flux (outil *Catchment Area (Parallel)* du logiciel SAGA GIS) reclassé en un raster binaire dont la valeur 1 représente les vallons.

Puis, à l'aide de la calculatrice raster (*r.mapcalc*), les cinq configurations type favorables aux zones humides sont déduites du croisement de ces couches à l'aide des opérateurs suivants :

- « & » exigeant la réalisation des deux conditions,
- « | » imposant la réalisation d'une des conditions,
- « == » pour donner la valeur exacte,
- Et les symboles « < » inférieur et « <= » inférieur ou égal (Tab. 5).

Tableau 5 : Conditions à remplir pour mettre en évidence les configurations type

Configurations type (Chambaud et al., 2012b)	Conditions à remplir
Les secteurs plats, tels que les larges fonds de vallée, les plateaux, les plaines, les replats topographiques	<i>GEOM</i> ==1 (plat) <i>PENTE</i> <2
Les dépressions et micro-dépressions	<i>GEOM</i> ==10 (dépression)
Les talwegs et les vallons	<i>ACCFLX</i> ==1 <i>GEOM</i> == 9 (vallée)
Les pentes favorables	(<i>PENTE</i> < 4 & <i>COURB</i> <= 0) <i>GEOM</i> == 8 (bas de pente)
Les secteurs situés en altitude	<i>MNT</i> > valeur seuil définie par écorégion (Chambaud et al., 2012b)

Ainsi, par écorégion, plusieurs configurations type peuvent être cumulées (Tab. 6 à 9)

Tableau 6 : Caractéristiques du relief à rechercher selon le guide pour l'écorégion 8 (Plaine alluviale de la Saône et de la Bresse) et les configurations type auxquelles elles s'apparentent

Caractéristiques du relief à rechercher (Chambaud et al., 2012b)	Configurations type
Terrasses empilées	Surfaces planes
Microdépressions localisées	Dépressions et microdépressions
Vallons	Talweg et vallons

Tableau 7 : Caractéristiques du relief à rechercher selon le guide pour l'écorégion 9 (Dombes) et les configurations type auxquelles elles s'apparentent

Caractéristiques du relief à rechercher (Chambaud et al., 2012b)	Configurations type
Plateau	Surfaces planes
Microdépressions localisées	Dépressions et microdépressions

Tableau 8 : Caractéristiques du relief à rechercher selon le guide pour l'écorégion 10 (Côtes calcaires Est) et les configurations type auxquelles elles s'apparentent

Caractéristiques du relief à rechercher (Chambaud et al., 2012b)	Configurations type
Affleurement en versant de côte	Surfaces planes
Dépressions	Dépressions et microdépressions
Vallées	Talweg et vallons Surfaces planes (larges fonds de vallées)

Tableau 9 : Caractéristiques du relief à rechercher selon le guide pour l'écorégion 56 (Plateaux Haut-Saônois) et les configurations type auxquelles elles s'apparentent

Caractéristiques du relief à rechercher (Chambaud et al., 2012b)	Configurations type
Plateau	Surfaces planes
Replat ou dépression	Dépressions et microdépressions
Vallée	Talweg et vallons Surfaces planes (larges fonds de vallées)

2.1.2 Analyse de la géologie

L'un des objectifs de la méthode est qu'elle soit transposable à l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée tout en offrant une résolution relativement précise. Ainsi, la carte géologique au 1/50 000, vectorisée et harmonisée à l'échelle de la France (BD Charm-50), est tout à fait appropriée pour appréhender les caractéristiques géologiques à une échelle fine. L'acquisition de cette donnée au Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) représente un investissement financier conséquent. En l'absence d'une solution trouvée entre l'Agence de l'eau et le BRGM pour disposer de cette base de données pour la réalisation des tests, ces informations ont été extraites depuis le flux Web Map Service (WMS) de cette base de données.

Ce flux WMS, disponible à partir de l'adresse suivante : <http://mapdmz.brgm.fr/cgi-bin/mapserv?map=/carto/infoterre/mapFiles/geolHarmWMS.map>, permet de visualiser la base de données à partir d'un logiciel de SIG. Il est possible d'extraire les données en géoréférençant des captures d'écran de la couche WMS ou d'enregistrer directement sous la forme de fichier GTiff l'image du flux WMS dans l'emprise du canevas. Cette seconde méthode nécessite cependant de trouver une solution adaptée pour que le maillage d'enregistrement corresponde au maillage originel de la couche en question. Il est possible de choisir une résolution plus fine, au risque d'obtenir des fichiers plus lourds, pour éviter que les valeurs des mailles soient le résultat d'une moyenne des cellules qu'elles chevauchent.

L'analyse des scans des cartes géologiques au 1/50 000 permet d'associer à chaque couleur du raster obtenu à partir du flux WMS, la formation géologique à laquelle elle est associée ainsi que ses

caractéristiques, notamment sa perméabilité, par la lecture des notices et des légendes des cartes scannées. Puis, à partir du guide pour la reconnaissance des zones humides (Chambaud et al., 2012b), les formations géologiques propices à la présence de zones humides par écorégion sont sélectionnées.

Il convient de préciser que certaines cellules du raster, telles que celles qui délimitent les différentes formations de remplissage, ne correspondent pas à une formation géologique homogène. De même, certains motifs surimposés aux aplats de couleurs (hachures ou pointillés) ne peuvent pas toujours être associés à une unique formation géologique.

Cette méthode, bien que source d'incertitudes sur certaines mailles localisées, permet d'accélérer et d'optimiser la vectorisation des données géologiques à l'aide du logiciel GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017). En effet, par rapport à une vectorisation manuelle envisageable sur de petits territoires (Améten & Géodéfis, 2017), cela permet un gain de temps conséquent pour disposer d'une couche géologique de référence à une maille de 13 m à l'échelle de bassins versants de l'ordre de 1000 km².

L'Agence de l'eau Adour-Garonne (Asconit Consultants & Isthme, 2011) a choisi d'opter pour l'utilisation de la carte au 1/1 000 000, plus facilement disponible. Néanmoins, l'échelle de restitution de cette étude est fixée à 1/250 000 tandis que l'objectif de l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse est de disposer d'éléments exploitables au 1/25 000, d'où la nécessité de disposer de données thématiques plus précises (1/50 000).

Des vérifications de terrain ont permis de conforter ou d'adapter le classement des formations géologiques dans les catégories favorables ou défavorables.

Synthèse de la méthode employée

- Acquisition d'un raster par géoréférencement de la carte géologique au 1/50 000 (BD Charm-50)
- Recherche des formations géologiques favorables par écorégion selon Chambaud et al. (2012b)
- Recensement des codes couleur associés à ces formations favorables (Tab. 10)

Tableau 10 : Caractéristiques géologiques à rechercher selon Chambaud et al. (2012b) pour l'écorégion 8 (Plaine de la Saône et de la Bresse) et exemples de quelque formations repérées.

Caractéristiques géologiques à rechercher (d'après Chambaud et al., 2012)	Exemples de formations présentes sur la carte géologique	Représentation sur la BD Charm-50	Code couleur
Alluvions récentes quaternaires	Alluvions fluviales		32764
Marnes argilo-calcaire	Marnes et argiles pliocène		24479 31744
Sables et limons de surface	Limons et loess Limons décalcifiés Sables de Montmerle		24316 24575/31 24316/0

2.1.3 Croisement des données issues de l'analyse de la topographie et de la géologie

Le guide pour la reconnaissance des zones humides (Chambaud et al., 2012b) indique pour chaque écorégion, les reliefs et la géologie favorable. Il est donc possible de croiser ces critères à partir de logiciels de SIG. Seuls les secteurs qui remplissent les deux conditions, relief favorable et géologie propice, sont considérés comme zone humide. Le résultat est une matrice binaire qui représente les cellules qui

cumulent ces critères (valeur 1) et celles qui, soit n'en possède pas (valeur 0), soit n'en possède qu'un des deux (valeur 0). Cette méthode n'utilise pas de pondération et ne propose pas de hiérarchie des résultats selon le degré de probabilité de présence des zones humides, ce qui évite de recourir à la notion de « zone humide potentielle ».

Néanmoins, certaines formations géologiques du bassin versant de la Tille ne peuvent pas être classées de fait comme favorables ou défavorables. Par exemple, une entité correspond selon les secteurs, soit au manteau argilo-caillouteux des versants (favorable aux zones humides), soit à une formation de calcaires à entroques (défavorable). De même, des tufs calcaires localisés en contexte de fonds de vallée sont considérés tantôt comme une formation drainante, tantôt comme une formation favorable à la rétention d'eau selon la notice géologique.

Sur ces formations difficiles à qualifier, il a été décidé de considérer uniquement le facteur géomorphologique et de repérer les talwegs et vallons situés à l'aplomb de ces formations. Néanmoins, pour ne pas surestimer les zones humides, seuls les secteurs identifiés qui intersectaient le réseau hydrographique (BD Carthage complété par des données issues de OpenStreetMap) ou étaient situés à moins de 50 m d'une source (BDTOPO®) ont été conservés.

Résolution du résultat

Les caractéristiques du relief sont issues du MNT à 25 m tandis que les données géologiques sont disponibles à une maille de 13 m. La maille résultante du croisement de ces données a été fixée à 25 m pour ne pas donner l'illusion que la donnée d'altitude est également à 13 m. Toutefois, en amont du bassin versant de la Tille, au niveau de l'écorégion nommée « Côtes calcaires Est », les vallées sont particulièrement étroites et il s'est avéré plus pertinent de présenter le résultat à une maille de 13 m afin de reconstituer une continuité pour les zones humides situées dans les vallons particulièrement étroits (Fig. 11).

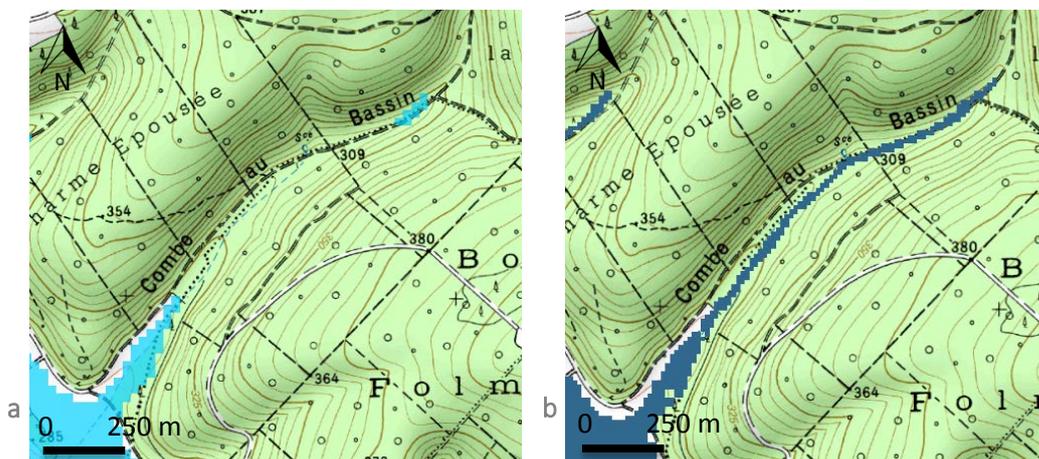


Figure 11 : Secteurs favorables aux zones humides (a : croisement à une maille de 25 m ; b : croisement à une maille de 13 m)

Concernant le maillage, il convient de préciser que le logiciel GRASS (GRASS Development Team, 2017) permet de définir la résolution du raster (*g.region*). Il est judicieux de paramétrer un maillage pour l'ensemble du bassin versant puis de calculer les zones humides avec un masque par écorégion (*r.mask*). Cela permet d'obtenir un raster final sans discontinuité au niveau des limites des écorégions. Il est à noter que le calcul des zones humides sur QGIS (Conrad et al., 2015) avec un masque par écorégion ne permet pas de s'affranchir de ces discontinuités, visibles au 1/25 000.

La loi du quart, garante de la lisibilité de la carte

L'échelle de restitution détermine un seuil de lisibilité, seuil à partir duquel les objets cartographiés sont trop petits pour être visibles. Ainsi, la « loi du quart » indique que « toute plage représentée sur une carte doit avoir au moins $\frac{1}{4}$ de cm^2 » (Girard & Girard, 2010). C'est pourquoi, pour un rendu au 1/25 000, où 0,25 cm sur la carte équivaut à 62,5 m. Aucun objet ne doit présenter de superficie inférieure à 3906,25 m^2 , soit 0,390625 ha.

C'est pourquoi, tous les amas de cellules inférieurs à 0,390625 ha ont été supprimés à l'aide de l'outil *r.reclass.area* de GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017). Cela permet en outre de supprimer les artefacts liés la méthode d'acquisition de la géologie (mailles afférentes aux lignes de contour des formations géologiques, aux pointillés et fines hachures). Ces cellules supprimées sont remplacées par la valeur ayant la plus grande occurrence dans les cellules alentours. Pour cela, l'outil *r.neighbors* (GRASS Development Team, 2017) permet de calculer le mode des cellules avoisinantes.

2.1.4 Déduction des surfaces imperméabilisées

Parmi les secteurs favorables aux zones humides repérés à partir de l'analyse du relief et de la géologie, il convient de supprimer les surfaces imperméabilisées, associées aux réseaux de transport ou au bâti. En effet, ces surfaces ne peuvent plus être considérées comme zones humides selon les critères de l'arrêté ministériel du 1^{er} octobre 2009.

La délimitation de l'emprise des réseaux de transport se base sur la méthode du programme RhoMÉO (Collectif RhoMÉO, 2014). Il s'agit de réaliser des zones tampons autour des linéaires de la BDTOP[®] de 2017. Pour définir les largeurs des zones tampons pour chaque type de route, cette méthode préconise d'attribuer les valeurs suivantes à partir du champ nommé *NATURE* de la couche *ROUTE* :

- Autoroute : $11 \times 3 = 33$ m ;
- Quasi-autoroute : $8,5 \times 3 = 26$ m ;
- Route à 2 chaussées : $5 \times 3 = 15$ m ;
- Route à 1 chaussée : $4 \times 2 = 8$ m.

Bien que ne faisant pas partie de la méthode du programme RhoMÉO, les entités identifiées comme « Bretonne » ont été associées à la valeur de 10 m.

De même, pour définir l'emprise spatiale des voies ferrées, l'attribution d'une valeur se base sur le calcul suivant : Nombre de voies * Largeur d'une voie * 3. Il est à noter que si NB_VOIES = 0, la valeur 1 est attribuée. La largeur est de 1,6 pour les voies qualifiées de larges dans le champ *LARGEUR* ; 1,4 pour celles normales et 0,6 pour celles étroites. Le coefficient 3 permet de considérer l'emprise du ballast (RhoMÉO, 2014).

Concernant le bâti, la méthode du collectif RhoMÉO (2014) propose de prendre en compte uniquement les couches suivantes :

- Bâti indifférencié ;
- Bâti industriel ;
- Bâti remarquable ;
- Cimetière ;
- Construction légère ;
- Piste d'aérodrome ;
- Réservoir ;
- Terrain de sport.

A cela ont été rajoutées les entités de la couche *SURFACE_ROUTE* qui représentent des parkings et aires de péage. De même, la couche *AIRE_DE_TRIAGE* a été ajoutée ; les polygones qu'elle contient ont été augmentés d'une zone tampon de 10 m pour prendre en compte les voies d'accès.

Les éléments de la BDTOPO® de 2017 sont issus de la modélisation géométrique des bâtiments à partir de prises de vue aériennes et de données cadastrales (RhoMéo, 2014). Il s'agit donc de polygones disjoints. Afin de représenter la tache d'urbanisation, il a été décidé d'utiliser la méthode de dilatation/érosion (CEREMA, 2015). Il s'agit de réaliser une zone tampon de 50 m autour de l'ensemble des éléments correspondant au bâti, de fusionner les éléments résultants, puis de réaliser une zone tampon négative de -50 m. Cette méthode permet de combler les surfaces entre plusieurs habitations distantes de moins de 100 m. En zone urbaine, ces surfaces sont artificialisées (routes d'accès, jardins drainés, etc.).

Les taches d'urbanisation ainsi calculées associées aux surfaces correspondant aux réseaux de transport sont déduites des zones humides.

2.1.5 Validation des résultats

Sondages pédologiques sur le terrain

Une vingtaine de points de contrôle a été réalisée sur chaque bassin versant. L'objectif était double : vérifier le caractère favorable des formations géologiques difficiles à appréhender à partir de la notice de la carte géologique et la pertinence des seuils de pente établis pour l'étude du relief.

Comparaison entre les zones humides calculées et inventoriées

Les résultats obtenus sont comparés à une couche de référence, les inventaires départementaux de zones humides. Ces inventaires sont réalisés *a minima* selon les critères de l'arrêté ministériel du 24 juin 2008. Ils sont disponibles en ligne, notamment avec l'interface CARMEN accessible à partir des sites internet des DREAL.

Pour comparer les surfaces modélisées propices aux zones humides avec les données des inventaires, deux matrices de confusion sont construites à l'aide de l'outil *r.coin* de GRASS (GRASS Development Team, 2017). L'une permet de comparer les inventaires aux zones humides modélisées et l'autre de comparer les inventaires aux zones humides modélisées auxquelles sont soustraites les surfaces imperméabilisées.

Les matrices permettent de mettre en évidence deux types d'erreurs : l'erreur de commission (erreur A) et l'erreur d'omission (erreur B) (Fig. 12).

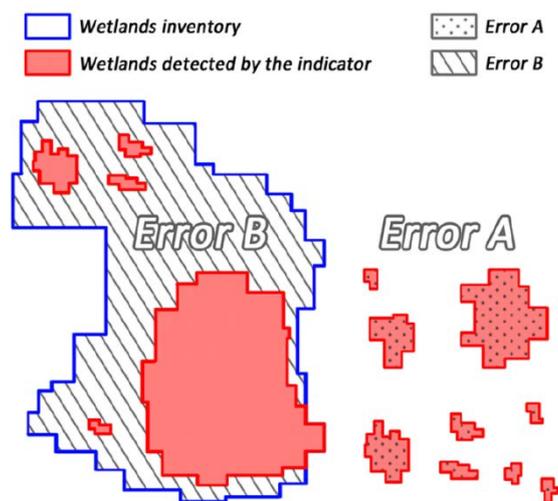


Figure 12 : Erreurs de commission (A) et d'omission (B) calculées à partir de la comparaison entre les zones humides inventoriées (en bleu) et les zones humides calculées (en rouge) (Sanchez et al., 2015)

Plus l'erreur d'omission (erreur B), est faible, plus le modèle est robuste car il permet de détecter la quasi-totalité des surfaces identifiées comme zones humides dans les inventaires. Cette erreur peut s'expliquer par des paramètres non pris en compte par le modèle ainsi que par la précision et la résolution des données d'entrée (MEDDE & GIS Sol, 2014).

En revanche, l'erreur de commission (erreur A), met en évidence les secteurs favorables aux zones humides d'après le modèle mais non inventoriées comme tel (MEDDE & GIS Sol, 2014). Elle peut concerner des zones humides qui ont été drainées ou asséchées (MEDDE & GIS Sol, 2014) ou des secteurs qui n'ont pas fait l'objet d'inventaires ; d'où la nécessité de vérifications sur le terrain.

De plus, il est possible de calculer le Pourcentage d'Accord Brut (PAB), c'est-à-dire le pourcentage de surfaces classées de la même manière dans le modèle et les inventaires de référence (MEDDE & GIS Sol, 2014).

2.2 Diagnostic des zones humides

2.2.1 Evaluation des fonctions

Le recensement des fonctions peut permettre de distinguer les zones humides dégradées et cibler plus finement les zones humides à préserver ou à restaurer (Asconit Consultants & Isthme, 2011). De plus, cela peut être mis en perspective avec les enjeux du bassin, notamment en termes de qualité de l'eau (Asconit Consultants & Isthme, 2011). Il s'agit de permettre l'élaboration d'un suivi des actions menées sur le terrain à pas de temps régulier, tous les 6 ans, en lien avec le cycle du SDAGE (Duffy et al., 2013). Toutefois, l'estimation des fonctions des zones humides à petite échelle nécessite d'identifier des critères simples, fiables, et déductibles de données mises à disposition de façon homogène sur l'ensemble du territoire (Asconit Consultants & Isthme, 2011).

