

Cartographie des zones humides de montagnes par télédétection. Potentialités des images à très haute résolution spatiale

Laure Vacquié, Thomas Houet

▶ **To cite this version:**

Laure Vacquié, Thomas Houet. Cartographie des zones humides de montagnes par télédétection. Potentialités des images à très haute résolution spatiale. Revue Internationale de Géomatique, 2012, 4, pp.497-518. halshs-00752923

HAL Id: halshs-00752923
https://shs.hal.science/halshs-00752923

Submitted on 10 Sep 2015

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

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

Cartographie des zones humides de montagne par télédétection

Potentialités des images à très haute résolution spatiale

Laure Vacquié, Thomas Houet

Laboratoire GEODE UMR 5602 CNRS, Université Toulouse le Mirail
5 allée Antonio Machado, 31058, Toulouse, France
laure.vacquie@univ-tlse2.fr, thomas.houet@univ-tlse2.fr

RÉSUMÉ. *Suite aux lois Grenelle 1 et 2, la mise en place des schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE) devra s'appuyer sur des outils cartographiques pour aider à la définition des trames verte et bleue. En raison de leurs multiples intérêts, les zones humides constituent des entités essentielles à intégrer. La télédétection fait preuve de potentialités et d'efficience quant à la détection et à la caractérisation de ces milieux, bien qu'ils restent difficiles à délimiter. Les zones humides de montagne sont particulièrement bien représentatives de cette problématique. Elles revêtent à la fois un fort intérêt écologique (richesse floristique et faunistique) mais sont potentiellement difficiles à détecter (petite taille, recouvertes par la neige de l'automne au printemps, ombres portées des crêtes, etc.). L'émergence de futures données à très haute résolution spatiale (THRS) et à forte répétitivité, qui seront produites par les missions spatiales Pléiades ou Venμs, offrent ainsi de nouvelles perspectives. L'objectif de cet article vise à déterminer si la THRS apporte une plus-value pour la caractérisation des petites zones humides de montagne, comparativement à des données HRS qui présentent une résolution spectrale plus riche. Les résultats obtenus démontrent ainsi que 1) des images THRS (Quickbird) permettent de compenser la richesse spectrale d'images HRS (Spot-5), 2) les méthodes orientées objets présentent de meilleurs résultats que des méthodes orientées pixels bien que 3) ces milieux restent difficiles à détecter (53 % de détection correcte).*

ABSTRACT. *According to recent French environmental laws (Grenelle 1 and 2), the implementation of the regional plans preserving ecological continuities will have to be based on mapping tools to define "Green" and "Blue" corridors. Integrating wetlands is essential regarding their multiples functions. Remote sensing techniques have shown good potentials and efficiency even if wetlands detection and characterization is still challenging. Mountains wetlands are representative of such a challenge: their show strong ecological interest (high fauna and flora richness) but are potentially very difficult to detect (small size, covered by snow from autumn to spring, shadows of ridges, etc.). Emerging very high spatial resolution (VHSR) satellite images with high repetitivity that would be delivered from Pléiades and Venμs offer news perspectives. The aim of this paper is determine whether the very high spatial resolution brings added value for the detection and characterization of small*

mountain wetlands compared to high spatial resolution (HSR) images that have a higher spectral resolution. Results demonstrate that (1) VHSR images (Quickbird) compensate the spectral richness of HSR images (Spot-5), (2) Object-oriented methods provide better results than pixel-oriented methods even if (3) the detection of these habitats remains difficult (53% of good detection).

MOTS-CLÉS : *classification, fusion d'images, tourbières, Pyrénées, Spot-5, Quickbird.*

KEYWORDS: *classification, pansharpening, peat bogs, Pyrenees, Spot-5, Quickbird.*