L'évaluation des fonctions de zones humides s'est développée aux Etats-Unis à partir des années 1980 dans l'optique de mettre en évidence la valeur économique de ces milieux (Rapinel, 2012). En revanche en Europe, l'évaluation fonctionnelle des zones humides a pour ambition de diagnostiquer les milieux vulnérables afin de mettre en place des actions adaptées (Rapinel, 2012). En France, il existe différentes méthodes pour l'évaluation des fonctions des zones humides définies selon les critères de l'arrêté du 1^{er} octobre 2009 modifiant celui du 24 juin 2008. Il s'agit notamment de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides (MEFZH) (Gayet et al., 2016) et RhoMÉO, méthode élaborée

pour les zones humides présentes sur le bassin Rhône-Méditerranée (Collectif RhoMéO, 2014). Elles sont basées sur le principe que les fonctions sont « dépendantes de processus et de mécanismes étroitement liés aux composantes structurales » (Bouzillé, 2014). Il s'agit donc de mettre en évidence les « descripteurs » qui traduisent la présence de ces processus et mécanismes (Rapinel, 2012). Toutefois, l'évaluation des indicateurs qui révèlent les fonctions des zones humides sur un site nécessite l'acquisition de données sur le terrain. Cela est envisageable pour étudier des sites qui s'étendent sur moins de quelques kilomètres carrés mais ne semble pas concevable pour rendre compte des fonctions des zones humides sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée. Il est donc nécessaire de définir des indicateurs appréciables à partir d'outils SIG.

Les premiers essais d'évaluation fonctionnelle attribuaient à l'ensemble de la zone humide une ou plusieurs fonctions. Or, les zones humides sont des écosystèmes complexes et leurs fonctions peuvent varier localement (Aidoud & Clément, 2014). Ainsi, S. Rapinel (2012) par exemple, s'attache à délimiter des sous-unités fonctionnelles élémentaires hydro-géomorphologiques, au sein des zones humides avant de leur attribuer des fonctions. Néanmoins, sur de vastes territoires, la division des zones humides en sous-unités a tendance à multiplier le nombre d'éléments à analyser indépendamment. C'est pourquoi, il a été décidé de traiter les fonctions à partir des zones humides au format raster. Ainsi, une ou plusieurs fonctions peuvent être affectées à chaque maille de la grille du raster.

Loin d'être exhaustive, cette méthode propose de définir, avec les outils que présentent les logiciels de SIG, des indicateurs simplifiés qui mettent en exergue les trois fonctions principales vraisemblablement réalisées : hydrologique, biogéochimique et écologique. Outre l'approche par le traitement de données issues de la télédétection, l'étude des fonctions par SIG est relativement récente et peu référencée dans la littérature (Rapinel et al., 2012).

Fonction hydrologique

La fonction hydrologique peut être subdivisée en plusieurs sous-fonctions associées à des processus particuliers. Il s'agit de la rétention des eaux de surface et des sédiments ainsi que la recharge et la décharge de la nappe (Aidoud & Clément, 2014). En effet, le rôle de « réservoir » que peuvent jouer les zones humides en bon état, rôle d'accumulation plus ou moins long, a notamment pour conséquence des effets sur le régime des eaux et les forces érosives (Barnaud & Fustec, 2007).

Désynchronisation des pics de crue

Lors des épisodes pluvieux, les zones humides ont la capacité de retenir l'eau en surface, selon la topographie, ou de favoriser son infiltration. Ce stockage temporaire permet la désynchronisation des pics de crue subséquents aux épisodes pluvieux (Barnaud & Fustec, 2007). Cette aptitude est particulièrement identifiable au niveau des zones humides situées sur des zones planes favorables à l'infiltration ainsi qu'au niveau des plans d'eau et des dépressions propices à l'accumulation d'eaux venues de l'amont. Sur la carte des zones humides obtenue, il semble donc pertinent de repérer les secteurs plats, où la pente est inférieure à 2°, les secteurs dépressionnaires et les plans d'eau. La localisation des surfaces en eau peut être appréhendée de différentes façons.

Tout d'abord, il est possible d'utiliser des outils de télédétection. En effet, ces outils coût-efficace (Sanchez et al., 2015) permettent de travailler avec des données homogènes, continues sur de grandes étendues (Beaupied, 2006) et disponibles à une résolution relativement fine. En effet, les images Landsat par exemple, d'une résolution de 30 m, sont publiées sous licence publique par l'United States Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). S. Lebaut et L. Manceau (2015) les utilisent pour l'identification et la délimitation des zones humides à l'échelle régionale.

L'outil *i.tasscap* de GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017), développé à partir de la méthode d'Analyse par Composantes Principales (ACP) et d'observations empiriques, permet de déduire d'une image satellite la brillance (brightness), l'humidité (wetness) et la verdure (greenness). Sanchez et al., (2015) proposent de définir les surfaces en eau telles que les secteurs sur lesquels 'Greenness' est inférieur à 0,05 et Wetness supérieur à 0,01. En outre, il existe différents indices d'extraction des surfaces en eau (Gastal, 2016). Toutefois, la Dombes, au Sud du bassin versant de la Veyle, est caractérisée par la présence d'étangs piscicoles, mis en assec tous les 2 à 3 ans, c'est pourquoi une approche multidate s'avère indispensable. L'une des contraintes à l'utilisation de données satellites est qu'il est nécessaire de disposer d'images prises lors des épisodes de crue (Beaupied, 2006) ou de la mise en eau des étangs.

La couche *SURFACE_EN_EAU* de la BDTPOPO® représente les surfaces en eau de plus de 20 m de long, les cours d'eau supérieurs à 7,5 m de large, les bassins maçonnés de dimension supérieure à 10 m ainsi que les zones inondables périphériques supérieures à 20 m de large (IGN, 2014). L'utilisation de ces données a été privilégiée car elle permet de discerner davantage d'étangs au niveau de la Dombes, notamment ceux en assec.

Epanchement des crues et dissipation des forces érosives

Les zones humides de fond de vallée, en contact immédiat avec le réseau hydrographique, favorisent l'épanchement des crues et la dissipation des forces érosives (Barnaud & Fustec, 2007). Les Atlas de Zones Inondables (AZI) ou les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) peuvent constituer des indicateurs pertinents. Néanmoins il semble difficile d'acquérir une donnée complète et homogène pour l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée. Les données issues des AZI ont été privilégiées car elles sont plus faciles à acquérir sur l'ensemble du territoire.

D. Oberti et al. (2000b) proposent de déterminer à partir des données relatives aux zones inondables, un temps de retour seuil qui distingue les zones qui peuvent être considérées comme humides ou habituellement inondées. L'Agence de l'eau Artois-Picardie a choisi par exemple la crue décennale comme valeur seuil (Agence de l'Eau Artois-Picardie, s.d.). Cependant, il n'est pas possible de définir un seuil unique en raison de la variabilité des caractéristiques lithologiques locales (Hubert-Moy & Clément, 2014).

Par ailleurs, un site dédié (<https://global-surface-water.appspot.com/>) indique l'occurrence de la présence d'eau sur l'ensemble du globe, à une résolution de 30 m. Toutefois, ces données ont été acquises par traitement d'images satellites, et s'il n'existe pas d'images des crues débordantes, elles ne peuvent pas être représentées.

Afin de disposer d'un critère approprié à l'ensemble du bassin, il est possible d'attribuer cette fonction d'épanchement ou de dissipation des forces érosives à l'ensemble des zones humides situées au niveau des fonds de vallée. Néanmoins, cela nécessite de s'interroger sur la méthode la mieux adaptée pour mettre en évidence les fonds de vallées.

Dans un premier temps, l'outil *Multi-resolution Valley Bottom Flatness* (MrVBF), disponible à partir du logiciel SAGA GIS (Conrad et al. 2015), a été testé. Bien que les paramètres aient été adaptés selon les préconisations de Gallant et Dawling (2003), le sommet du plateau des Dombes est identifié comme vallée en raison de sa configuration particulièrement plane, c'est pourquoi cette méthode a été écartée.

Par ailleurs, l'Agence de l'eau dispose d'une couche SIG au format vecteur qui représente les fonds de vallée extraits à partir d'une méthode élaboré par Alber et al. (2007). Cette méthode repose sur la définition d'une plaine alluviale comme « espace inondable par une hauteur d'eau donnée ». Des zones tampons rectangulaires sont calculées de part et d'autres de l'axe médian des vallées. Puis, dans chaque zone tampon, les valeurs du MNT sont recalculées par rapport à la valeur minimale observée sur la section en vue d'en déduire un MNT représentant les valeurs d'altitude relatives aux plus bas points du fond de

vallée. Un seuil de hauteur d'eau est ensuite choisi de manière empirique afin de délimiter le fond de vallée (Alber et al., 2007). L'avantage de cette méthode est que le résultat est homogène et exploitable sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée. Néanmoins, elle considère uniquement le réseau hydrographique correspondant aux masses d'eau Rivières du référentiel 2010 ; elle ne prend pas en compte les fonds de vallées de certains affluents secondaires.

La troisième méthode testée s'appuie sur la définition des fonds de vallée comme « espace plat entre deux secteurs de pente » (Alber et al., 2007). Il s'agit de calculer la distance au réseau hydrographique, converti en raster, selon un paramètre de friction : la pente dérivée du MNT (Clerici et al., 2011) à l'aide de l'outil *r.cost* de GRASS GIS (GRASS Development Team, 2017). Ainsi, une vallée aux versants plus abrupts semble posséder une largeur plus restreinte dans l'espace en raison de sa projection sur une surface plane (Fig. 13). Une distance seuil (*d*) par rapport au réseau hydrographique (*R*) doit être définie de manière empirique (Fig. 13), des cartes IGN au 1/25 000 peuvent permettre de calibrer ce seuil. Par rapport à une simple zone tampon autour du réseau hydrographique, cette approche est sensible aux variations topographiques (Clerici et al., 2011). De plus, cette méthode, facile à mettre en œuvre, permet de choisir les cours d'eau de référence à prendre en compte dans le calcul.

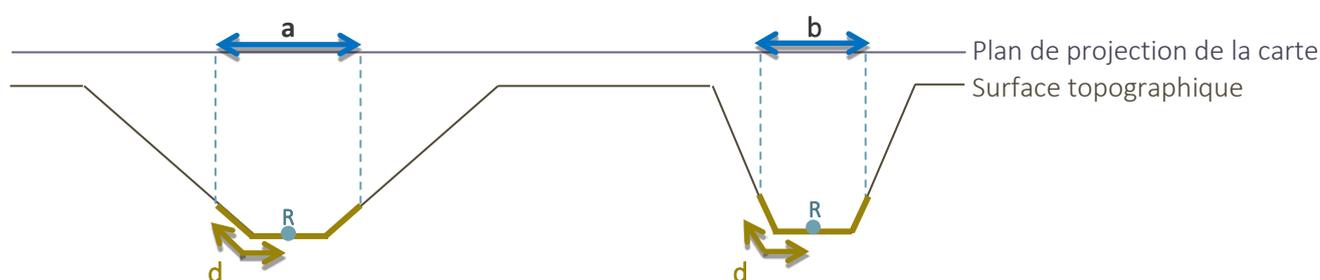


Figure 13 : Schéma illustrant la méthode de Clerici et al. (2011) pour appréhender le fond de vallée

Néanmoins, sur le plateau de la Dombes, les vallées sont très peu encaissées et il est difficile de déterminer un seuil permettant de délimiter les fonds de vallée avec la méthode de Clerici et al. (2011). C'est pourquoi, les fonds de vallée seront considérés selon la méthode de Alber et al. (2007).

Ainsi, la capacité des zones humides à participer à l'épanchement des crues et à la dissipation des forces érosives est jugée effective lorsque les zones humides se situent au niveau des fonds de vallée plats ou lorsqu'elles font partie de zonages liés au risque d'inondation.

Recharge des nappes

Les zones humides situées au-dessus du niveau de la nappe peuvent potentiellement participer à sa recharge lors des épisodes pluvieux (Barnaud & Fustec, 2007). Cependant, il convient de préciser que cette fonction est parfois critiquée car les zones humides qui reposent sur une formation imperméable ne devraient pas *a priori* être capable de transmettre l'eau vers les nappes sous-jacentes. Cet argument peut être réfuté car il existe généralement une hétérogénéité lithologique locale qui permet des flux hydrauliques (Barnaud & Fustec, 2007).

Par ailleurs, suite aux épisodes de crue, les zones ripariennes peuvent restituer l'eau stockée dans les dépressions en surface à la nappe alluviale. De même, les zones humides qui se situent en bas des versants qui enserrant les vallées peuvent restituer à la nappe alluviale l'eau provenant des versants (Barnaud & Fustec, 2007).

Pour appréhender cette fonction, il est également possible d'utiliser l'Indice de Développement et de Persistance Réseau (IDPR) qui traduit l'aptitude des surfaces à laisser l'eau s'infiltrer ou ruisseler (Asconit Consultants et al., 2016). Cet indice, développé par le BRGM, est basé sur le calcul de la différence entre le

réseau hydrographique réel et théorique (SIGES Bretagne, s.d.). Pour le bassin de l'Agence de l'eau Adour-Garonne, les secteurs dont l'IDPR est inférieur à 1000, c'est-à-dire, là où le phénomène d'infiltration est majoritaire par rapport au ruissellement superficiel, ont été retenus pour distinguer le potentiel des zones humides à participer à la recharge de la nappe (Asconit Consultants et al., 2016).

Il est à noter que l'évaluation de la participation de la zone humide à la recharge de la nappe, tout comme pour le soutien des débits d'étiages, s'avère parfois délicate en raison notamment de la complexité de la configuration de certains aquifères souterrains (Barnaud & Fustec, 2007). De même, Adamus et al. (1991) soulignent que les flux hydriques pour la recharge des nappes ou le soutien des étiages sont souvent limités.

Ralentissement du ruissellement et rétention des sédiments au niveau des zones humides de pente

Les zones humides de pente assurent également une fonction hydrologique. En effet, selon leur rugosité, fortement liée au type d'occupation du sol, elles permettent de dissiper l'énergie de l'eau (Barnaud & Fustec, 2007). Cela favorise le ralentissement du ruissellement, notamment en raison de sa capacité d'infiltration. Ce ralentissement permet également de favoriser la rétention de sédiments qui proviennent de l'amont. C'est pourquoi les zones humides de pente, c'est-à-dire dont la pente est supérieure à 2°, et dont l'occupation des sols présente une rugosité permettant de favoriser l'infiltration seront sélectionnées. Les zones humides boisées par exemple sont reconnues pour favoriser la rétention des sédiments (Craft, 2016).

Les données géographiques CORINE Land Cover (CLC) semblent pertinentes pour prendre en compte l'occupation des sols. En effet, elles sont homogènes et continues sur l'ensemble du territoire. De plus, ces données sont faciles d'accès et mises à jour régulièrement, entre 6 et 10 ans. Toutefois, il convient d'être vigilant car l'échelle de production est de 1/100 000 (Janvier et al., 2016).

Fonction biogéochimique

Les zones humides constituent des milieux privilégiés pour la réalisation de processus biogéochimiques en raison la prédominance de l'eau dans ces écosystèmes (Aidoud & Clément, 2014). Ces processus, qui permettent de retenir, d'éliminer ou de transformer certains éléments, sont bénéfiques pour la qualité de l'eau (Aidoud & Clément, 2014). Ils sont à l'origine de ce qui est communément appelé le « pouvoir épurateur » des zones humides (Barnaud & Fustec, 2007).

Dénitrification

La qualité de l'eau est notamment impactée par l'excès d'azote, majoritairement sous forme de nitrate. Cet azote peut être amené au sein des zones humides par l'atmosphère ou l'eau (ruissellement de surface, écoulements souterrains, crues débordantes). L'excès d'azote résulte de certaines activités anthropiques, telles que la combustion d'énergies fossiles ou de l'utilisation en excès d'engrais agricoles par exemple (Germon & Couton, 1999). En outre, la présence élevée de nitrates peut avoir pour conséquence une eutrophisation accélérée des milieux aquatiques (Barnaud & Fustec, 2007).

Les zones humides peuvent participer à la rétention d'azote à des échelles de temps plus ou moins longues. Elle peut également jouer un rôle dans sa dégradation et son élimination, notamment par le processus de dénitrification (Barnaud & Fustec, 2007). Ce processus, qui exige des conditions d'anaérobiose, permet la dégradation des nitrates sous forme d'oxydes d'azote (Barnaud & Fustec, 2007). Les surfaces en eau offrent ces conditions d'anaérobiose, c'est pourquoi leur localisation permet de mettre en évidence les zones humides qui remplissent la fonction biogéochimique. En outre, la pente joue un rôle

déterminant car plus elle est faible, plus le temps de séjour de l'eau dans la zone humide est important. Or, un temps de séjour long optimise la fonction épuratoire (Germon & Couton, 1999). D'où la nécessité de prendre en compte les secteurs plats.

Les zones humides occupées par des surfaces agricoles (CLC) ne sont pas considérées comme favorables à la dénitrification car ces activités peuvent être la source de l'excès d'azote. De plus, le processus de dénitrification nécessite la présence de carbone organique, moins présent dans les terres agricoles que dans les sols forestiers. De plus, les zones humides boisées sont reconnues pour leur capacité à intercepter les nutriments, notamment l'azote et le phosphore (Craft, 2016), tout comme les surfaces enherbées non-traitées (Barnaud & Fustec, 2007).

Par ailleurs, il convient de préciser que l'efficacité de la dénitrification varie fortement dans l'espace et dans le temps (Barnaud & Fustec, 2007). De plus, le processus de dénitrification implique le rejet d'oxydes d'azote vers l'atmosphère, responsable en partie du réchauffement climatique et de la destruction de la couche d'ozone. Ainsi, bien que les zones humides soient valorisées pour leur pouvoir épurateur, il est indispensable d'engager des mesures parallèles de réduction de ces polluants à la source (Barnaud & Fustec, 2007 ; Germon & Couton, 1999).

Séquestration du carbone

Les zones humides possèdent un potentiel de séquestration du carbone (Villa & Bernal, in press). En effet, les conditions réductrices des sols des zones humides limitent la décomposition de la litière, donc la transformation du carbone organique particulaire en carbone dissous. Le carbone est donc stocké par accumulation de matière organique (Aidouh & Clément, 2014 ; Villa & Bernal, in press). Toutefois, le carbone peut être exporté sous forme dissoute ou gazeuse (Villa & Bernal, in press). Il est à noter que les zones humides connectées à des milieux aquatiques favorisent davantage l'export du carbone organique, en raison de l'érosion des berges et des départs de sédiments lors des crues notamment (Barnaud & Fustec, 2007).

Par ailleurs, la séquestration du carbone varie selon l'occupation des sols et l'échelle de temps considérée. En effet, la séquestration du carbone se réalise avec des intensités variables selon le type de zone humide (Villa & Bernal, in press). Toutefois, dans une optique de simplification, les fonctions sont appréciées en termes de présence/absence et non pas selon leur intensité. Il s'agira donc de considérer l'ensemble des surfaces à partir du CLC représentant des surfaces de tourbières, des forêts ou des prairies.

Protection de la ressource en eau potable

En vue de prendre en compte le rôle des zones humides dans la protection de l'eau potable, la méthode de l'Agence de l'eau Adour-Garonne (Asconit Consultants & Isthme, 2011) repère les zones humides au sein des périmètres d'Aire d'Alimentation de Captages (AAC). En plus de ces périmètres, il a été décidé d'ajouter les secteurs correspondant à des ressources stratégiques majeures. Il s'agit de ressources à protéger pour répondre aux besoins futurs des populations, notamment pour l'eau potable. Cependant, les surfaces imperméabilisées ou cultivées ont été retranchées de ces périmètres.

Fonction écologique

En raison de leurs caractéristiques hydrologiques, notamment leur hydropériode, les zones humides peuvent constituer des habitats spécifiques permettant d'abriter des espèces rares ou menacées (Aidouh & Clément, 2014). En effet, ces milieux jouent un rôle essentiel dans l'« accomplissement du cycle biologique » de certaines espèces (Gayet et al., 2016).

Pour évaluer cette fonction à l'échelle du SAGE « Gravona, Prunelli, golfes d'Ajaccio et de Lava », Asconit Consultants et al. (2016) proposent de considérer les secteurs reconnus pour leur biodiversité, tels que les Zones Naturelles d'Intérêt Ecologique, Faunistiques et Floristiques (ZNIEFF) de type 1, les sites Natura 2000, ceux concernés par un Arrêté de Protection de Biotope ainsi que les réservoirs de biodiversité de la trame verte et bleue. Il a été décidé de suivre cette logique et d'ajouter les Réserves Naturelles qui peuvent exister sur certains secteurs du bassin Rhône-Méditerranée. En outre, les données relatives à la trame verte et bleue ne peuvent pas être prises en compte car elles se révèlent très hétérogènes sur le bassin.

Par ailleurs, ces territoires soumis à des mesures de protection ne sont pas toujours délimités à une résolution fine, c'est pourquoi il a été décidé de leur soustraire les secteurs imperméabilisés et cultivés à partir des données CLC.

Bien que la fonction écologique des zones humides soit largement reconnue (Aidoud & Clément, 2014 ; Barnaud & Fustec, 2007 ; Gayet et al., 2016), il apparaît difficile de trouver des indicateurs pour mettre en évidence la spatialisation de cette fonction sans sélectionner uniquement les secteurs protégés par des mesures particulières en faveur de la biodiversité. Or cette méthode a tendance à négliger la biodiversité dite « banale » ou « ordinaire ».

Afin d'obtenir des informations quant à l'évolution de la structure des territoires, il est possible d'étudier la fragmentation et la disparition des habitats (Aidoud & Clément, 2014). L'analyse de la structure des habitats peut être effectuée à partir de méthodes SIG, développées dans le cadre de travaux en lien avec l'écologie du paysage (Burel & Baudry, 1999). En effet, il est notamment possible d'étudier la fragmentation du paysage avec le logiciel Fragstats (McGarigal & Marks, 1995). Néanmoins, la porosité du paysage est fortement liée aux capacités de chaque espèce à se déplacer (McGarigal & Marks, 1995). De plus, il est nécessaire de définir l'échelle à laquelle doivent être calculés les différents indices : celle du bassin versant ou d'une partie du bassin versant correspondant à une écorégion. Par ailleurs, il peut être intéressant d'estimer ces indices à pas de temps régulier, à partir de CLC par exemple, pour avoir une idée de l'évolution de la structure du paysage.

Synthèse des indicateurs employés sous SIG

Pour mettre en évidence les fonctions des zones humides, il convient d'avoir à disposition dans un logiciel de SIG (exemples dans GRASS):

- *PENTE* : un raster de pente (*r.slope.aspect*) ;
- *GEOM* : un raster représentant les formes du relief (*r.geomorphon*) ;
- *CLC* : un raster de l'occupation des sols (CLC – niveau 3) ;
- *EAU_TOPO* : un raster avec les surfaces en eau de la BDTOPPO® ;
- *AZI* : un raster de l'Atlas Zones Inondables ;
- *FDV* : un raster des fonds de vallées ;
- *IDPR* : un raster présentant les classes d'IDPR ;
- *AAC* : un raster avec les Aires d'Alimentation des Captages ;
- *RSM* : un raster avec les ressources stratégiques majeures (eaux souterraines) ;
- *APB* : un raster avec les Arrêtés de Protection Biotope ;
- *ZNIEFF1* : un raster avec les ZNIEFF de type 1 ;
- *N2000* : un raster avec les sites Natura 2000 ;
- *RN* : un raster avec les Réserves Naturelles.

Puis à l'aide de la calculatrice raster (*r.mapcalc*), il est possible de déduire du croisement de ces couches, les fonctions vraisemblablement réalisées par les zones humides à l'aide des opérateurs suivants :

- « & » exigeant la réalisation des deux conditions,
- « | » imposant la réalisation d'une des conditions,
- « == » pour donner la valeur exacte,
- Et le symbole « < » inférieur (Tab. 11).

Tableau 11 : Indicateurs permettant de mettre en évidence les fonctions

Fonctions	Sous-fonctions	Indicateurs
Hydrologique	Désynchronisation des pics de crue	$PENTE < 2 \mid GEOM == 1$ (Plat) $\mid GEOM == 10$ (Dépression) $\mid EAU_TOPO == 1 \mid CLC == 512$ (Plans d'eau)
	Epanchement des crues et dissipation des forces érosives	$AZI == 1 \mid FDV == 1 \mid GEOM == 9$ (Vallée) & $PENTE < 2$
	Recharge des nappes	$IDPR < 1000 \mid PENTE < 2$
	Ralentissement du ruissellement et rétention des sédiments	$(GEOM == 8$ (Bas de pente) $\mid PENTE > 2)$ & $(CLC == 311$ (Forêts de feuillus) $\mid CLC == 312$ (Forêts de conifères) $\mid CLC == 313$ (Forêt mélangées) $\mid CLC == 321$ (Pelouses et pâturages naturels) $\mid CLC == 324$ (Forêts et broussailles en mutation) $\mid CLC == 231$ (Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole))
Biogéochimique	Dénitrification	$PENTE < 2$ & $(EAU_TOPO == 1 \mid CLC == 512$ (Plans d'eau) $\mid (CLC == 311$ (Forêts de feuillus) $\mid CLC == 312$ (Forêts de conifères) $\mid CLC == 313$ (Forêt mélangées) $\mid CLC == 321$ (Pelouses et pâturages naturels) $\mid CLC == 324$ (Forêts et broussailles en mutation) $\mid CLC == 231$ (Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole) $\mid CLC == 512$ (Plans d'eau))
	Séquestration du carbone	$CLC == 311$ (Forêts de feuillus) $\mid CLC == 312$ (Forêts de conifères) $\mid CLC == 313$ (Forêt mélangées) $\mid CLC == 321$ (Pelouses et pâturages naturels) $\mid CLC == 324$ (Forêts et broussailles en mutation) $\mid CLC == 231$ (Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole) $\mid CLC == 411$ (Marais intérieurs) $\mid CLC == 412$ (Tourbières)
	Protection de la ressource en eau potable	$(AAC == 1 \mid RSM == 1)$ & $(CLC == 311$ (Forêts de feuillus) $\mid CLC == 312$ (Forêts de conifères) $\mid CLC == 313$ (Forêt mélangées) $\mid CLC == 321$ (Pelouses et pâturages naturels) $\mid CLC == 324$ (Forêts et broussailles en mutation) $\mid CLC == 231$ (Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole) $\mid CLC == 411$ (Marais intérieurs) $\mid CLC = 412$ (Tourbières))
Ecologique	Habitats	$APB == 1 \mid ZNIEFF1 == 1 \mid N2000 == 1 \mid RN == 1$ & $(CLC == 311$ (forêts de feuillus) $\mid CLC == 312$ (Forêts de conifères) $\mid CLC == 313$ (Forêt mélangées) $\mid CLC == 321$ (Pelouses et pâturages naturels) $\mid CLC == 324$ (Forêts et broussailles en mutation) $\mid CLC == 231$ (Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole) $\mid CLC == 411$ (Marais intérieurs) $\mid CLC == 412$ (Tourbières) $\mid CLC == 512$ (Plans d'eau))

2.2.2 Estimation des pressions

La boîte à outils de suivi des zones humides élaborée pour le bassin Rhône-Méditerranée propose d'identifier deux indicateurs de pression à partir d'une méthode SIG : la pression de l'artificialisation et la pression agricole (Collectif RhoMÉO, 2014). Outre la spatialisation des pressions, cette méthode permet également de disposer d'indicateurs chiffrés pour suivre l'évolution des pressions dans le temps. Dans la présente étude, seule la dimension spatiale des pressions est évaluée. La pression de l'artificialisation est calculée à partir des données issues de la BDTOPO® de 2017 et la pression agricole à partir du Registre Parcellaire Graphique (RPG) qui identifie les groupes de cultures présents au sein d'îlots de parcelles agricoles.

Localisation de la pression de l'urbanisation

La pression liée à l'urbanisation se distingue des secteurs déjà imperméabilisés. Cette pression est mise en évidence par une zone tampon de 50 m autour des éléments bâtis telle que le préconise la méthode RhoMÉO (2014). Les zones humides concernées par cette pression peuvent être menacées par le front d'urbanisation ou l'artificialisation des secteurs aux abords immédiats des surfaces bâties.



Figure 14 : Carte des surfaces imperméabilisées et pression de l'urbanisation à Vonnas, associée à une prise de vue aérienne

Localisation de la pression agricole

Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) anonyme est accessible en ligne gratuitement (data.gouv.fr ou <http://professionnels.ign.fr/rpg>). Il renseigne sur les groupes de cultures présents sur des îlots cultureux (Tab. 12). Il s'agit de données déclaratives des agriculteurs liées au système d'aide de la Politique Agricole Commune (PAC).

La méthode RhoMÉO (Collectif RhoMÉO, 2014) considère que tous les groupes de culture sont susceptibles de dégrader les zones humides, excepté ceux correspondant aux « Estives Landes », aux « Prairies permanentes » et aux « Prairies temporaires ».

Tableau 12 : Groupes de cultures identifiés par le Registre Parcellaire Graphique

Code	Groupe de culture	Code	Groupe de culture
1	Blé tendre	15	Légumineuses à grains
2	Mais grain et ensilage	16	Fourrage
3	Orge	17	Estives landes
4	Autres céréales	18	Prairies permanentes
5	Colza	19	Prairies temporaires
6	Tournesol	20	Vergers
7	Autres oléagineux	21	Vignes
8	Protéagineux	22	Fruits a coque
9	Plantes à fibres	23	Oliviers
10	Semences	24	Autres cultures industrielles
11	Gel (surfaces gelées sans production)	25	Légumes-fleurs
12	Gel industriel	26	Canne à sucre
13	Autres gels	27	Arboriculture
14	Riz	28	Divers

3. Résultats

3.1 Localisation des zones humides

Le premier résultat de la localisation des zones humides par cette méthode sur le bassin versant de la Veyle peut sembler déroutant. En effet, la quasi-totalité du bassin versant (72%) est considérée comme zone humide (Fig. 15). Toutefois, l'étude de la toponymie apporte une première confirmation quant au caractère humide des secteurs surestimés par le modèle (Chambaud et al., 2012a). Les termes « Terre des Vavres », « Les Vernes », « Les gouttes » par exemple attestent de la présence d'humidité.

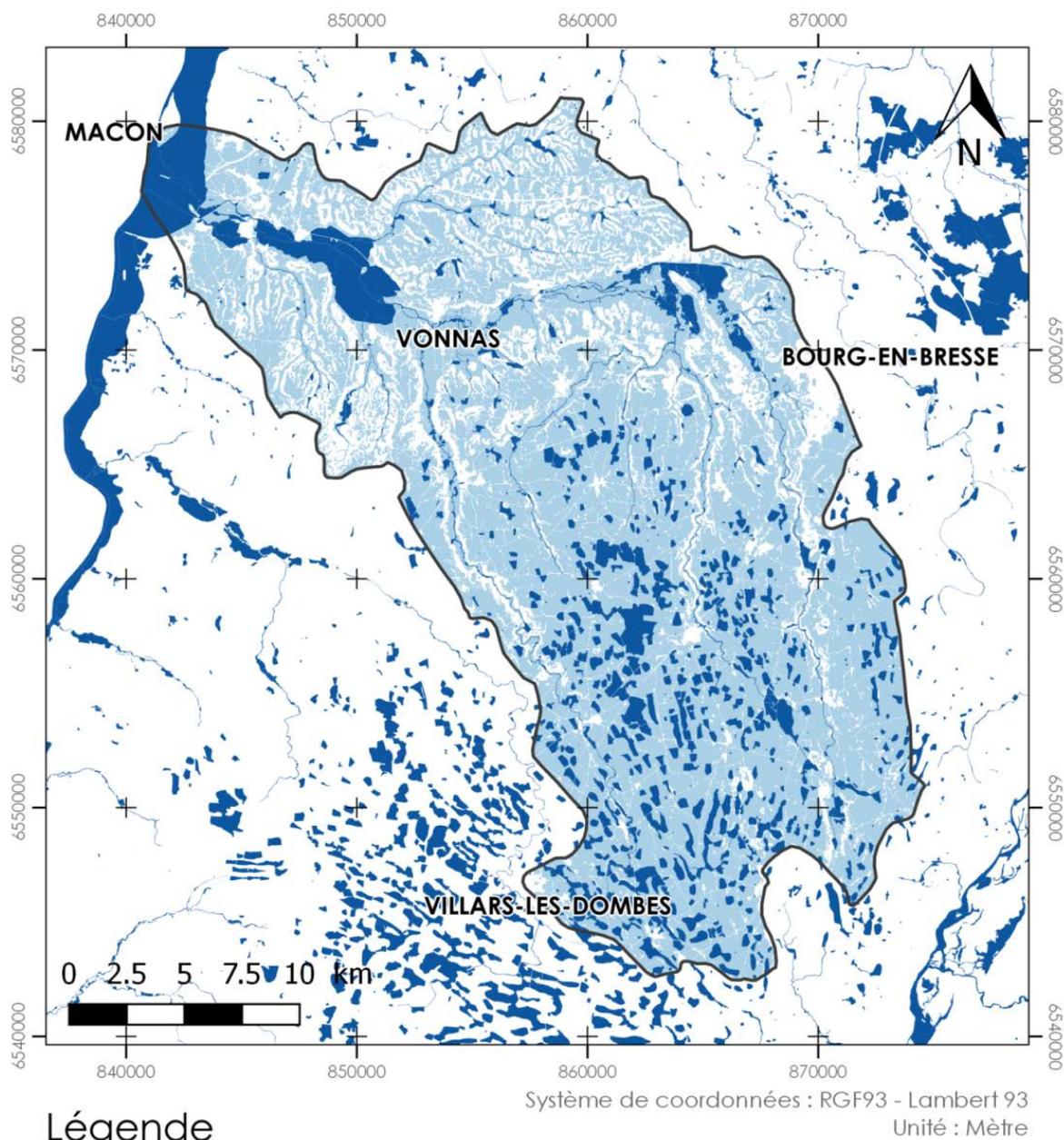


Figure 15 : Localisation des zones humides sur le bassin versant de la Veyle

En outre, les sondages réalisés le long de transects perpendiculaires aux vallées (n = 22) semblent confirmer ces résultats (Fig. 16). Ce bassin est particulièrement favorable à la présence de zones humides en raison de ses caractéristiques structurales. Celles-ci impliquent la proximité de la nappe alluviale dans les fonds de vallée et de l'existence d'une nappe perchée au niveau des plateaux. (Fig. 17).

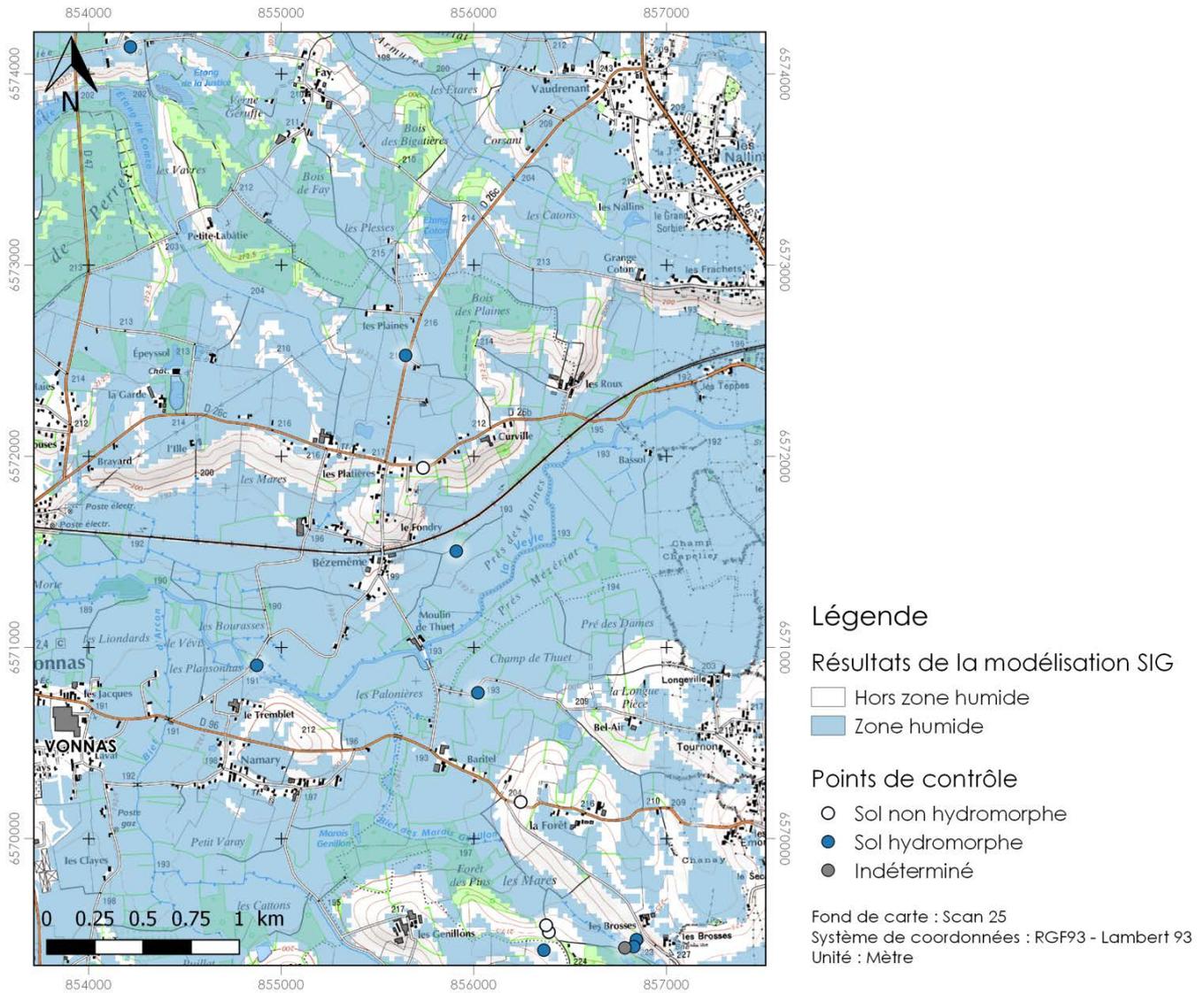


Figure 16 : Validation des résultats par des sondages pédologiques réalisés le long d'un transect perpendiculaire au fond de la vallée de la Veyle à l'est de Vonnas

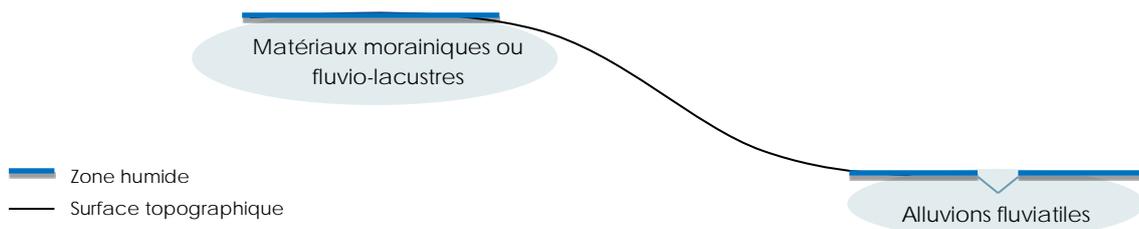


Figure 17 : Schéma simplifié de la localisation des zones humides le long d'un versant du bassin de la Veyle

Les vérifications effectuées sur le terrain révèlent que les pentes supérieures à 2° d'après le MNT, sont majoritairement sèches (6 des 10 sondages réalisés en pente). Les exceptions observées s'expliquent par :

- la situation en limite entre les secteurs en zone humide et hors zone humide,
- une microtopographie locale déterminante pour la présence de zone humide qui ne peut pas être appréhendée avec un MNT au 25 m,
- ou des particularités lithologiques locales.