DOI:10.3166/RIG.22.497-518 © 2012 Lavoisier

1. Introduction

Les zones humides présentent depuis plusieurs années de forts intérêts écologiques en raison de leurs fonctionnalités biologique, hydrologique et biogéochimique (SSC/UICN, 2004 ; Barnaud et Fustec, 2007 ; Mignot, 2005). Ces milieux sont ainsi au cœur d'enjeux de gestion pour les collectivités locales et les organismes de gestion. Les premiers dispositifs pour la préservation de ces milieux (ZNIEFF, NATURA 2000, etc.) avaient pour objectif leur patrimonialisation. Dans le cadre de la mise en place des Schémas régionaux de cohérence écologique (SRCE) suite aux lois cadre Grenelle 1 (loi n° 2009-967 du 03/08/2009) et Grenelle 2 (loi n° 2010-788 du 12/07/2010), le mode de gestion a évolué afin de prendre en compte leurs fonctionnalités et leur assurer une certaine pérennité. Les composantes de la trame verte et de la trame bleue ont ainsi pour objectif de préserver les continuités écologiques. Les organismes impliqués par la mise en place de nouvelles réglementations, s'appuient de plus en plus sur la cartographie comme un outil d'aide à l'élaboration et à la mise en place d'outils de gestion. À titre d'exemple, les SCRE devront ainsi s'appuyer, de même que le schéma de cohérence territoriaux (SCoT), sur un volet identifiant les espaces naturels constitutifs des trames verte et bleue (cours d'eau, parties de cours d'eau, canaux ou zones humides mentionnés respectivement au 1° et au 2° du II et aux 2° et 3° du III de l'article L. 371-1) et une cartographie de celles-ci. La cartographie fine de la trame bleue n'est pas nouvelle. En effet, la Directive cadre européenne sur l'eau du 23 octobre 2000 (Directive 2000/60/CE), impose déjà de façon implicite, la cartographie de ces espaces (délimitation et caractérisation des types de milieux) lors de l'élaboration des schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE). Seul un inventaire exhaustif peut permettre d'identifier ces zones à enjeux dans le but de hiérarchiser les actions pour le maintien et la restauration « du bon état des masses d'eaux naturelles et du bon état potentiel des masses d'eaux artificielles et profondément modifiées » (Directive cadre européenne sur l'eau) à l'horizon 2015. Au final, la délimitation spatiale et la caractérisation des zones humides constituent un enjeu majeur pour la gestion de l'environnement tant au niveau régional qu'européen afin de respecter la stratégie paneuropéenne pour la protection de la diversité biologique et paysagère (STRA-CO, 2003).

La télédétection constitue une méthode d'inventaire faisant preuve de potentialités et d'efficience pour la détection et la caractérisation de ces milieux (Hubert-Moy *et al.*, 2003). Les images satellitaires ou aéroportées, grâce à leur résolution spatiale, spectrale et/ou temporelle permettent de traiter de vastes territoires plus rapidement par la prospection exhaustive du terrain. Cependant, situés à l'interface entre milieux terrestres et milieux aquatiques, d'une taille souvent limitée, ces écosystèmes restent difficiles à recenser de façon exhaustive (Girard et Girard, 1999). Les zones humides de montagne sont bien représentatives de cette problématique. Elles revêtent un fort intérêt écologique (richesse floristique et faunistique) mais sont potentiellement difficiles à détecter (petite taille, recouvertes par la neige de l'automne au printemps, ombres portées des crêtes, etc.). Dans le cas des Pyrénées, des espèces endémiques telles que l'euprocte des Pyrénées (*Calotriton asper*) ou emblématiques telles que la *Drosera rotundifolia* dépendent fortement de ces milieux. L'émergence de données à très haute résolution spatiale (THRS) et à forte répétitivité, qui seront produites par les missions spatiales Pléiades ou Venµs, offre de nouvelles perspectives. L'objectif de cet article est de déterminer si les images THRS constituent un support adapté à la cartographie des zones humides de montagne, notamment par rapport à des données à haute résolution spatiale (HRS – de type SPOT) qui présentent une résolution spectrale plus riche.

2. Zones humides de montagne et télédétection

Cet état de l'art recense les méthodes d'inventaires existantes pour cartographier les zones humides. Deux approches se distinguent : celles fondées sur un inventaire de terrain et celles fondées sur une approche spatiale reposant essentiellement sur l'usage de la télédétection.