Les résultats sur le bassin versant de la Tille apparaissent davantage contrastés (Fig. 18). En effet, la partie amont du bassin, dominée par un relief plus marqué et la présence de calcaires filtrants, est plus discriminante. Les secteurs favorables aux zones humides représentent 22,5% du bassin versant.

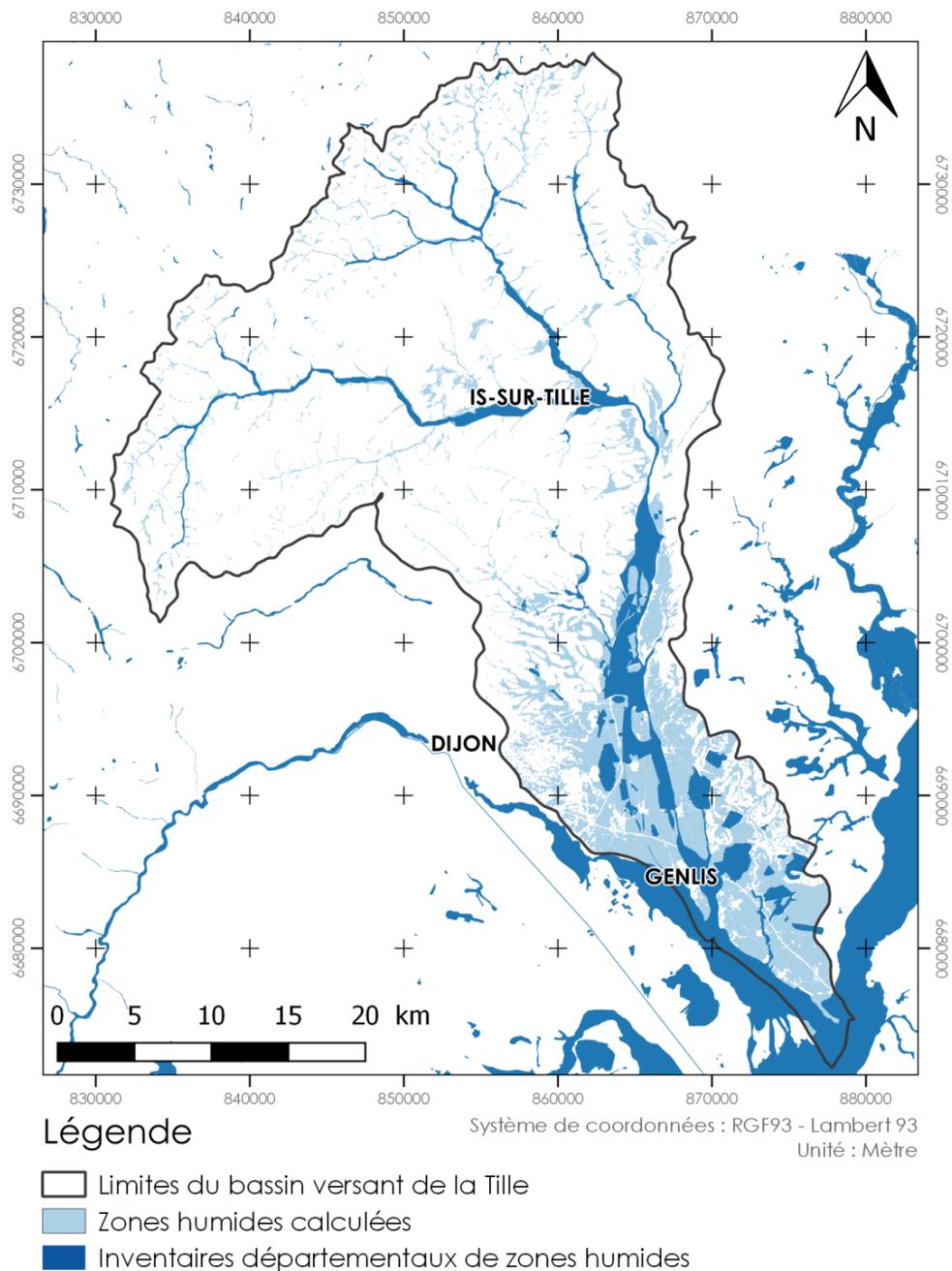


Figure 18 : Localisation des zones humides sur le bassin versant de la Tille

Les vérifications sur le terrain pour le bassin versant de la Tille a eu davantage pour objectif de lever les incertitudes quant au classement des formations géologiques entre favorable et défavorable. Comme pour la Veyle, le seuil de pente semble être occasionnellement remis en question par la microtopographie et les conditions lithologiques locales.

En outre, il a lieu de préciser qu'en amont du bassin versant de la Tille, de petites zones humides, de l'ordre de quelques hectares, se distinguent du fond de vallée. Elles sont associées à des résurgences locales liées à la présence d'une formation géologique imperméable, souvent des marnes, qui recoupe le versant (Fig. 19).

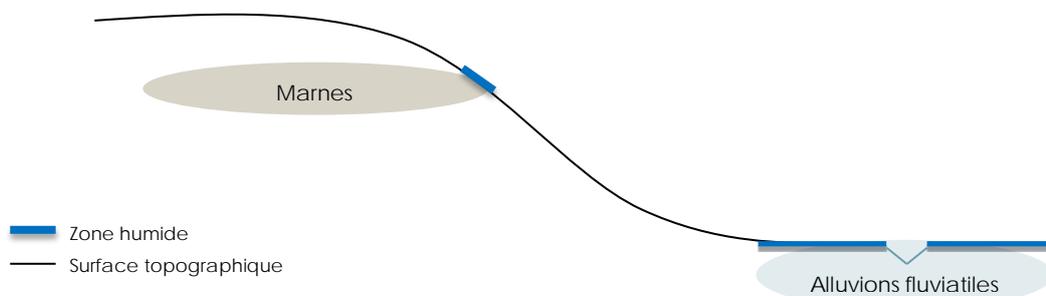


Figure 19 : Schéma simplifié de la localisation des zones humides le long d'un versant de l'écorégion 10 – Côtes calcaires est

Par ailleurs, les résultats peuvent être comparés à d'autres données, comme l'aléa de remontée de nappe du BRGM (Asconit Consultants & Isthme, 2011), les courbes isopièzes (Améten & Géodéfis, 2017). Dans la partie aval du bassin, les résultats obtenus semblent cohérents avec ces données. Il serait également intéressant de mettre en perspective ces résultats avec des cartes pédologiques (MEDDE & GIS Sol, 2014). Toutefois, il apparaît difficile d'accéder à ces données à une résolution fine sur de vastes territoires.

Matrices de confusion

La comparaison à partir des matrices de confusion des résultats obtenus avec les inventaires départementaux de zones humides révèle que pour la Veyle, dont la superficie est de 675 km² comme pour la Tille qui couvre un territoire de 1280 km², l'erreur d'omission est très faible, 0,7 % pour la Veyle et 1,4 % pour la Tille (Tab. 13 et 14). Cela signifie que le modèle identifie les secteurs de référence, c'est-à-dire les inventaires départementaux de zones humides. Cette erreur est souvent observée en périphérie des zones humides et résulte généralement de la définition du seuil de pente ou de caractéristiques locales particulières. *A priori*, cette erreur résulte de configurations très locales qui ne peuvent pas être intégrées à la méthode SIG. L'augmentation du seuil de pente par exemple permettrait certes que les zones humides calculées prennent en compte davantage de zones humides délimitées par les inventaires départementaux mais cela impliquerait également sur d'autres secteurs une surestimation des zones humides calculées pour lesquelles les sondages sur le terrain ne révéleraient pas forcément de traits d'hydromorphie. Cette erreur peut également être liée à la précision des données en entrée : le MNT et la carte géologique.

Le Pourcentage d'Accord Brut (PAB), c'est-à-dire la proportion de surfaces classées de la même manière dans les résultats du modèle et les inventaires de référence, est de 41,7 % pour le bassin versant de la Veyle et de 82,8 % pour celui de la Tille. Cela signifie que les secteurs identifiés par la méthode SIG sont plus proches des inventaires de référence sur le bassin versant de la Tille que sur celui de la Veyle. Autrement dit, les inventaires portés à connaissance, réalisés pour le bassin de la Tille, sont plus proches des réalités de terrain (structure géologique et géomorphologique) du territoire alors que les inventaires actuels de la Veyle les sous-estiment.

En effet, sur le bassin versant de la Veyle, l'erreur de commission est de 57,7 %. Bien que cette surestimation des surfaces favorables aux zones humides par rapport aux inventaires de référence puisse

sembler importante, les 11 contrôles effectués sur le terrain au niveau de ces secteurs surestimés confirment le caractère humide de ces milieux.

Pour le bassin versant de la Tille, l'erreur de commission par rapport aux inventaires départementaux est davantage limitée puisqu'elle s'élève à 15,7 %. Sept sondages ont été réalisés dans les secteurs surestimés par rapport aux inventaires et six d'entre eux présentent effectivement des horizons avec des traces d'hydromorphie.

Tableau 13 : Matrice de confusion entre les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides auxquels ont été déduites les surfaces imperméabilisées par rapport aux inventaires départementaux de référence sur le bassin versant de la Veyle

En %		Inventaires portés à connaissance	
		Secteurs non concernés par les inventaires zones humides	Secteurs inclus dans les inventaires zones humides
Résultat de la modélisation par SIG	Secteurs défavorables aux zones humides	27,7	0,7
	Secteurs favorables aux zones humides	57,7	14

Tableau 14 : Matrice de confusion entre les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides auxquels ont été déduites les surfaces imperméabilisées par rapport aux inventaires départementaux de référence sur le bassin versant de la Tille

En %		Inventaires portés à connaissance	
		Secteurs non concernés par les inventaires zones humides	Secteurs non concernés par les inventaires zones humides
Résultat de la modélisation par SIG	Secteurs défavorables aux zones humides	76	1,4
	Secteurs favorables aux zones humides	15,7	6,8

Il est à noter que les résultats présentés dans les tableaux 12 et 13 correspondent aux secteurs favorables aux zones humides calculées auxquelles ont été déduites les surfaces imperméabilisées. Si ces surfaces ne sont pas prises en compte, l'erreur de commission est exacerbée (Tab. 15 et 16), notamment pour le bassin versant de la Veyle.

Tableau 15 : Matrice de confusion entre les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides sans déduction des surfaces imperméabilisées par rapport aux inventaires départementaux de référence sur le bassin versant de la Veyle

En %		Inventaires portés à connaissance	
		Secteurs non concernés par les inventaires zones humides	Secteurs non concernés par les inventaires zones humides
Résultat de la modélisation par SIG	Secteurs défavorables aux zones humides	13,8	0,1
	Secteurs favorables aux zones humides	71,6	14,4

Tableau 16 : Matrice de confusion entre les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides sans déduction des surfaces imperméabilisées par rapport aux inventaires départementaux de référence sur le bassin versant de la Tille

En %		Inventaires portés à connaissance	
		Secteurs non concernés par les inventaires zones humides	Secteurs non concernés par les inventaires zones humides
Résultat de la modélisation par SIG	Secteurs défavorables aux zones humides	73,7	1,1
	Secteurs favorables aux zones humides	17,7	7,2

3.2 Fonctions et pressions des zones humides

Des cartes peuvent être établies en vue de représenter le nombre de sous-fonctions estimé pour chacune des trois fonctions majeures (Annexes 6 à 11). Des cartes de synthèse qui indiquent le nombre de fonctions majeures remplies par les zones humides sont également produites (Fig. 20 et 21).

De manière générale, les zones humides du bassin versant de la Veyle sont capables de remplir deux à trois fonctions (Fig. 20). Les zones humides qui en remplissent trois se localisent préférentiellement sur le plateau de la Dombes et dans la basse vallée de la Veyle. Peu de zones humides ne remplissent qu'une fonction. Les zones humides qui remplissent moins de deux fonctions sont situées sur les secteurs de pente. Ces zones humides sont particulièrement vulnérables car lorsqu'elles se trouvent occupées par des surfaces agricoles, elles ne peuvent plus remplir leur sous-fonction de ralentissement des flux et de rétention des sédiments. Les secteurs de pente sont situés majoritairement au nord du bassin, c'est pourquoi les zones humides avec peu de fonctions se localisent au niveau de ces secteurs.

La majorité des zones humides en amont du bassin versant de la Tille remplit les trois fonctions majeures. En aval, beaucoup de zones humides n'en remplissent que deux. Cela s'explique par l'occupation des sols, majoritairement dominée par la présence de surfaces agricoles en aval, contrairement à l'amont davantage forestier. Or, en l'absence de zonage de protection en faveur de la biodiversité, les surfaces agricoles sont considérées comme hostiles à la fonction écologique.

Les pressions, liées à l'agriculture et à l'urbanisation, peuvent être superposées aux cartes des fonctions. Dans un souci de lisibilité, les cartes ne sont visualisables qu'au 1/25 000, échelle de restitution (Fig. 22 et 23). Le croisement des données relatives aux fonctions remplies et aux pressions subies permet de prioriser les actions menées en faveur des zones humides. Selon les enjeux du territoire et les ambitions politiques, il peut être proposé par exemple de réduire les pressions sur les zones humides qui remplissent plus de fonctions ou de concentrer les moyens pour restaurer les zones humides qui remplissent peu ou pas de fonctions.

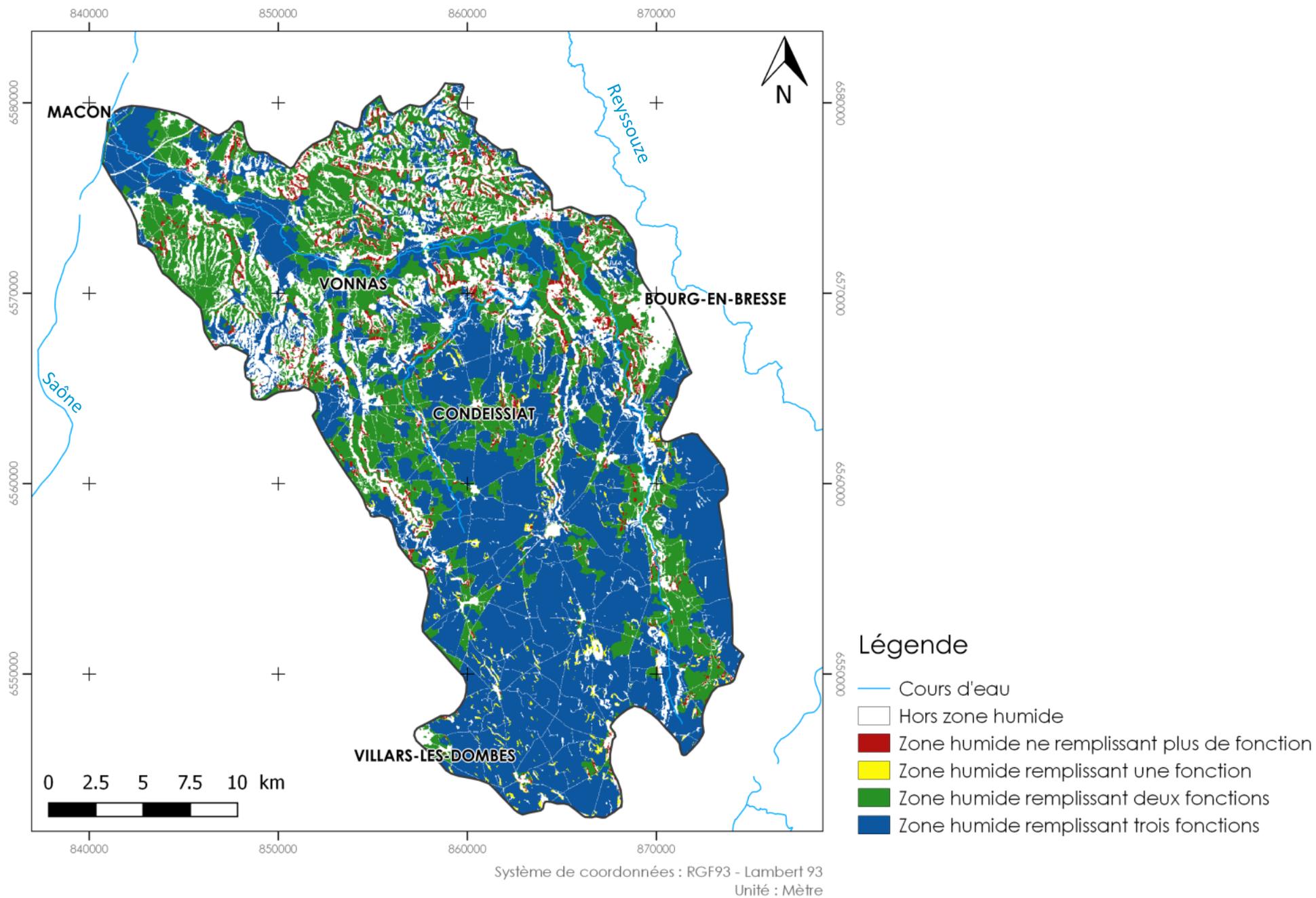
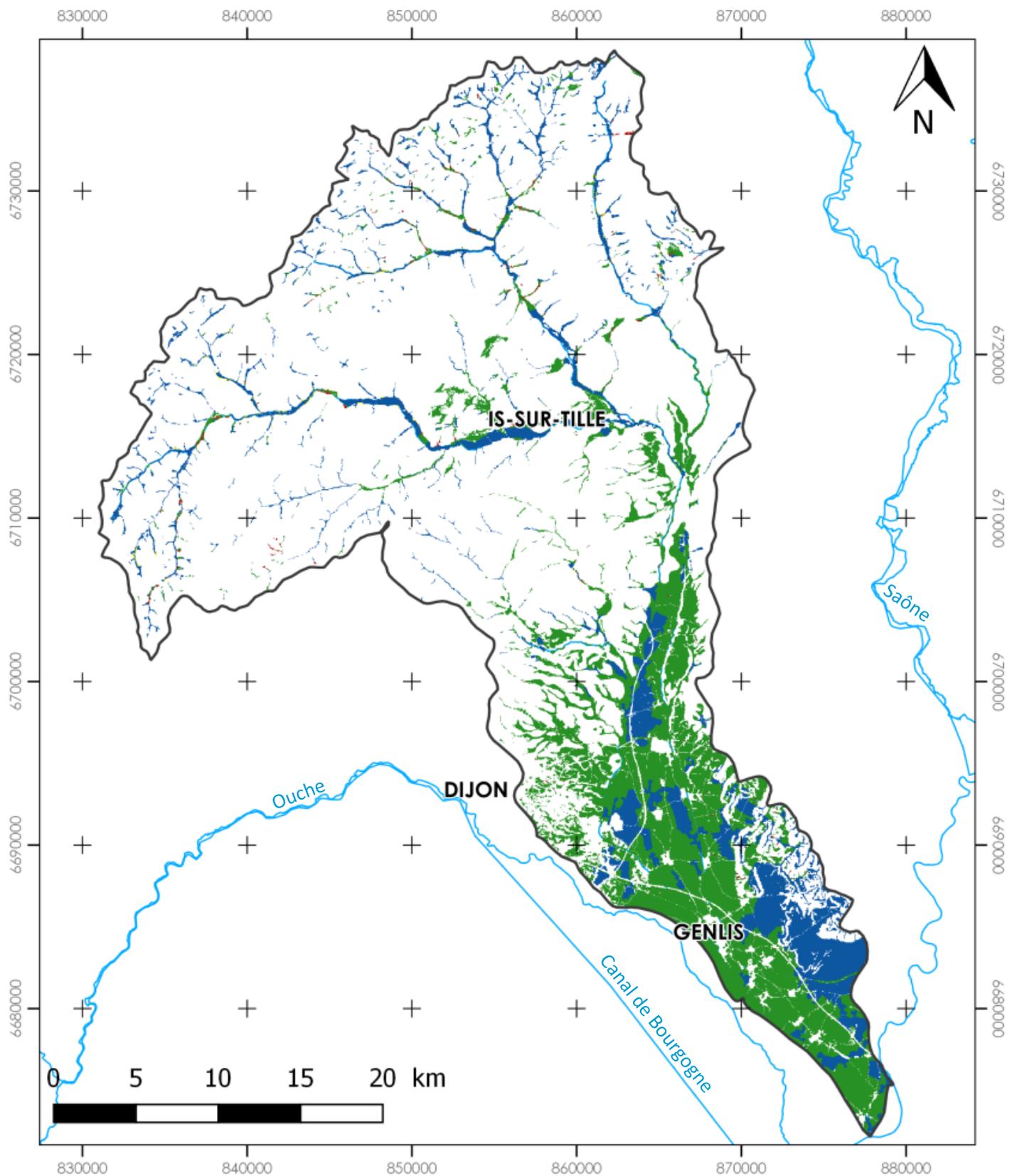


Figure 20 : Nombre de fonctions remplies par les zones humides du bassin versant de la Veyle



Système de coordonnées : RGF93 - Lambert 93
Unité : Mètre

Légende

- Cours d'eau
- Hors zone humide
- Zone humide ne remplissant plus de fonction
- Zone humide remplissant une fonction
- Zone humide remplissant deux fonctions
- Zone humide remplissant trois fonctions

Figure 21 : Nombre de fonctions remplies par les zones humides du bassin versant de la Tille

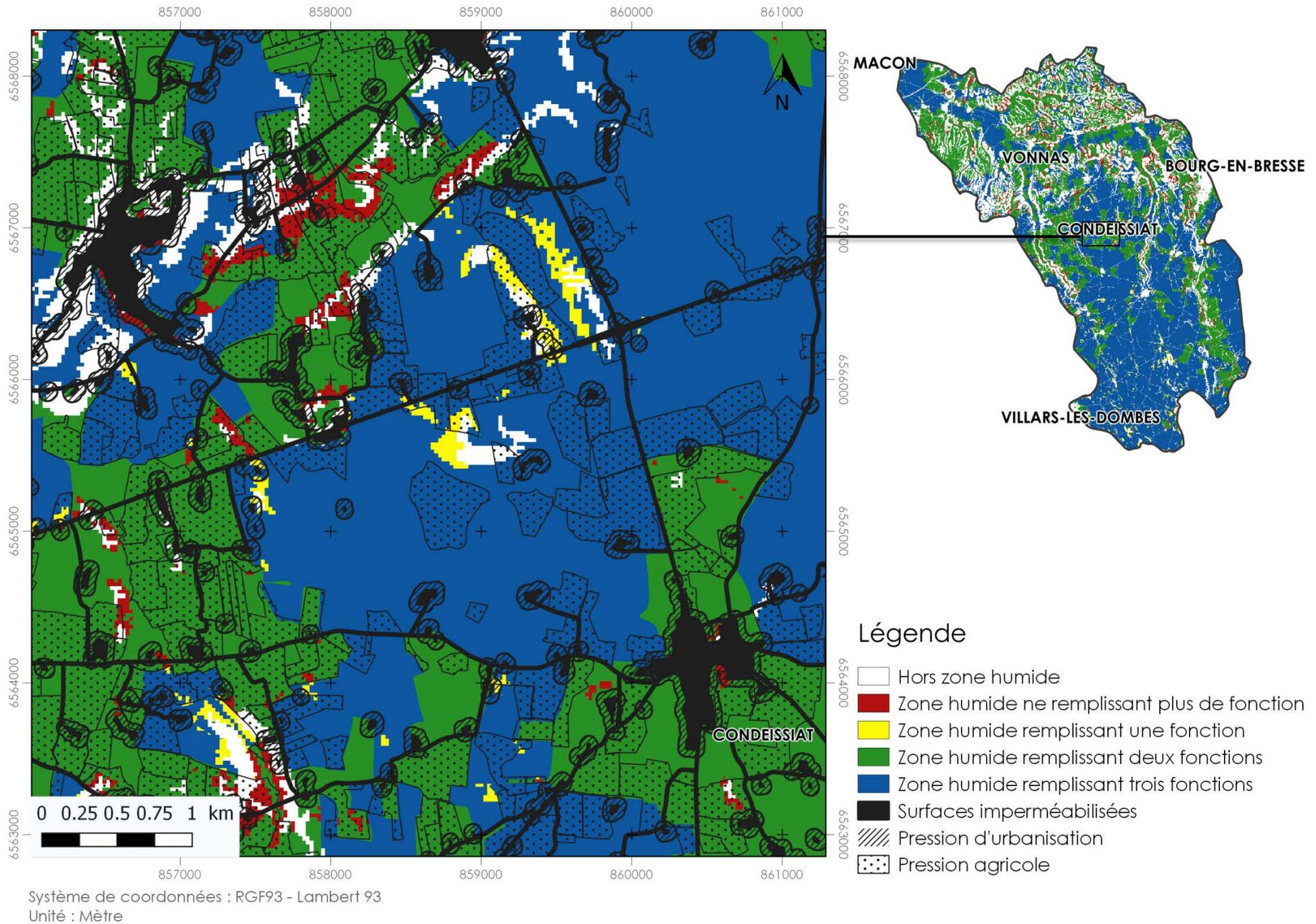
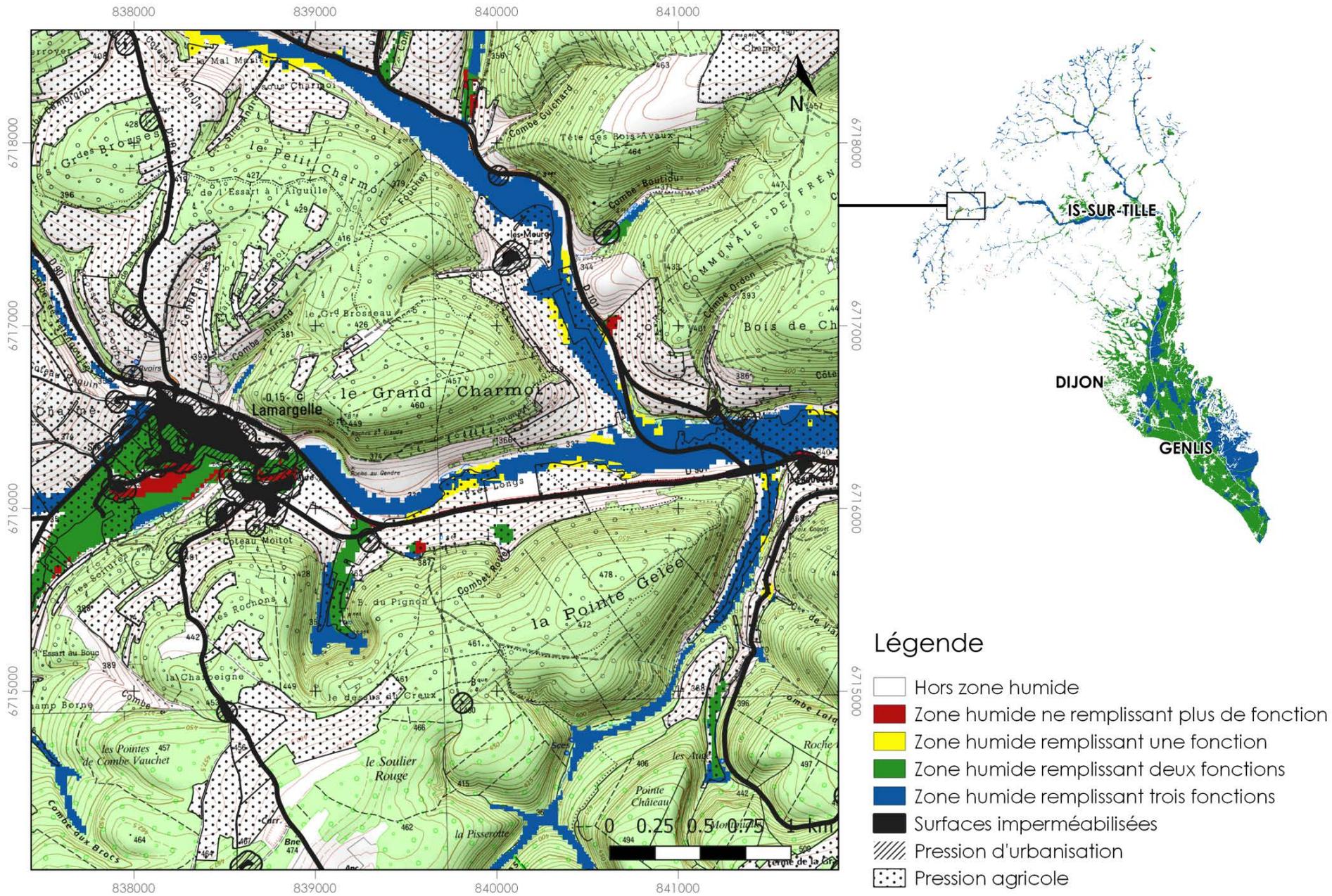


Figure 22 : Fonctions remplies et pressions subies par les zones humides au niveau de la commune de Condeissiat



Système de coordonnées : RGF93 - Lambert 93
 Unité : Mètre

Figure 23 : Fonctions remplies et pressions subies par les zones humides au niveau de la commune de Lamargelle

4. Discussions et perspectives

Les résultats obtenus s'avèrent particulièrement encourageants. L'une des difficultés majeures pour la localisation des zones humides réside dans la détermination des seuils qui permettent de définir les zones humides de pente. D'autres études ayant les mêmes objectifs s'interrogent également sur les seuils à adopter (Asconit Consultants & Isthme, 2011 ; Mazagol et al., 2008). Les méthodes qui s'attachent à accorder à chaque maille du territoire une probabilité de présence de zone humide peuvent s'affranchir de cette question. En effet, il est possible de ne pas fixer un seuil mais d'établir un gradient entre pente favorable et défavorable (TTI Production & Acer Campestre, 2012). L'une des perspectives envisageables pour cette étude est d'adapter les seuils en fonction de l'écorégion ou de la géologie.

Par ailleurs, Mazagol et al. (2008) rappellent que ce type d'approche est contraint par la disponibilité de données homogènes sur l'ensemble du territoire, d'autant plus lorsque celui-ci est vaste. Les résultats de la méthode développée reposent essentiellement sur deux bases de données, le MNT et la carte géologique. C'est pourquoi la qualité des résultats obtenus pour la localisation des zones humides dépend fortement de la qualité de ces données. En effet, les résultats de l'analyse du relief étant tous dérivés du MNT, sa précision altimétrique et planimétrique est déterminante. Z. Niu et al. (2009) indiquent notamment que certaines zones humides semblent, à tort, se localiser sur de très fortes pentes en raison de la précision du MNT.

Par ailleurs, l'étude de la géologie au 1/50 000 permet d'affiner la précision du résultat et l'échelle de restitution par rapport à d'autres méthodes (Asconit Consultants & Isthme, 2011 ; MEDDE & GIS Sol, 2014). Néanmoins, l'harmonisation des cartes géologiques peut être source d'erreurs ou d'imprécisions. Certaines formations sont mal définies et il est difficile de déterminer si elles sont favorables à la formation de zones humides. Pour compléter les données géologiques disponibles à petite échelle, il est possible d'intégrer d'autres paramètres alternatifs pour connaître la perméabilité du substrat, notamment à travers le calcul de l'IDPR, la densité du réseau hydrographique (Mazagol et al., 2008) ou les secteurs de source par exemple (Améten & Géodéfis, 2017). Toutefois, la carte géologique au 1/50 000 apporte davantage de précision.

L'intégration du facteur anthropique, par la déduction des surfaces imperméabilisées des secteurs favorables aux zones humides, n'est généralement pas réalisée (Asconit Consultants & Isthme, 2011 ; Mazagol et al., 2008 ; MEDDE & GIS Sol, 2014) bien qu'il soit admis que cela permette d'obtenir des résultats plus justes (Mazagol et al., 2008).

Concernant la comparaison entre zones humides calculées et inventoriées, les pourcentages d'accord brut sont de 41,7 % pour la Veyle et de 82,8 % pour la Tille. L'étude menée pour la France métropolitaine estime cet indicateur à 67,9 % (MEDDE & GIS Sol, 2014). De plus, il convient de préciser que les erreurs d'omission sont faibles pour les deux sous-bassins versants : 0,7 % pour la Veyle et 1,4 % pour la Tille. Toutefois, l'erreur de commission est plus élevée pour la Veyle (57,7 %) que pour la Tille de 15,7 %. Il est à noter que ces valeurs sont dépendantes des inventaires de référence. Or, la réalisation de ces inventaires fait l'objet d'une prélocalisation basée le plus souvent sur une photo-interprétation qui oriente les prospections de terrain. Ainsi, certains secteurs peuvent ne pas avoir été échantillonnés donc inventoriés, d'où une erreur de commission importante.

Par la suite, lorsque la structuration des données des inventaires départementaux le permet, il sera possible de comparer les secteurs identifiés comme favorables aux zones humides à partir de l'approche par SIG avec d'une part, les zones humides inventoriées à partir du critère de végétation, et d'autre part, celles inventoriées à partir des caractéristiques pédologiques. Il serait en effet intéressant de comparer les erreurs d'omission pour éventuellement mettre en évidence la différence des résultats entre ces deux méthodes. Les données concernant le bassin versant de la Têt devraient permettre une telle comparaison.

Par ailleurs, davantage de vérifications sur le terrain doivent être envisagées pour confirmer les résultats, et notamment les surfaces surestimées par le modèle. L'étude menée pour la délimitation des

enveloppes potentiellement humides à l'échelle de la France métropolitaine s'appuie sur près de 130 000 points de contrôle (MEDDE & GIS Sol, 2014). L'accès éventuel à ces données permettrait de disposer d'une autre base de référence.

En ce qui concerne l'estimation des fonctions, la difficulté est de mettre en évidence des phénomènes complexes par le biais de méthodes simples à mettre en œuvre. Certains descripteurs pourraient être améliorés, notamment la méthode d'évaluation de la fonction écologique. En effet, cette fonction est évaluée principalement à partir de zonages pour la protection d'habitats. Il s'agit d'une méthode fréquemment utilisée dans la littérature en raison de sa facilité de mise en œuvre (Asconit Consultants et al., 2016 ; Rapinel, 2012). Néanmoins, cela peut induire des résultats difficiles à interpréter : certaines zones humides par exemple ne remplissent pas de fonction hydrologique ou biogéochimique mais remplissent une fonction écologique car elles font partie d'un zonage visant à protéger la biodiversité (Natura 2000, Réserves Naturelles, Arrêté de Protection Biotope, ZNIEFF). Or, il a lieu de s'interroger sur ce qu'est une zone humide qui remplit une fonction écologique sans remplir de fonctions hydrologiques ou biogéochimiques. L'idéal serait de compléter cette information avec des données existantes relatives à la connectivité des habitats pour éviter l'utilisation de données liées aux zonages de protection. Or, ces dernières, établies à l'échelle départementale ou régionale, ne sont pas disponibles de manière homogène sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée.

Cependant, les fonctions sont dépendantes de composantes structurales (Bouzillé, 2014). C'est pourquoi les techniques d'écologie du paysage devraient être approfondies car elles pourraient apporter davantage de renseignements quant à l'évolution de la structure paysagère (Burel & Baudry, 1999) à l'échelle de sous-bassin versant du SDAGE ou par écorégion. Ce type d'indicateur peut être intéressant pour un suivi de l'évolution des pressions dans le temps.

Par ailleurs, la réalisation de certains processus, tels que la dénitrification, peut être limitée en raison de températures basses, en montagne par exemple (Barnaud & Fustec, 2007). De même, le processus de dénitrification qui a lieu au sein de systèmes côtiers, est favorisé au niveau de la slikke (Barnaud & Fustec, 2007). Il convient donc d'adapter les descripteurs en fonction des particularités locales, à l'échelle des écorégions par exemple.

Les fonctions ont ici été évaluées en termes de présence/absence mais il serait également possible de les considérer selon leur intensité (Gaillard et al., 2001). Ainsi, une autre piste envisageable est de mettre en place un système de scores. Burkhard et al. (2012) par exemple proposent d'évaluer les services rendus à partir d'un score basé sur la nomenclature du Corine Land Cover. L'analyse d'images satellites peut également permettre d'étudier d'autres descripteurs, tels que la rugosité de la végétation sur la zone humide par exemple (Rapinel, 2012).

Enfin, le calcul des surfaces imperméabilisées et de la pression d'urbanisation selon la méthode RhoMÉO (2014) interroge quant à la prise en compte des entités de très petites tailles. En effet, certaines cabanes de chasse ou de jardin par exemple sont présentes dans la BDTPOPO® et sont prises en compte dans les surfaces imperméabilisées. Toutefois, la pression émise sur la zone humide à proximité de ces entités n'est pas identique à celle existante en périphérie des villes. C'est pourquoi il serait intéressant de qualifier la pression d'urbanisation selon la densité d'habitation par tache urbaine, soit en suivant la méthode proposée par le collectif RhoMÉO (2014) soit en affectant au secteur soumis à pression une pondération différente selon la catégorie du CLC (tissu urbain continu ou tissu urbain discontinu). De même, il serait possible d'affecter aux polygones qui représentent les taches d'urbanisation un indice plus ou moins élevé en périphérie des villes selon la population et la dynamique démographique de la zone urbaine concernée.

Conclusion

Malgré la volonté des agences de l'eau de préserver et restaurer les zones humides, ces milieux polymorphes se révèlent difficiles à appréhender à une échelle fine sur l'ensemble du bassin Rhône-Méditerranée. C'est pourquoi il apparaît nécessaire de développer des outils cartographiques adaptés pour localiser ces écosystèmes et évaluer les fonctions et pressions associées.

Cette étude a permis d'explorer les possibilités qu'offrent les Systèmes d'Information Géographique pour distinguer les conditions géologiques et les configurations spatiales favorables à la présence de zones humides. La méthode développée a la particularité de bénéficier d'une caractérisation des conditions nécessaires à la présence de zones humides par écorégions, délimitées à partir des micro-modèles validés sur le terrain.

Les résultats issus de la modélisation par SIG pour la localisation des zones humides s'avèrent cohérents avec les inventaires de référence pour les deux bassins sur lesquels ont été conduits les tests méthodologiques. Les résultats obtenus sur le bassin versant de la Veyle permettent de localiser des surfaces de zones humides largement plus importantes que celles connues issues des inventaires existants. Cependant cela est cohérent avec les caractéristiques structurales du bassin versant (propriétés lithologiques, relief). Concernant le bassin versant de la Tille, la géologie s'avère plus complexe et discriminante pour la présence de zones humides. Les surfaces surestimées par rapport aux inventaires réglementaires sont plus faibles que pour la Veyle. La transposition de cette méthode à d'autres sous-bassins du territoire Rhône-Méditerranée qui présentent des caractéristiques différentes d'un point de vue géologique, géomorphologique et climatique devrait conforter la méthode et sa robustesse.

En outre, les fonctions ont pu être appréhendées selon la présence de descripteurs liés à la position des zones humides au sein du bassin versant, au mode d'occupation des sols et aux secteurs délimités pour des enjeux spécifiques, notamment liés à la ressource en eau et à la biodiversité. Cette méthode apporte un éclairage quant aux secteurs dont les fonctions sont particulièrement fragiles ou dégradées. Néanmoins, il est à noter que des améliorations pourraient être apportées pour accroître la pertinence des descripteurs, notamment ceux liés à la fonction écologique. De plus, les descripteurs peuvent varier selon les conditions climatiques et doivent donc être adaptés selon les localités. D'où l'importance d'étudier des bassins versants situés dans des contextes différents, en zone littoral ou de haute montagne par exemple. Parallèlement, les pressions liées à l'agriculture et à l'urbanisation ont fait l'objet d'une délimitation spatiale. Ainsi, elles peuvent être croisées avec les cartes des fonctions pour prioriser les actions à mener sur les zones humides selon les enjeux du territoire et les ambitions politiques.