2.1. Inventaires des zones humides : historique et données de télédétection

Les relevés de terrain sont majoritairement utilisés pour réaliser les inventaires des zones humides, leur état et les menaces pesant sur elles afin de les insérer ou non dans des programmes de gestion (Ramsar, 2005). Bien qu'ils permettent une connaissance exhaustive des milieux recensés, leur coût – temps et moyens humains – reste important. L'usage de la télédétection pour leur inventaire remonte aux années 1970. L'USFWS (*U.S. Fish and Wildlife Service*) avait alors développé une méthodologie reposant sur l'analyse de photographies aériennes infrarouge et d'une validation ensuite par des relevés terrains. Si elle présente une précision globale estimée à 90 %, elle reste difficile à mettre en œuvre : plus de 350 personnes mobilisées, coût des couvertures aériennes, temps nécessaire à prospecter l'ensemble du territoire national et digitaliser les zones humides (Barnaud et Fustec, 2007).

Avec l'évolution récente des technologies satellitaires et aéroportées, la télédétection propose aux scientifiques des potentialités d'analyse inédites (Hubert-

Moy *et al.*, 2003). Les données de télédétection offrent en effet de nombreux avantages, à commencer par leur couverture spatiale qui permet de collecter des informations homogènes sur plusieurs dizaines voire centaines de km² sans considération de l'accessibilité physique de la zone et cela de manière périodique (Puissant, 2003). L'imagerie satellitaire offre également des caractéristiques spectrales et spatiales permettant la distinction et l'identification de certains types de végétations spécifiques aux milieux humides. La photo-interprétation offre également la possibilité d'un suivi multidate des zones humides dont les limites varient fréquemment puisque fortement liées aux activités humaines (Brinson, 1993). Les techniques d'inventaires à partir de données de télédétection à haute résolution spatiale (HRS) telles que Spot ou Landsat présentent toutefois quelques limites. Dans ces milieux où les changements surviennent à des rythmes hebdomadaires voire quotidiens, il est souvent nécessaire d'avoir recours à des données diachroniques afin de pouvoir en tenir compte pour leur détection (Hubert-Moy, 2005). L'analyse d'images à des échelles de temps mensuelles, trimestrielles, ou encore annuelles ne permet pas d'appréhender avec exactitude les phénomènes propres à ces milieux. De plus, face à l'extrême hétérogénéité des espèces végétales présentes, leur dissémination et la taille variable de ces milieux, il est rare d'obtenir des pixels suffisamment homogènes qui permet une classification témoignant de cette variété. Dans ce contexte, les capteurs dotés d'une trop faible résolution spatiale ne permettent de détecter que partiellement les espèces végétales dominantes (Clément *et al.*, 2008).

La détection des zones humides reste donc difficile à partir de données HRS du fait des similitudes entre différentes espèces végétales, de la faible résolution spatiale des images et de la faible répétitivité temporelle. Les images THRS offrent une résolution spatiale inférieure à 5 m en multispectral et permettent de détecter de petites entités paysagères (Puissant, 2003 ; Vannier, 2006). La périodicité des acquisitions permet d'analyser les évolutions de ces petits écosystèmes, de caractériser le type de végétation (rythmes phénologiques), ou encore de réduire les problèmes inhérents aux conditions météorologiques (couverture nuageuse). D'autres méthodes, reposant sur des approches topographiques (Mérot *et al.*, 2002) existent et présentent des résultats intéressants. Toutefois, la qualité des résultats étant dépendante de la résolution des MNT, cette approche est inenvisageable en zone de montagne avec les données dont nous disposions.

2.2. Méthodes existantes pour la détection des zones humides

L'étude bibliographique, peu développée en raison de la difficulté de la problématique, s'est également inspirée des méthodes utilisées en télédétection pour la détection de petits éléments paysagers à forte valeur écologique et environnementale. Elles s'appuient pour la plupart sur des données de télédétection THRS/HRS et différentes méthodes de classifications. Plusieurs travaux montrent ainsi des taux de détection plus précis à partir de données THRS, comparativement à

des données HRS (Nabucet, 2005 ; Vannier *et al.*, 2008 ; 2010), confirmant l'idée que la THRS permettrait une meilleure identification d'entités de petite taille (ex : haies bocagères, bandes enherbées, etc.). Les résultats varient selon les méthodes utilisées. La détection des zones humides par télédétection renvoie à deux approches : celles reposant sur des indices d'humidité et de végétation, et celles se concentrant sur le développement et la comparaison de méthodes de classifications afin d'évaluer leur efficacité.