Ces résultats sont encourageants et soulignent la pertinence de cette méthode SIG pour localiser les secteurs favorables aux zones humides dans le bassin Rhône-Méditerranée selon les caractéristiques des écorégions. Cette étude met en évidence la possibilité d'appréhender les fonctions des zones humides à partir de descripteurs qui précisent les pressions générées par l'urbanisation et l'agriculture. Il semble cependant nécessaire d'accroître les vérifications sur le terrain afin de confirmer la validité des modèles. Enfin, des études complémentaires dans d'autres sous-bassins versants, au relief et à la géologie différents de ceux déjà étudiés, doivent être menées en vue de confirmer l'adaptabilité de la méthode à d'autres contextes locaux.

Bilan personnel du stage

Ce stage à l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse a été une expérience très enrichissante. J'ai apprécié le fait de travailler sur une thématique transversale qui fait appel à diverses notions abordées dans le cadre de mon cursus universitaire. De plus, les activités étaient très diversifiées (recherches bibliographiques, tests sous SIG, vérifications sur le terrain).

L'une des difficultés rencontrées lors de ce stage a été d'estimer le temps nécessaire pour élaborer la méthode. En effet, les essais qui requièrent de nouveaux outils ou la transposition du modèle sur d'autres secteurs engendrent des problèmes inattendus qui peuvent se révéler chronophages.

J'ai apprécié la disponibilité de mon maître de stage avec lequel j'ai eu des échanges réguliers pour discuter des problèmes rencontrés et des solutions envisageables ainsi que la confiance qui m'a été accordée tout au long de ce stage.

Cette expérience m'a permis notamment d'acquérir de nouvelles connaissances sur les zones humides, une rigueur concernant le vocabulaire à employer et m'a offert l'opportunité de me familiariser avec les méthodes d'inventaires de zones humides sur le terrain. En outre, l'avantage de cet établissement public est qu'il regroupe des spécialistes dans des domaines variés auxquels il est possible de se référer selon les problèmes rencontrés. Ainsi, j'ai pu bénéficier de conseils techniques précis en SIG notamment.

Références

ADAMUS P. R., STOCKWELL L. T., CLAIRAIN E. J., MORROW M. E., ROZAS L. P., SMITH R. S. 1991. Wetland Evaluation Technique (WET). Vol 1 : Literature Review and Evaluation Rationale. Wetlands Research Program Technical Report, WRP-DE-2, 297p.

AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE. s.d. L'eau dans le bassin Artois-Picardie. Cartographie des zones à dominante humide [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.artois-picardie.eaufrance.fr/eau-et-biodiversite/zones-humides/article/cartographie-des-zones-a-dominante>> (Consulté le 30/08/2017).

AGENCE DE L'EAU RHIN MEUSE, 2014. Guide méthodologique d'inventaire et de hiérarchisation des zones humides pour le bassin Rhin Meuse, Agence de l'Eau Rhin Meuse, 93 p.

AGENCE DE L'EAU RHONE-MEDITERRANEE CORSE. 2015. Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Rhône-Méditerranée. Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée Corse, Lyon, 512p.

AGENCE DE L'EAU RHONE MEDITERRANEE CORSE. 2013. Programme d'action 2013-2018. Sauvons l'eau ! Lyon, AERMC, 43p.

AGENCE DE L'EAU RHONE-MEDITERRANEE CORSE. s.d. Le programme d'action 2013-2018 [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.eaurmc.fr/aides-et-redevances/le-programme-daction-2013-2018.html>>. (Consulté le 5/08/2017).

AIDOU A., CLEMENT B. 2014. « Chapitre 5 : Evaluation fonctionnelle des zones humides ». In Ecologie des zones humides. Concepts, méthodes et démarches. BOUZILLE J.-B (Eds.). Lavoisier, Paris, pp. 183-215.

ALBER A., PARMENTIER H., PIEGAY H. 2007. Extraction des plaines alluviales à l'échelle du réseau hydrographique : une première étape pour la caractérisation physique des cours d'eau. Poster ESRI.

AMETEN, GEODEFIS. 2017. Hiérarchisation des priorités d'actions sur les zones humides du bassin versant Bièvre Liers Valloire. Note méthodologique pré-identification cartographique des zones humides potentielles. Syndicat Intercommunal d'aménagement hydraulique du bassin Bièvre Liers Valloire, 57p.

ASCONIT CONSULTANTS, ISTHME. 2011. Cartographie des zones à dominante humide et enjeux des politiques publiques associées. Rapport méthodologique. Agence de l'eau Adour-Garonne, 41p.

ASCONIT CONSULTANTS, KAIROS, VISU. 2016. Elaboration d'un plan de gestion stratégique des zones humides sur le territoire du SAGE « Gravona, Prunelli, golfes d'Ajaccio et de Lava ». Phase 1 : Détermination des zones humides : prélocalisation et caractérisation. Phase 2 : Analyse des enjeux et hiérarchisation. Version provisoire, Communauté d'Agglomération du Pays Ajaccien, 46p.

BARNAUD G. 2000. Du sauvetage d'espèces et de milieux prestigieux à la restauration de fonctions et de valeurs In Fonctions et valeurs des zones humides, Fustec E., Lefeuvre J.-C (Eds.) Dunod, Paris, Technique et ingénierie. Série environnement, pp 329-349.

BARNAUD G., FUSTEC E. 2007. Conserver les zones humides : pourquoi ? comment ? Educagri éditions, Dijon, Coll. Sciences en partage, 295p.

BEAUPIED D. 2006. Quelles méthodes et quelles données pour la reconnaissance de milieux ? Une approche innovante sur le site Natura 2000 Val de Loire. Mémoire de master 2 Recherche, Géographie, Développement, Territoires, Cultures, sous la direction de Couderchet L., Université Michel de Montaigne, Bordeaux 3, 94p.

- BENDJOUDI H., DE MARSILY G. 2000. « Le fonctionnement hydrologique des zones humides ». In Fonctions et valeurs des zones humides, FUSTEC E., LEFEUVRE J.-C (Eds.) Dunod, Paris, Technique et ingenierie. Série environnement, pp 61-81.
- BEVEN. K. J., KIRKBY. M. J. 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Journal Hydrological Sciences Bulletin, Vol. 24, pp. 42-69.
- BOUZILLE J.-B. 2014. Ecologie des zones humides. Concepts, méthodes et démarches. Lavoisier, Paris, 238p.
- BRINSON M. M. 1993. A Hydrogeomorphic Classification for Wetlands. U.S Army Corps of Engineers, Washington, 79p.
- BUREL F., BAUDRY J. 1999. Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. Technique & Documentation, Paris, 359p.
- BURKHARD B., KROLL F., NEDKOV S., MÜLLER F. 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets. Ecological Indicators, 21, pp. 17-29.
- Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA). 2015. Thématiques des bases de données logement. La mesure de l'étalement urbain. 11p.
- CENTRE DE RECHERCHE SUR LES ECOSYSTEMES D'ALTITUDE. s.d. Etude de l'impact du changement climatique sur les fonctionnalités écologiques des zones humides du massif du Mont-Blanc. Mémoire technique. 21p.
- CHAMBAUD F., LUCAS J., OBERTI D. 2012a. Guide pour la reconnaissance des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée. Volume 1 : méthode et clés d'identification. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse, 138p.
- CHAMBAUD F., LUCAS J., OBERTI D. 2012b. Guide pour la reconnaissance des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée. Volume 2 : fiches écorégions et clés d'identification. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée & Corse, 264p.
- CIZEL O. 2010. Protection et gestion des espaces humides et aquatiques – Guide juridique d'accompagnement des bassins de Rhône-Méditerranée et de Corse. Pôle Relais Lagunes Méditerranéennes – Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, Lyon, 599p.
- CLERICI N., WEISSTEINER C. J., PARACCHINI M. L., STROBL P. 2011. Riparian zones : where green and blue networks meet. Pan-European zonation modelling based on remote sensing and GIS. JRC Scientific and Technical Reports. Scientific and Technical Research Series. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 60p.
- Collectif RhoMÉO. 2014. La boîte à outils de suivi des zones humides. Version 1. Conservatoire d'espaces naturels de Savoie, 147p.
- CONRAD, O., BECHTEL, B., BOCK, M., DIETRICH, H., FISCHER, E., GERLITZ, L., WEHBERG, J., WICHMANN, V., AND BÖHNER, J. 2015. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) V. 2.1.2, Geosci. Model Dev., 8, 1991-2007.
- Convention relative aux zones humides d'importance internationale, particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau. Ramsar (Iran), 2 février 1971. Recueil des traités de l'ONU numéro 14 583. Amendée par le Protocole de Paris, 3 décembre 1982 et par les Amendements de Regina, 28 mai 1987
- CRAFT C. 2016. "Chapter 6: Forested wetlands". In Creating and restoring wetlands: from theory to practice, CRAFT C, Elsevier, Waltham, pp. 129-160.

- DUFFY L., SIMONNOT J.-L., STROFFEK S., CHAMBAUD F. 2013. Note du secrétariat du SDAGE. Eléments de méthode pour la définition d'un plan de gestion stratégique des zones humides. Doctrine « zones humides » du bassin Rhône-Méditerranée, 21p.
- EPTB Saône&Doubs. 2011. Contrat de bassin Tille. Dossier définitif de candidature. Document de synthèse. 39p.
- FLEURY R., KERRIEN Y., MONJUVENT G. s.d. Carte géologique à 1 / 50 000 n°651. BOURG-EN-BRESSE. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 79p.
- FUSTEC E., LEFEUVRE J.-C. 2000. Fonctions et valeurs des zones humides. Dunod, Paris, Technique et ingénierie. Série environnement, 350p.
- GAILLARD S., AMEZAL A., BRAVARD J.-P., FUSTEC E., BENJOUDI H., BRUNSTEIN D., N'GUYEN-THE D. 2001. Inventaire et fonctions des zones humides dans le bassin de la Seine. Actes du colloque Scientifiques et Décideurs : agir ensemble pour une gestion durable des systèmes fluviaux, Lyon, 12p.
- GALLANT J. C., DAWLING T., I. 2003. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. Water resources research, Vol. 39, N° 12, 14p.
- GALLIA SANA, I-MAGE CONSULT, CERE. 2006. Cartographie des zones à dominante humide du bassin Seine-Normandie. Annexes. 10p.
- GASTAL V. 2016. Méthodologie appliquée de cartographie des dynamiques d'inondation des zones humides méditerranéennes. Mémoire de master 2 Geogram ECG, sous la direction de GUELMAMI A., SANDOZ A., SAJALOLI B., BENSÂÏD B., Université d'Orléans, 79p.
- GAYET G., BAPTIST F., BARAILLE L., CAESSTEKER P., CLEMENT J.-C., GAILLARD J., GAUCHERAND S., ISSELIN-NONDEDEU F., POINSOT C., QUETIER F., TOUROULT J., BARNAUD G. 2016. Guide de la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides. Version 1. Onema, Coll. Guides et protocoles, 186p.
- GERMON J.-C., COUTON Y. 1999. La dénitrification dans les sols : régulation de son fonctionnement et applications à la dépollution. Courrier de l'environnement de l'INRA, n°38, pp. 67-74.
- GIRARD M. G., GIRARD V.-M. 2010. Traitement des données de télédétection. Environnement et ressources naturelles. (2^{ème} édition), Dunod, Paris, 576p.
- GRASS Development Team. 2017. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, V. 7.2. Open Source Geospatial Foundation.
- HUBERT-MOY L., CLEMENT B. 2014. « Chapitre 2 : Délimitation et caractérisation des zones humides ». In Ecologie des zones humides. Concepts, méthodes et démarches. BOUZILLE J.-B (Eds.). Lavoisier, Paris, pp. 183-215.
- Institut nationale de l'information géographique et forestière (IGN). 2014. BD TOPO®. Descriptif du contenu. (Version 2.1). 166p.
- IVOL-RIGAUT J.M. 1998. Hydroécotémoins et variabilité des communautés du macrobenthos sur le bassin de la Loire-Essai de la typologie régionale et référentiel faunistique. Thèse de doctorat sous la direction de TACHET H., Université Claude-Bernard Lyon 1, Lyon, 301p.
- JANVIER F., KRASZEWSKI M., LEVI-VALENSIN M., TRAINEL S. 2016. Atlas régional de l'occupation des sols en France. Le Service de l'Observation et des Statistiques (SOEs), 8p.

- JARLETON J. 2009. Identification des Zones Humides d'Intérêt Environnemental Particulier (ZHIEP) et des Zones Stratégiques pour la Gestion de l'Eau (ZSGE) sur le bassin de la Vienne. Rapport de stage de master Sciences de la Terre, de l'Eau et de l'Environnement. Ingénierie des Hydrosystèmes et des Bassins Versants, sous la direction de LORIOT S., Université François-Rabelais, Tours, 60p.
- JASIEWICZ J., STEPINSKI T. F. 2013. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. *Geomorphology*, Vol. 182, pp. 147-156.
- JONES K., LANTHIER Y., VAN DER VOET P., VAN VALKENGOED E., TAYLOR D., FERNANDEZ-PRIETO D. 2009. Monitoring and assessment of wetlands using Earth Observation: The GlobWetland project. *Journal of Environmental Management*, Vol. 90, pp. 2154-2169.
- LEBAUT S., MANCEAU L. 2015. Potentialités des images Landsat pour l'identification et la délimitation de zones humides à l'échelle régionale : l'exemple de l'Est de la France. *Physio-Geo : Géographie physique et Environnement*, Vol. 9, pp. 125-140.
- Les agences de l'eau. s.d. Les agences de l'eau, acteurs de la biodiversité [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.lesagencesdeleau.fr/2016/10/12/les-agences-de-leau-acteurs-de-la-biodiversite/>>. (Consulté le 5/08/2017).
- LORENCHET DE MONTJAMONT M., TEGYEY A. s.d. Carte géologique à 1 / 50 000 n°650. BELLEVILLE. Bureau de recherches géologiques et minières, Orléans, 21p.
- MAZAGOL P.-O., MARTIN R., PORTERET J., THYRIOT C., ETLICHER B. 2008. Pré-détermination de zones humides sur le bassin Loire-Bretagne. SIG 2008 : Conférence franco-phones ESRI, Versailles, 19p.
- MCGARIGAL K., MARKS B. J. 1995. FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 122p.
- MEDDE, GIS Sol. 2014. Enveloppes des milieux potentiellement humides de la France métropolitaine. Notice d'accompagnement. Programme de modélisation des milieux potentiellement humides de France, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, Groupement d'Intérêt Scientifique Sol, 50 p.
- MEROT P., HUBERT-MOY L., GASCUEL-ODOUX C., CLEMENT B., DURAND P., BAUDRY J., THENAIL C. 2006. A Method for Improving the Management of Controversial Wetland. *Environmental Management*. Vol. 37, No. 2, pp. 258–270.
- MITSCHE W.J., GOSELINK J.G. 2000. *Wetlands*. Wiley, New York, 920p.
- MOORE I. D., GRAYSON R. B., LADSON A. R. 1991. Digital terrain modelling : a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, Vol. 5, pp. 3-30.
- NIU Z., GONG P., CHENG X., GUO J., WANG L., HUANG H., SHEN S., WU Y., WANG X., WANG X., YING Q., LIANG L., ZHANG L., WANG L., YAO Q., YANG Z., GUO Z., DAI Y. 2009. Geographical characteristics of China's wetlands derived from remotely sensed data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, Vol. 52, No. 6, pp.723-738.
- OBERTI D., COUDERCHET L., CHAMBAUD F. 2000a. Définition des fonctionnalités écologiques des berges des canaux pour la navigation. Application à leur végétalisation. 63p.
- OBERTI D., MAUPETIT B., CHAMBAUD F., SIMONNOT J.-L. 2000B. Inventaire des zones humides de Bourgogne. Volume 1 : concepts, méthodes et typologies. Cellule d'Application en Ecologie, 397p.
- Observatoire des Zones Humides Méditerranéennes (OZHM). 2000. Occupation du sol - Dynamiques spatiales de 1975 à 2005 dans les zones humides littorales méditerranéennes. Dossier thématique N°2. Tour du Valat, 48p.

- Office International de l'Eau. 2009. Développer les compétences pour mieux gérer l'eau. Organisation de la gestion de l'eau en France. 36p.
- PIERRE D. 2002. Annexe de l'atlas cartographique du SAGE Rance Frémur Baie de Beaussais. Préalocalisation des aires favorables à l'existence de zones humides dans le SAGE. Note méthodologique & premiers résultats. 13p.
- QGIS Development Team. 2017. QGIS Geographic Information System. Software, V. 2.14.3. Open Source Geospatial Foundation Project.
- RAMADE F. 2002. Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement. (2^{ème} édition) Dunod, Paris, 1075p.
- RAPINEL S. 2012. Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humides : de l'observation à la modélisation prospective. Thèse de doctorat en géographie sous la direction de HUBERT-MOY L., Université Rennes 2, Rennes, 333p.
- SANCHEZ A., ABDUL MALAK D., GUELMAMI A., PERENNOU C. 2015. Development of an indicator to Monitor Mediterranean Wetlands. PLoS ONE, Vol. 10, No. 3, 19p.
- SIGES Bretagne. s.d. Vulnérabilité simplifiée (IDPR). Système d'information pour la gestion des eaux souterraines en Bretagne [En ligne]. Disponible sur : <http://sigesbre.brgm.fr/Vulnerabilite-simplifiee-IDPR.html> (Consulté le 31/08/2017).
- Syndicat Mixte Veyle Vivante. 2013. Contrat de rivière Veyle. Dossier sommaire de candidature. 24p.
- TTI PRODUCTION, ACER CAMPESTRE. 2012. Etude de réalocalisation des zones humides sur le territoire du SAGE Nappe de Pays de Beauce et ses milieux aquatiques associés. Phase 2 : hiérarchisation des enveloppes de zones humides. Syndicat du Pays de Beauce Gâtinais en Pithiverais, 142p.
- VILLA J. A., BERNAL B. In press. Carbon sequestration in wetlands, from science to practice: An overview of the biogeochemical process, measurement methods, and policy framework. Ecological engineering, 14p.
- WOOD J. 1996. The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Model. These de doctorat en géographie, Université de Leicester, 165p.
- YOKOYAMA R., SHIRASAWA M., PIKE R.J. 2002. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation model. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 68, pp. 257-265.
- ZRO B. G. F., KOTCHI V., SORO D., NIANGORAN C. K., BAKAYOKO S., KOUAME F. K. 2014. Intégration de données topographiques et hydrographiques en vue de la localisation des zones humides potentielles de fond de vallée : cas du périmètre de la région du Bélier en Côte d'Ivoire. Physio-Géo – Géographie Physique et Environnement, Vol. 8, pp. 231-249.

Annexes

Annexe 1 : Les écorégions du bassin Rhône-Méditerranée (Chambaud et al., 2012a)

Annexe 2 : Extrait de la fiche de l'écorégion 27 – La Narbonnaise (Chambaud et al., 2012b)

Annexe 3 : Essais réalisés pour la détermination du seuil du raster d'accumulation de flux

Annexe 4 : Résolution planimétrique des MNT dans la littérature

Annexe 5 : Analyse de l'impact de la résolution du MNT sur les résultats

Annexe 6 : Carte représentant les sous-fonctions hydrologiques des zones humides du bassin versant de la Veyle

Annexe 7 : Carte représentant les sous-fonctions hydrologiques des zones humides du bassin versant de la Tille

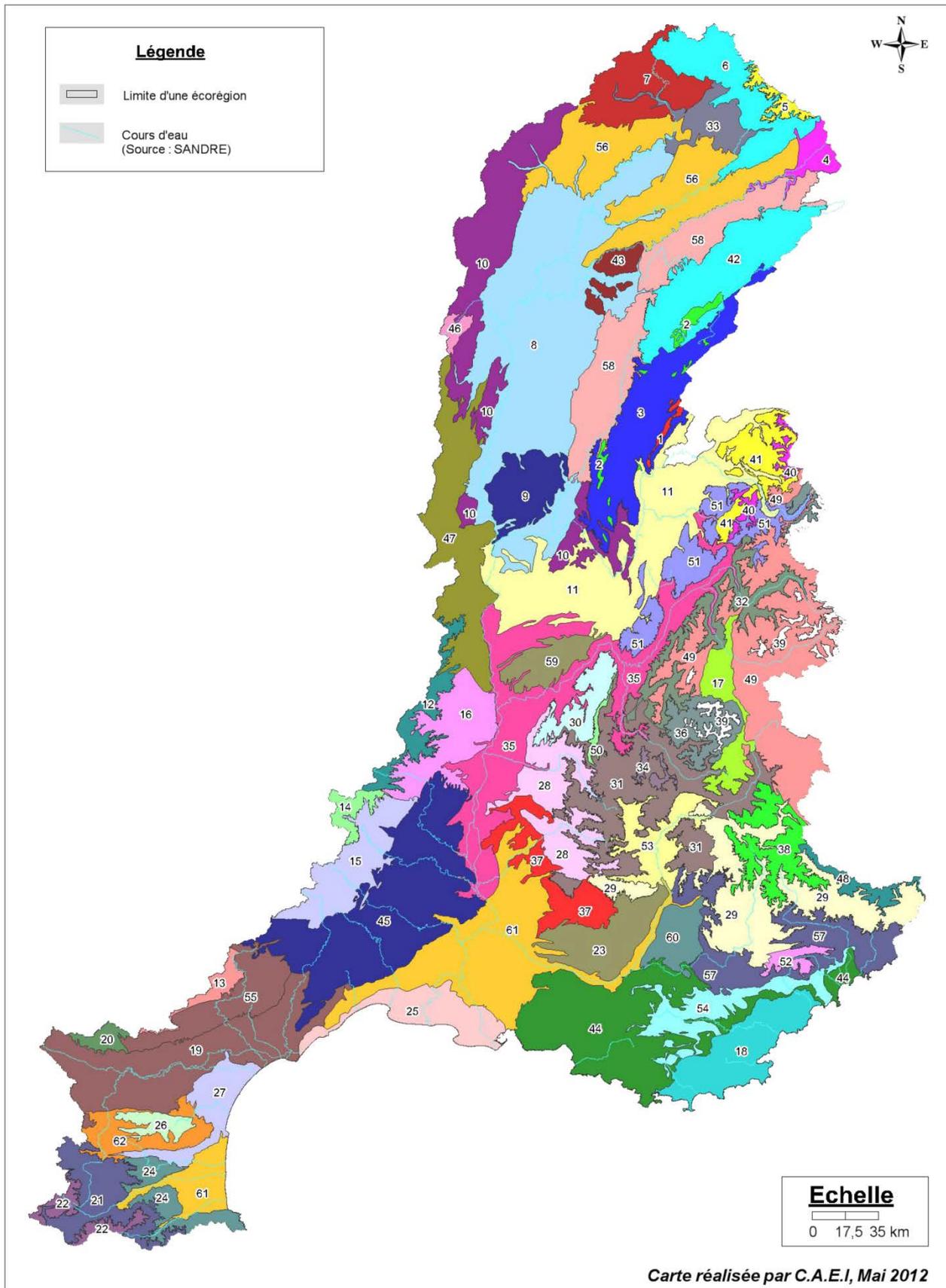
Annexe 8 : Carte représentant les sous-fonctions biogéochimiques des zones humides du bassin versant de la Veyle

Annexe 9 : Carte représentant les sous-fonctions biogéochimiques des zones humides du bassin versant de la Tille

Annexe 10 : Carte représentant la fonction écologique des zones humides du bassin versant de la Veyle

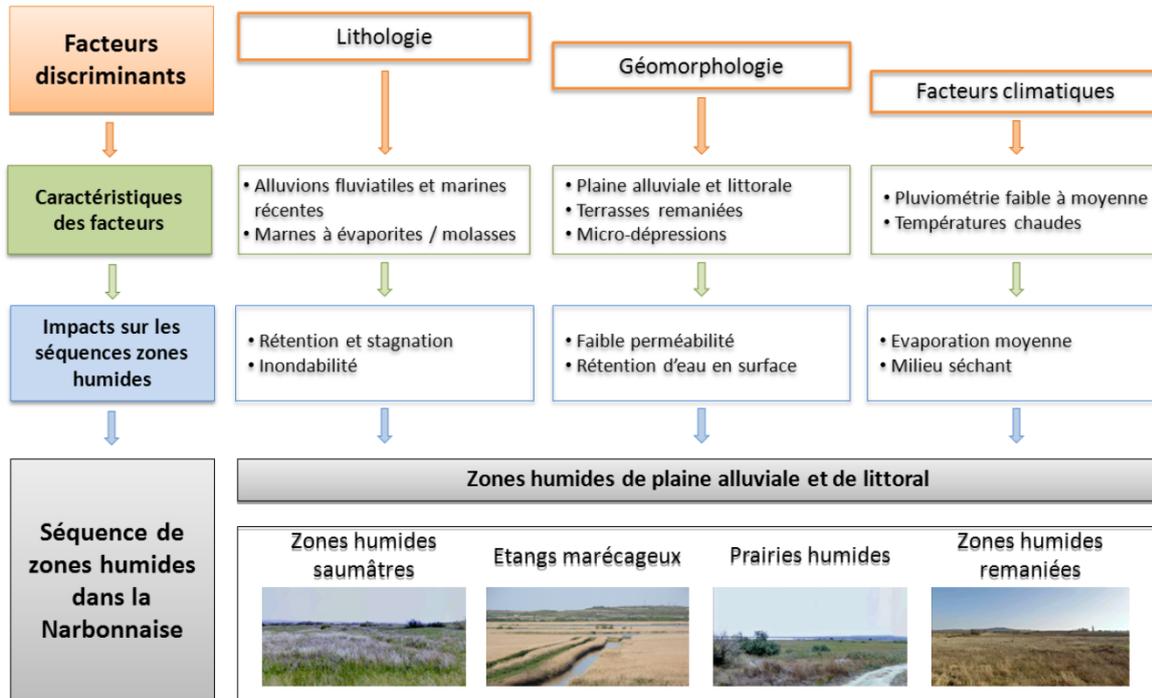
Annexe 11 : Carte représentant la fonction écologique des zones humides du bassin versant de la Tille

Annexe 1 : Les écorégions du bassin Rhône-Méditerranée (Chambaud et al., 2012a)



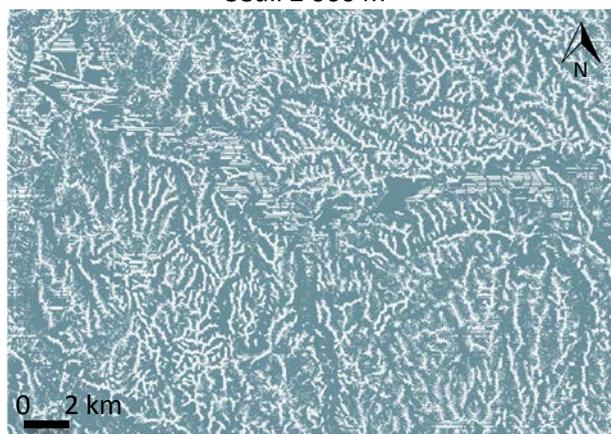
Identification et caractérisation des zones humides dans la Narbonnaise

Démarche de détermination des zones humides

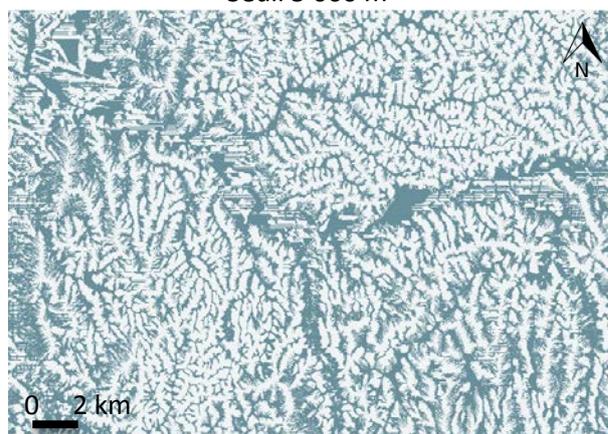


Annexe 3 : Essais réalisés pour la détermination du seuil du raster d'accumulation de flux

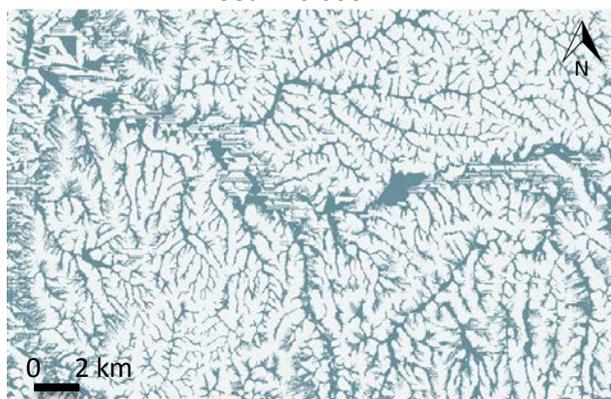
Seuil 2 000 m²



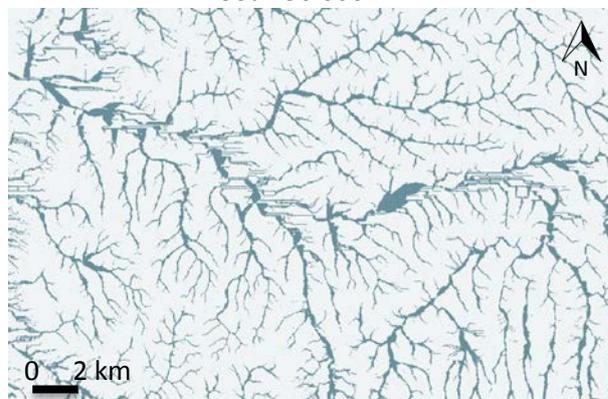
Seuil 5 000 m²



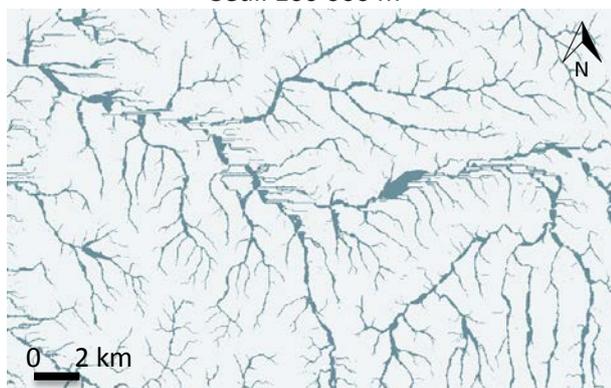
Seuil 10 000 m²



Seuil 50 000 m²



Seuil 100 000 m²



Annexe 4 : Résolution planimétrique des MNT dans la littérature

	Résolution des données d'entrée	Echelle de restitution
Asconit Consultants & Isthme, 2011	100 m	1/250 000
Mazagol et al., 2008	50 m	-
MEDDE & GIS Sol, 2014	25 m dégradé à 50 m	1/100 000
Améten & Géodéfis, 2017	5 m dégradé à 25 m	-

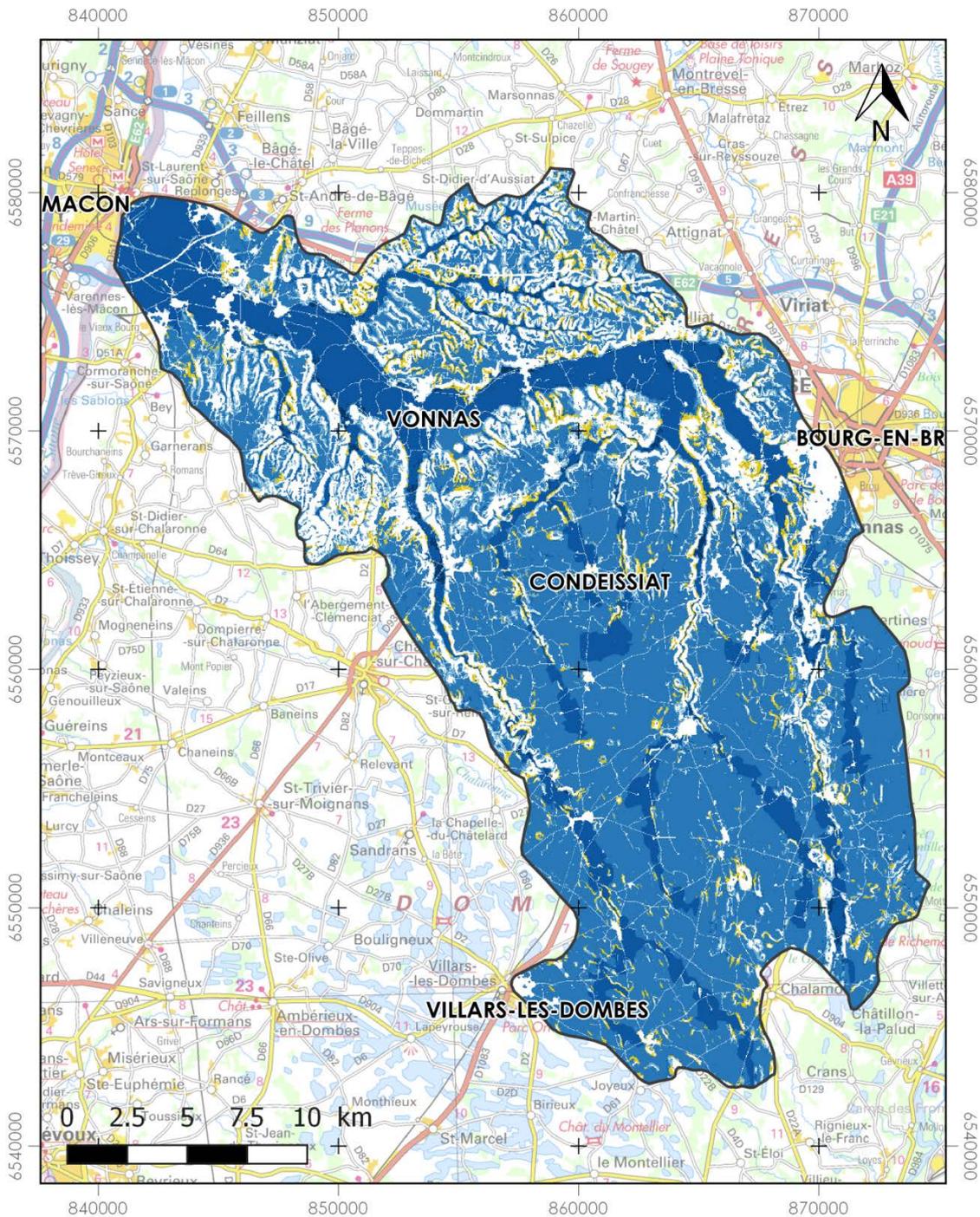
Annexe 5 : Analyse de l'impact de la résolution du MNT sur les résultats

Secteur : Veyle

Surface du masque de calcul : 846,6 km²

Résolution	5m	5m ré-échantillonné à 15 m	25m
Etendue	Ne couvre pas le secteur aval (~13km ²)	Ne couvre pas le secteur aval (~13km ²)	Couvre l'ensemble du bassin versant
Nombre de cellules	57 254 760	6 360 855	2 290 473
Temps de calcul pour les formes du relief (r.geomorphon)	89min52sec	3min35sec	1min
Résultat	<ul style="list-style-type: none"> - Lit mineur quasi-continu identifiable dans le fond de vallée - Axes routiers et ferroviaires discernables dans certains secteurs mais apparaissent parfois comme vallées lorsque légèrement encaissées - Artefacts liés au bocage, au réseau de fossés ou à la microtopographie 	<ul style="list-style-type: none"> - Lit mineur davantage discontinu - Artefacts liés au bocage, au réseau de fossés ou à la microtopographie 	<ul style="list-style-type: none"> - Représentation homogène du fond de vallée (lit mineur non-discernable) - Axes routiers et autoroutiers non-discernables
Temps de calcul pour les formes du relief (r.param.scale / largeur de la fenêtre de calcul : 7)	2min23sec	35sec	21sec
Résultat	<ul style="list-style-type: none"> - Courbes de niveau dans les fonds de vallée - Au 1/25 000 les talwegs ne sont pas rectilignes - Résultat plus lissé 	<ul style="list-style-type: none"> - Courbes de niveau dans les fonds de vallée - Au 1/25 000 les talwegs ne sont pas rectilignes - Résultat plus lissé 	<ul style="list-style-type: none"> - Courbes de niveau visibles dans fond de vallée - Au 1/25 000 les talwegs sont rectilignes - Davantage de surface considérée comme « Plane » entre « Vallées » et « Lignes de crêtes »

Annexe 6 : Carte représentant les sous-fonctions hydrologiques des zones humides du bassin versant de la Veyle

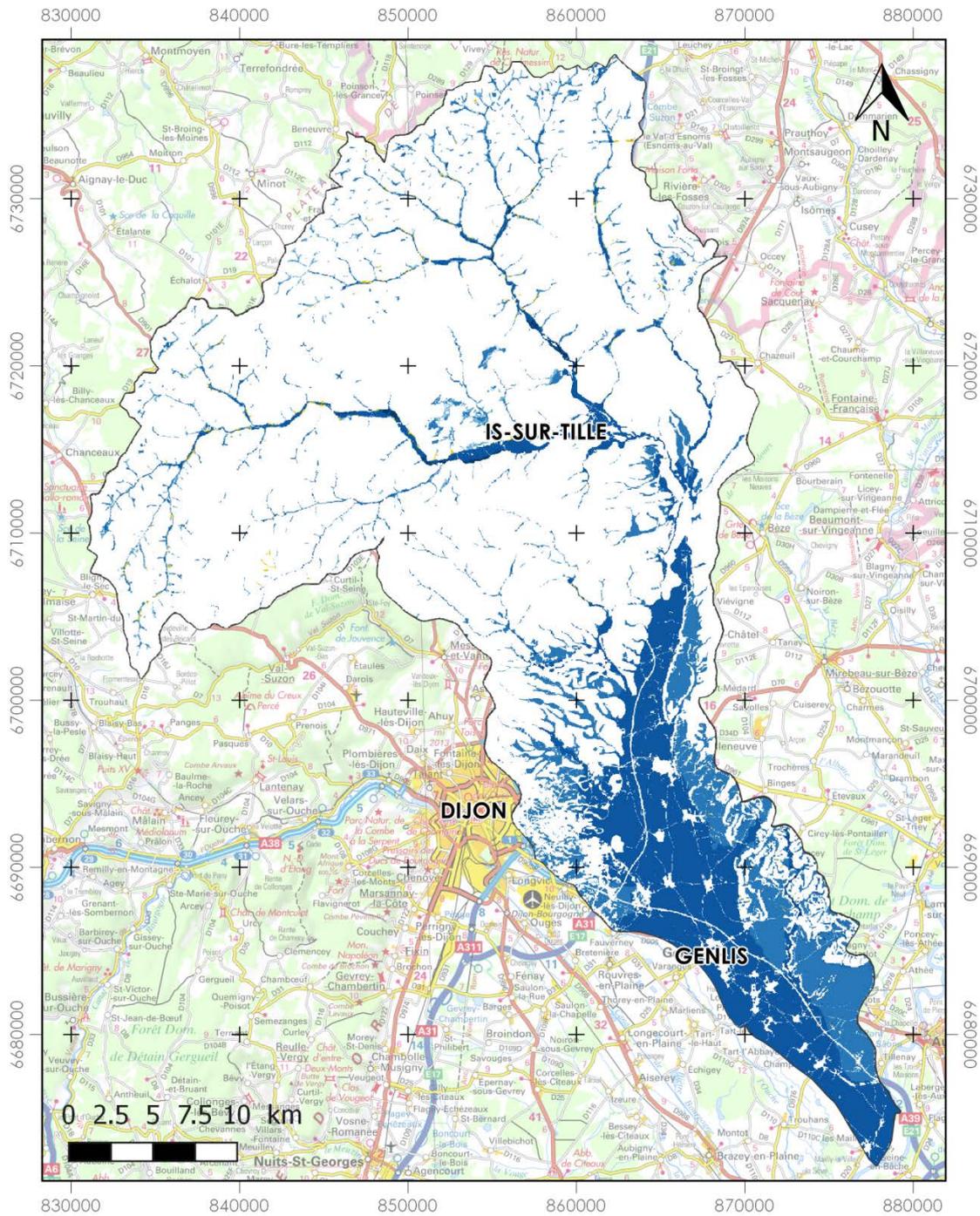


Système de coordonnées : RGF93 - Lambert 93
Unité : Mètre

Légende

- Hors zone humide
- Zone humide ne remplissant plus de fonction hydrologique
- Zone humide remplissant une sous-fonction hydrologique
- Zone humide remplissant deux sous-fonctions hydrologiques
- Zone humide remplissant trois sous-fonctions hydrologiques
- Zone humide remplissant quatre sous-fonctions hydrologiques