2.2.1. Indices d'humidité et de végétation

L'approche fondée sur les indices d'humidité reste une approche privilégiée car les zones humides présentent une relative humidité des sols, même en période sèche (Clément *et al.*, 2008). Des recherches portant sur l'étude de zones humides de fonds de vallées dans le Massif armoricain montrent que les images THRS/HRS permettent de les localiser à partir d'un indice d'humidité (Mérot *et al.*, 2005).

Les indices (tableau 1) varient selon le type de capteurs utilisés, et permettent de faire ressortir des informations relatives à l'humidité des sols ou de la végétation. Trois principaux indices se distinguent : le *Wetness Index* (Crist et Cicone, 1984), le *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*) (Gao, 1996) et le *NDWI2* (McFleeters, 1996). Le *Wetness Index*, issu du Tasseled Cap calculé uniquement pour des images Landsat, se montre efficace pour améliorer la classification de zones humides à partir d'images Landsat TM (Chiu et Couloigner, 2004). Les *NDWI* et *NDWI2* sont élaborés pour des capteurs de type Spot ou Landsat. Ces indices permettent de mettre en évidence la présence d'eau à partir des bandes du proche et moyen infra-rouge. Des indices de végétation peuvent également être employés pour différencier les zones humides à partir des types de végétation. Des indices indépendants des types de sols sont à privilégier (TSAVI, PVI, etc.).

Tableau 1. Quatre indices d'humidité et de végétation

Indice	Nom	Formule	Référence
NDWI	*Normalized Difference Water Index*	(PIR-MIR)/(PIR+MIR)	Gao (1996)
NDWI2	*Normalized Difference Water Index 2*	(V-PIR)/(V+PIR)	McFleeters (1996)
PVI	*Perpendicular Vegetation Index*	$(PIR-aR-b)/\sqrt{(1+a^2)}$	Richardson et Wiegand (1977)
TSAVI	*Transformed Soil Adjusted Vegetation Index*	$a(PIR-aR-b) / (R+a(PIR-b)+0,08(1+a^2))$	Baret *et al.* (1989)

Avec :

MIR : réflectance au sol de la surface dans le canal du moyen infrarouge,

PIR : réflectance au sol de la surface dans le canal du proche infrarouge,

V : réflectance au sol de la surface dans le canal du vert,

R : réflectance au sol de la surface dans le canal du rouge,

a : pente de la droite des sols nus dans le plan PIR-R,

b : ordonnée à l'origine de la droite des sols dans le plan PIR-R.

2.2.2. Méthodes de classification : approches orientées pixels vs. *orientées objets*

Deux types d'approches de classification se distinguent : celles reposant sur les informations spectrales des pixels, dites orientées pixels, et celles tenant compte de groupes de pixels homogènes et de leur contexte spatial avoisinant, englobant ou englobés, dites méthodes orientées objets. Les méthodes orientées pixels ne peuvent prendre en compte la grande quantité d'information contenue dans les images THRS (informations contextuelles, de texture, etc.), aboutissant à des résultats inconsistants et loin des attentes en termes d'extraction d'informations (Oruc *et al.*, 2004). Du fait de l'extrême hétérogénéité des zones humides et de leur dissémination dans le paysage, les classifications orientées objets s'avèrent plus efficaces pour les extraire et les caractériser (Hubert-Moy *et al.*, 2003). Toutefois, certaines méthodes orientées pixels récentes et performantes (méthodes *Support Vector Machine*, méthodes neuronales, etc.) doivent être testées. En effet, les résultats de classification peuvent varier suivant les types de milieux et les travaux de Lennon *et al.* (2002) ont démontré les performances des méthodes SVM pour leur détection.

Une approche orientée objet, à partir de critères de similitude basés sur les réponses spectrales, la texture et le voisinage est *a priori* plus appropriée pour délimiter et caractériser des zones humides (Meinel et Neubert, 2004). Ce type de méthode permet d'inventorier (délimitation et identification) avec précision de petites zones humides de fonds de vallées en Bretagne à partir de données Spot-5 (Hubert-Moy *et al.*, 2006) en utilisant, pour chaque objet, des fonctions d'appartenance à une classe selon des critères spécifiques définis par l'utilisateur (Benz *et al.*, 2003).

3. Méthodologie

Pour évaluer l'apport des images THRS pour la cartographie des zones humides de montagne, plusieurs méthodes de classification sont évaluées sur un site localisé dans les Pyrénées ariégeoises.

3.1. Site d'étude et données

Le site d'étude est la vallée de Bassiès, située dans le Haut-Vicdessos (Pyrénées ariégeoises – figure 1). On y retrouve une grande diversité de milieux humides de

plus ou moins grandes dimensions, représentatifs d'une situation commune : la détection des zones humides pouvant être plus délicate en raison de leur taille plus petite et de leur présence moins fréquente que dans d'autres sites pyrénéens. Ce site est labellisé en site Observatoire « Hommes-Milieux » (OHM) du Haut-Vicdessos par l'Institut écologie et environnement du CNRS.

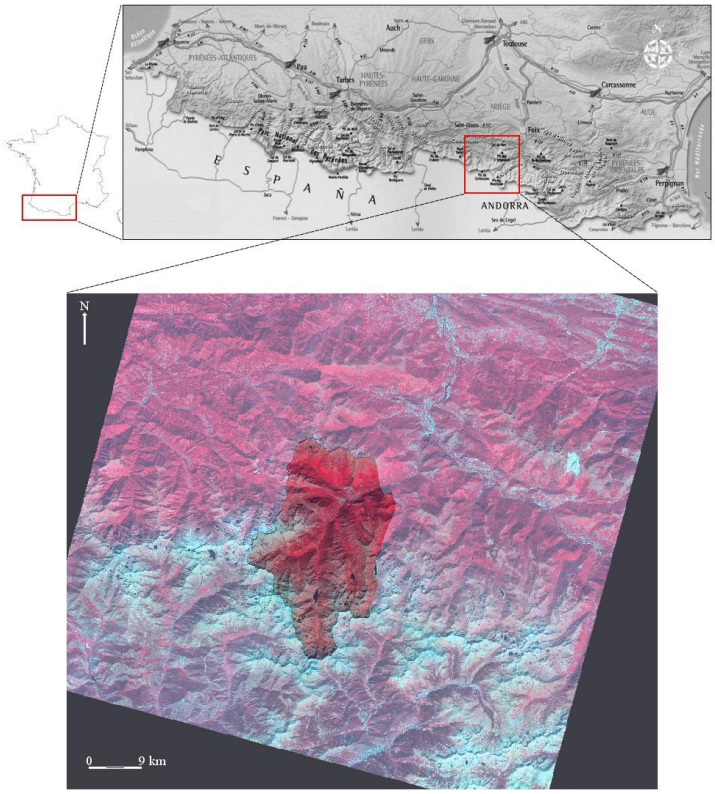


Figure 1. Localisation du site d'étude, la vallée de Bassiès (Haut-Vicdessos)

Trois types de données de télédétection sont utilisés. L'image THRS Quickbird, acquise le 26 août 2003, comprend une image panchromatique et une image multispectrale. Du fait de la sècheresse estivale de 2003, des incertitudes quant à l'état des zones humides de la vallée doivent être considérées. Aucune autre image THRS d'archive n'est disponible sur la zone d'étude. Deux images HRS (Spot-5) sont également utilisées : la première (mode multispectral – 10 m de résolution spatiale) acquise le 8 juillet 2010, la seconde (mode panchromatique à 5 m et multispectral à 10 m) acquise le 14 septembre 2010. Les orthophotoplans de 2003 et

2008 et un modèle numérique de terrain acquis par le satellite ASTER sont utilisés pour les prétraitements et leur validation. Le tableau 2 résume les données utilisées.

Les images Spot et Quickbird, pour être parfaitement comparables, sont orthorectifiées, en tenant compte des données altitudinales et des paramètres orbitaux des capteurs. Elles font ensuite l'objet de prétraitements radiométriques. Les images Spot sont converties en réflectances de surface, ou TOC *(Top Of Canopy*) offrant des réponses spectrales similaires aux relevés spectro-radiométriques réalisés sur le terrain. L'image Quickbird est convertie en mode TOA (*Top Of Atmosphere*) car les informations nécessaires à sa conversion en mode TOC étaient indisponibles. La valeur des pixels peut ainsi être comparée aux images, aux effets atmosphériques près. Pour tester l'apport de la THRS, des méthodes de fusions P+XS (panchromatiques/multispectral) sont utilisées. Pour les données Spot, la méthode Gram-Schmidt (Santurri *et al.*, 2010) est utilisée pour obtenir une image multispectrale à 5 m de résolution spatiale (figure 2c et 2d). Pour les données Quickbird, une variante de la méthode multiplicative a été utilisée pour la fusion (figure 2a et 2b). Bien qu'améliorant la résolution spatiale des images, ces méthodes de fusion altèrent légèrement les valeurs spectrales des canaux (Thomas, 2006).