Annexe 7 : Carte représentant les sous-fonctions hydrologiques des zones humides du bassin versant de la Tille



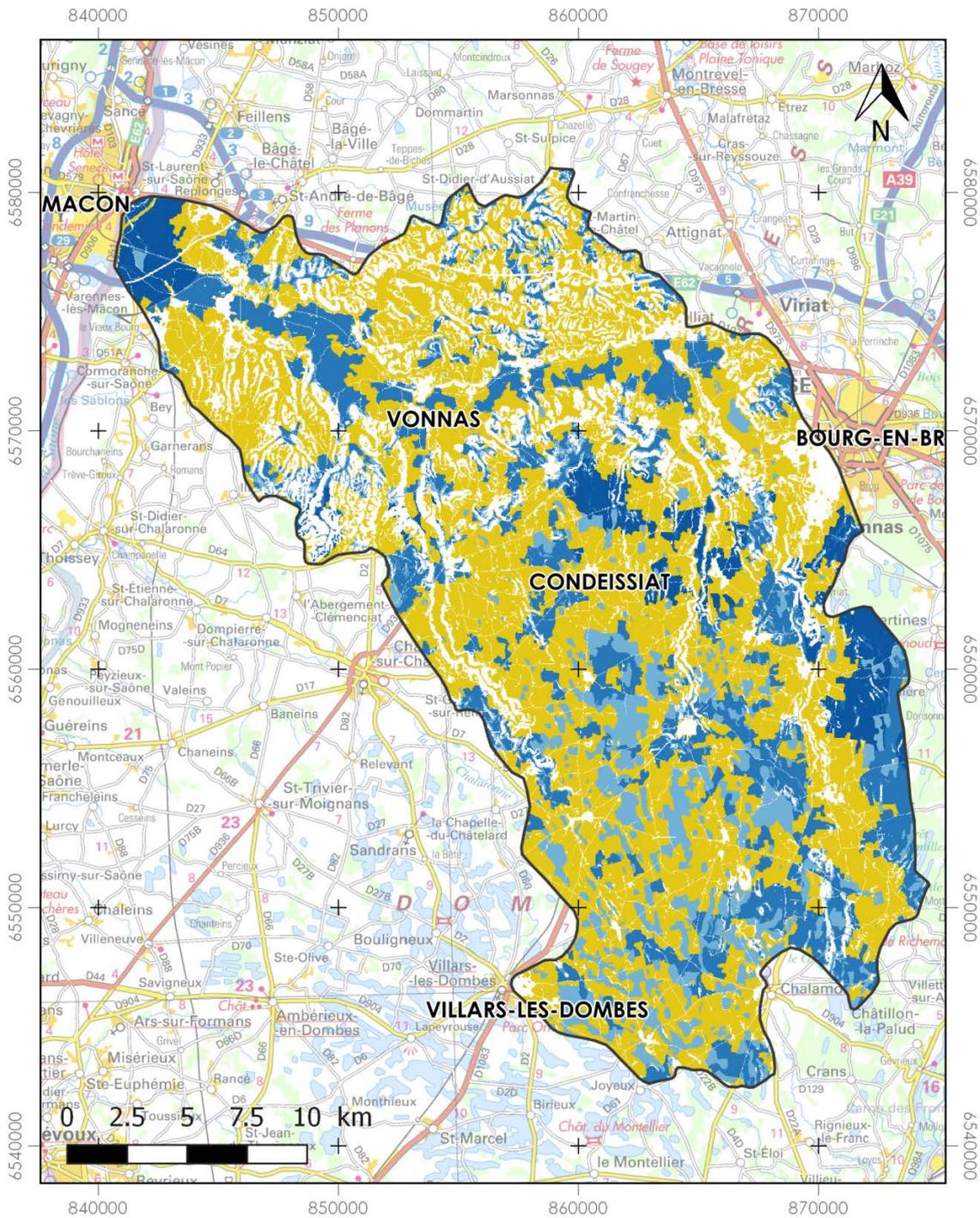
Système de coordonnées : RGF93 - Lambert 93

Unité : Mètre

Légende

- Hors zone humide
- Zone humide ne remplissant plus de fonction hydrologique
- Zone humide remplissant une sous-fonction hydrologique
- Zone humide remplissant deux sous-fonctions hydrologiques
- Zone humide remplissant trois sous-fonctions hydrologiques
- Zone humide remplissant quatre sous-fonctions hydrologiques

Annexe 8 : Carte représentant les sous-fonctions biogéochimiques des zones humides du bassin versant de la Veyle

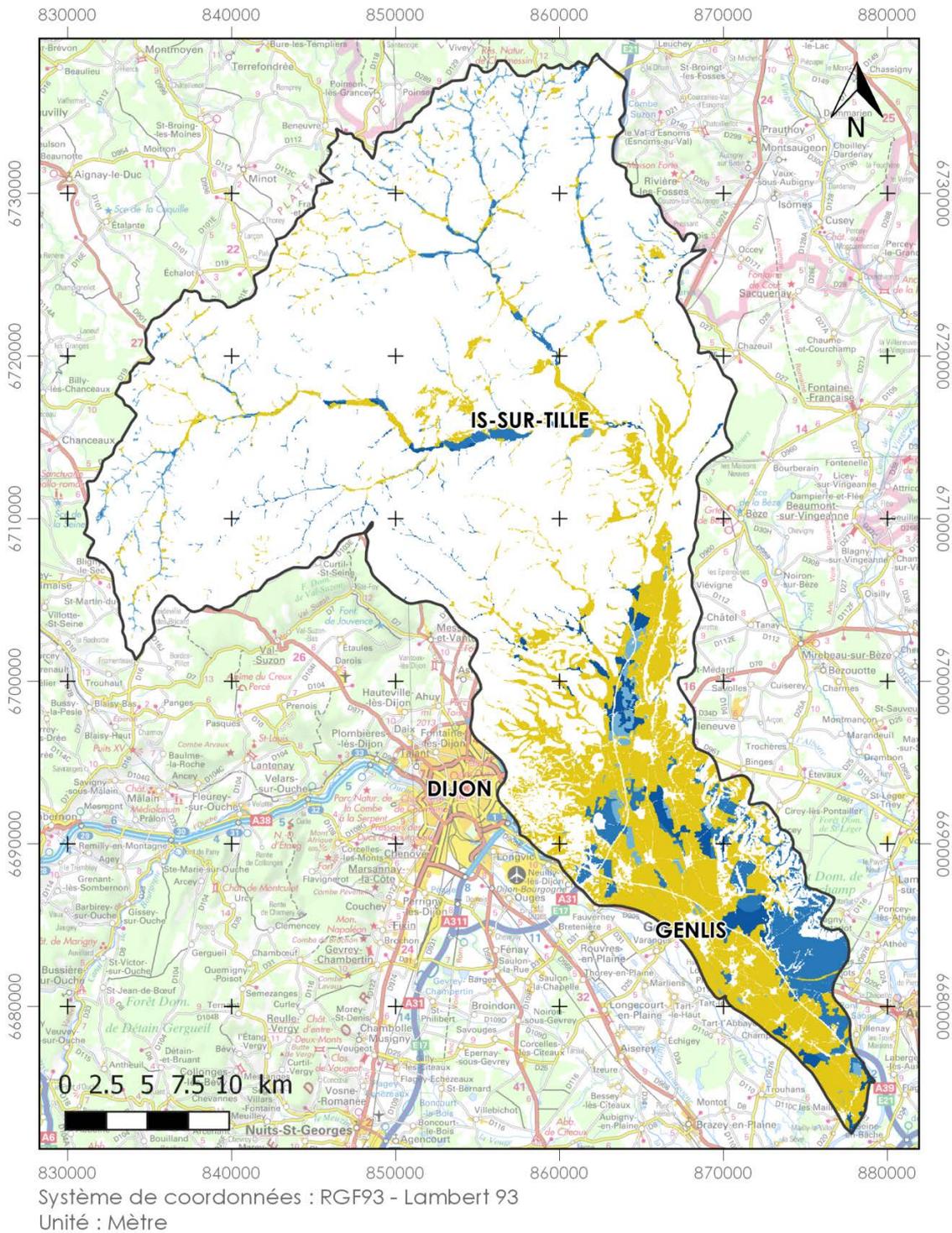


Système de coordonnées : RGF93 - Lambert 93
Unité : Mètre

Légende

- Hors zone humide
- Zone humide ne remplissant pas de sous-fonction biogéochimique
- Zone humide remplissant une sous-fonction biogéochimique
- Zone humide remplissant deux sous-fonctions biogéochimiques
- Zone humide remplissant trois sous-fonctions biogéochimiques

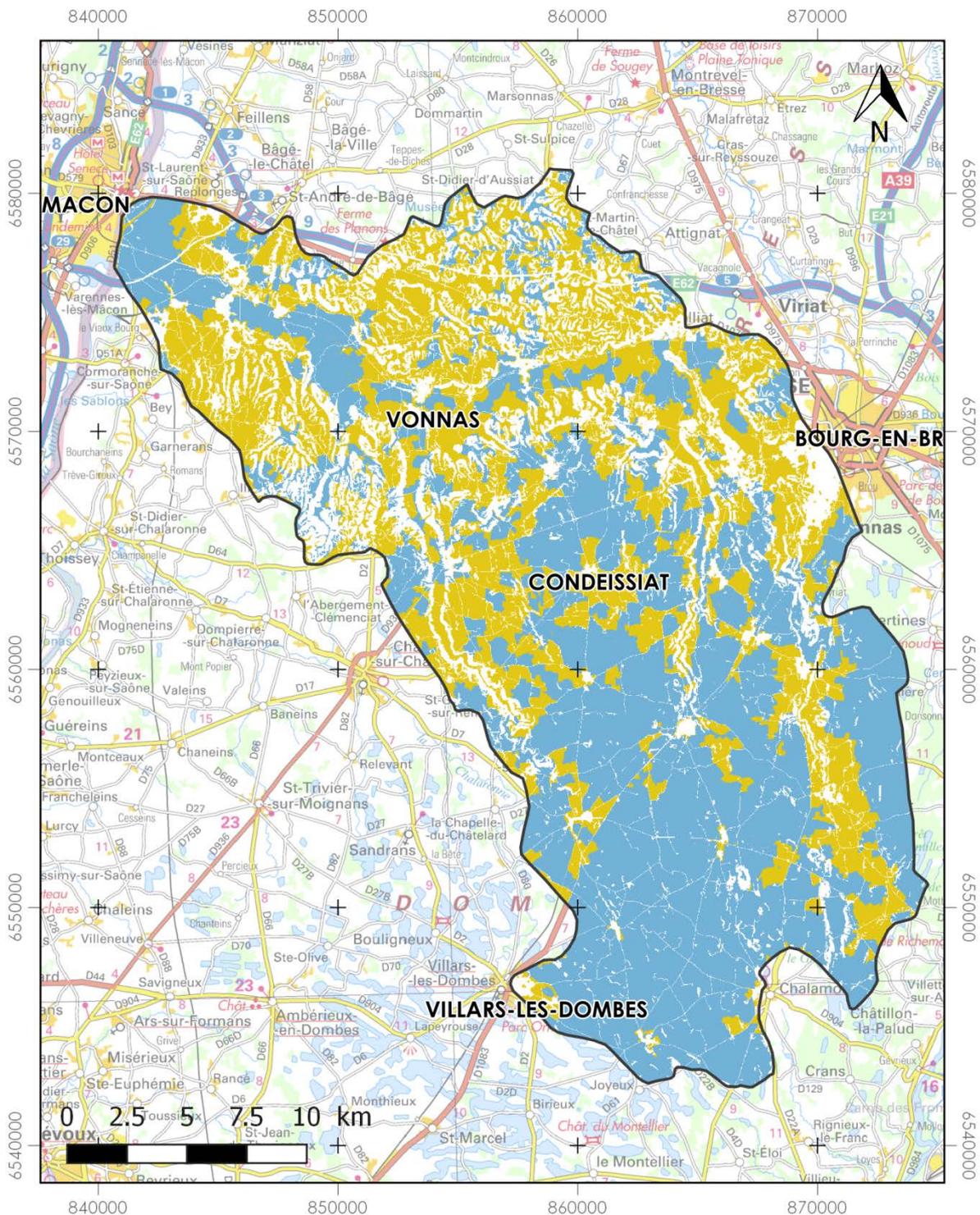
Annexe 9 : Carte représentant les sous-fonctions biogéochimiques des zones humides du bassin versant de la Tille



Légende

- Hors zone humide
- Zone humide ne remplissant pas de sous-fonction biogéochimique
- Zone humide remplissant une sous-fonction biogéochimique
- Zone humide remplissant deux sous-fonctions biogéochimiques
- Zone humide remplissant trois sous-fonctions biogéochimiques

Annexe 10 : Carte représentant la fonction écologique des zones humides du bassin versant de la Veyle

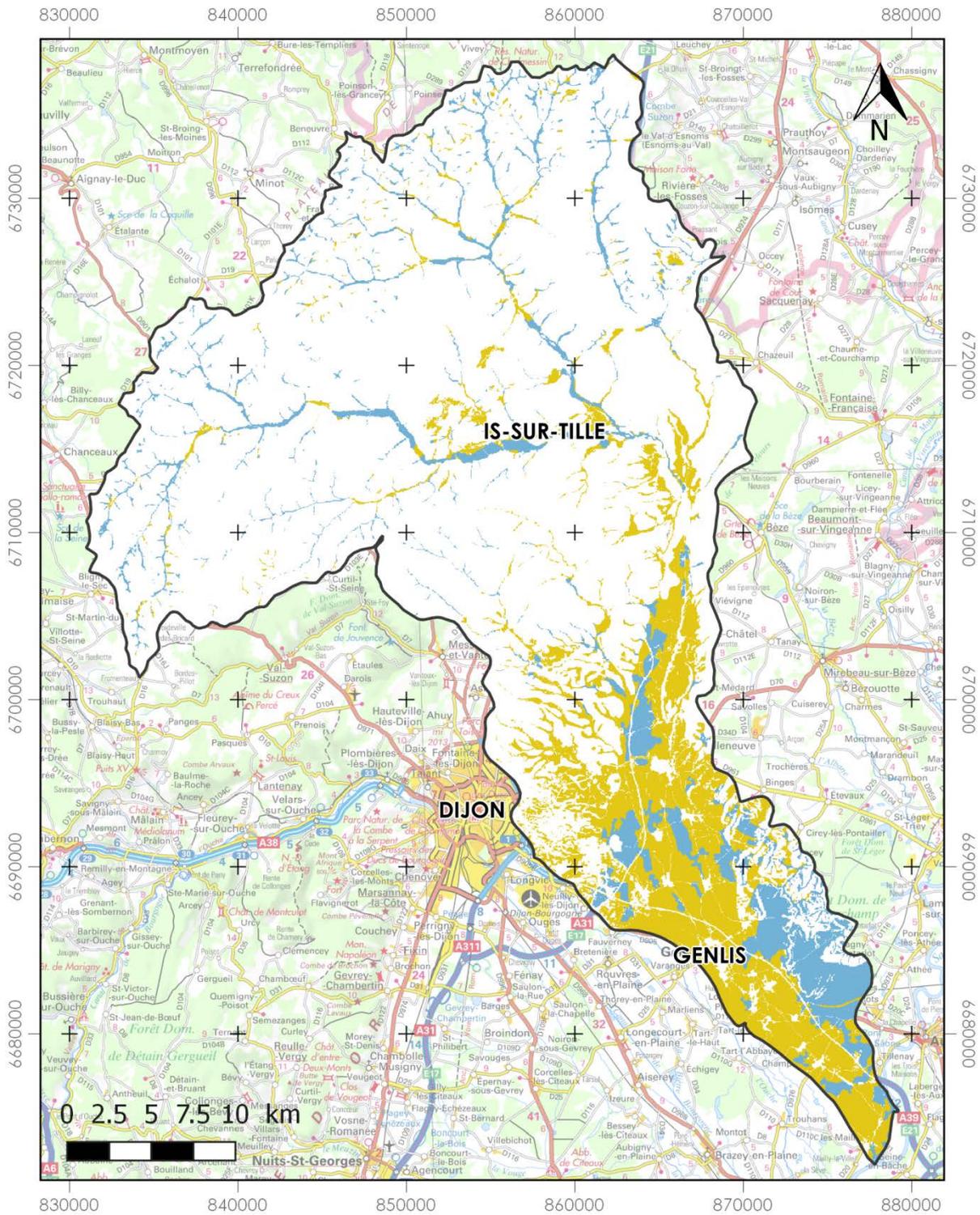


Système de coordonnées : RGF93 - Lambert 93
Unité : Mètre

Légende

- Hors zone humide
- Zone humide ne remplissant pas de fonction écologique
- Zone humide remplissant une fonction écologique

Annexe 11 : Carte représentant la fonction écologique des zones humides du bassin versant de la Tille



Système de coordonnées : RGF93 - Lambert 93
Unité : Mètre

Légende

- Hors zone humide
- Zone humide ne remplissant pas de fonction écologique
- Zone humide remplissant une fonction écologique

Résumé

Dans le cadre de l'élaboration du prochain SDAGE 2022-2027, l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse exprime le besoin de disposer d'un outil cartographique pour localiser les zones humides sur le bassin Rhône-Méditerranée en vue de qualifier les fonctions qu'elles remplissent et les pressions qu'elles subissent. L'objectif est de faciliter leur suivi et d'orienter les actions à entreprendre pour enrayer la disparition des zones humides. Basée sur l'utilisation d'outils SIG, cette étude propose une démarche innovante de localisation des zones humides qui repose sur l'analyse de critères abiotiques définis par écorégion, unité élémentaire cohérente d'un point de vue géologique, géomorphologique et climatique. Les résultats obtenus à partir des tests méthodologiques sur les sous-bassins versants de la Tille et de la Veyle soulignent la capacité de cette méthode à prendre en compte les spécificités locales. Les fonctions majeures (hydrologique, biogéochimique et écologique) sont appréhendées selon la présence de descripteurs liés à la position des zones humides au sein du bassin versant, le mode d'occupation des sols et les secteurs délimités pour des enjeux spécifiques. Parallèlement, les pressions, liées à l'urbanisation et à l'agriculture, sont délimitées selon la méthode du programme RhoMéO afin d'être mises en perspective avec les fonctions. Le résultat est une carte au 1/25 000 qui représente la localisation des zones humides et qui qualifie les fonctions ainsi que les pressions de ces écosystèmes.

Mots-clés : zones humides, SIG, fonction, pression, écorégion

Abstract

This study fits in the context of elaboration of the next 2022-2027 Water Development and Management Master Plan's context. Indeed, the Rhone-Mediterranean Corsica Water Agency is in need of a decision-mapping tool to localize wetlands in the Rhone-Mediterranean watershed in order to indicate performed functions and surfaces under pressure. The goal of the study is to facilitate their monitoring and to guide actions to be undertaken to halt wetlands loss. Based on GIS tools, this study proposes an innovative approach of wetlands location which analyze abiotic factors defined by ecoregions, which are coherent units in terms of geology, geomorphology and climate. Results from the methodological tests in Tille's and Veyle's subwatershed underline the method ability to take into consideration local specificities. Major functions (hydrologic, biogeochemic and ecologic) are approached by the presence of descriptors based on wetlands position in the watershed, land use and delimited areas with specific stakes. Simultaneously, pressures, due to urbanization and agriculture, are delimited as recommended in the RhoMeO's program in order to be compared to the functions. The end product of this study is a 1:25,000 map which localizing wetlands and indicating performed functions and surfaces under pressure.

Key words: Wetlands, GIS, function, pressure, ecoregion