Tableau 2. Données de télédétection utilisées

		Quickbird	Spot-5	BD Ortho
Résolution spatiale (en m)	Panchromatique	0,61	2,5 ou 5	-
	Multispectral	2,44	10 (MIR : 20)	0,5
Résolution spectrale (en µm)	Panchromatique	0,44-0,90	0,51-0.73	-
	Bleu	0,45-0,52	-	x
	Vert	0,52-0,60	0,50-0,59	
	Rouge	0,63-0,69	0.61-0,68	
	PIR	0,66-0,90	0.78-0,89	-
	MIR	-	1,58-1,75	-
Répétitivité temporelle		3 à 5 jours	26 jours (pouvant être réduit à 5 jours)	5 ans
Étendue spatiale		16,5 km x 16,5 km (272 km²)	60 km x 60 km (3600 km²)	Département
Prétraitements		Orthorectification – Fusion P+XS		-
Date d'acquisition des données utilisées		1 août 2003	8 juillet 2010 14 septembre 2010	2003 2008

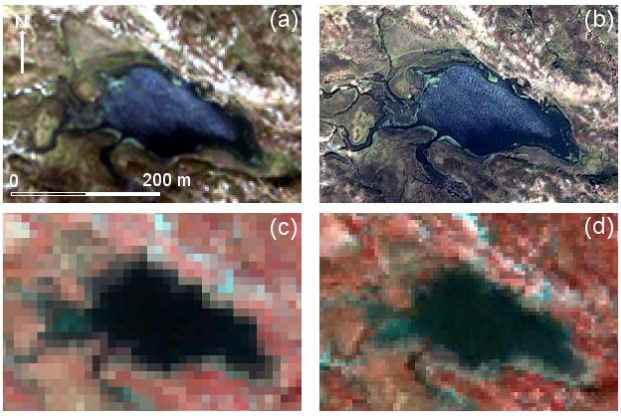


Figure 2. Résultats des fusions pour les images Spot et QB :
(a) Image Quickbird multispectrale et (b) Quickbird fusionnée (OTB-Monteverdi)
(c) Image Spot-5 multispectrale et (d) Spot-5 fusionnée (Gram-Schmidt)

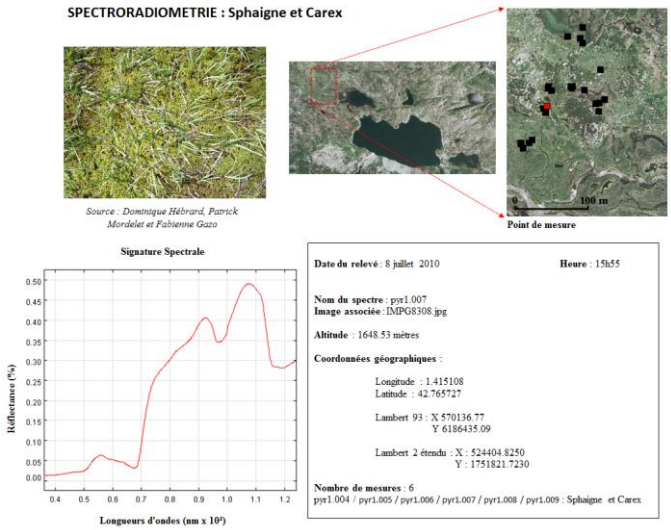


Figure 3. Exemple de relevé spectro-radiométrique de terrain utilisé comme échantillon d'entraînement pour les classifications

Deux types de données de terrain sont utilisées comme échantillons soit d'entraînement, soit de validation des classifications : des relevés spectro-radiométriques réalisés les 7 et 8 juillet 2010 (figure 3), le jour même de

l'acquisition Spot, et une cartographie détaillée (non exhaustive) des zones humides sur la vallée de Bassiès, effectuée en juillet 2010 (figure 4).

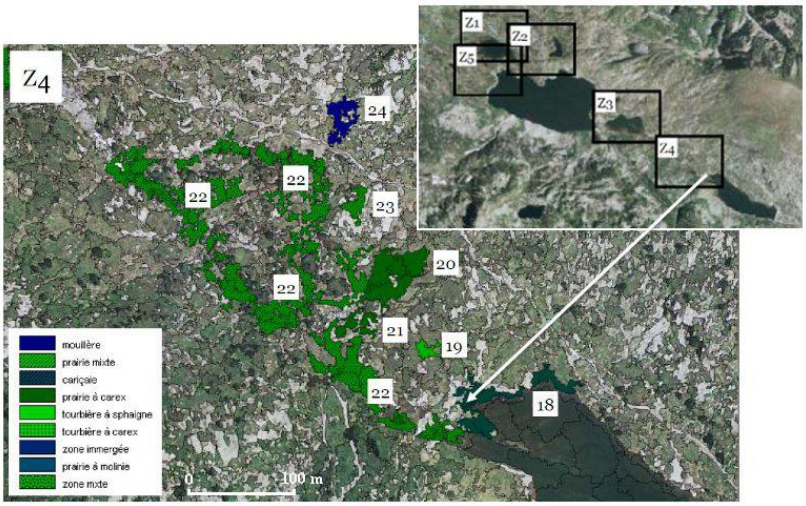


Figure 4. Cartographie des zones humides issue de relevés in situ, servant de données de validation des classifications. Exemple : étang d'Escalès

3.2. Typologie des zones humides de montagne

Les milieux montagnards influent grandement sur la diversité des zones humides. Neuf types de zones humides sont distingués sur le site d'étude (Benito et Bonnefoi, 2010) : mouillères, prairies mixtes, cariçaies, prairies à carex, tourbières à sphaigne, tourbières à carex, prairies à molinies, zones immergées, zones mixtes. Elles sont regroupées en trois types de zones humides, de façon à correspondre aux nomenclatures mises en place pour l'élaboration des SAGE/SDAGE : les prairies inondables, les prairies et landes humides et les tourbières (tableau 3).

Les prairies inondables concernent les zones situées dans le lit majeur d'un cours d'eau ou aux abords de zones humides et sont caractérisées par un engorgement périodique en eau. Les tourbières sont constituées essentiellement par une accumulation de matière organique en lente décomposition dans des milieux saturés d'eau (Lacoste et Salanon, 2006). Enfin, les prairies et landes humides se définissent comme des écosystèmes constitués par « des formations herbacées dominées par les hémicryptophytes » (Muller, 1996) que l'on retrouve sur des sols hydromorphes recouverts d'eau de manière épisodique. Cette nomenclature permettra d'évaluer l'utilisation de données THRS pour la mise en place des SRCE et/ou des SAGE.

Tableau 3. Nomenclature retenue, basée sur la nomenclature SDAGE / SAGE - concordance avec la typologie issue des relevés terrain

Typologie SDAGE	Typologie SAGE	Typologie issue des relevés de terrain	Typologie retenue
9. Bordures de cours d'eau	Prairies inondables/ Végétations aquatiques	Mouillères Zones immergées	Prairies inondables
10. Marais et landes humides de plaines et de plateaux (prairies et landes humides)	Landes humides/Marais	Prairies à carex Prairies mixtes Prairies à molinies Zones mixtes Cariçaies	Prairies et landes humides
	Prairies (tourbeuses)		
11. Zones humides ponctuelles	Tourbières	Tourbières à sphaigne	Tourbières
		Tourbières à carex	

3.3. Protocole méthodologique général

La démarche retenue afin d'évaluer l'apport de la THRS pour la détection et la caractérisation des zones humides consiste à comparer différentes méthodes de classification appliquées aux images multispectrales fusionnées et non fusionnées (Spot-5 et Quickbird). Ce protocole méthodologique, constitué de deux étapes (figure 5), présente l'avantage de pouvoir comparer 1) l'apport des images THRS, THRS fusionnées et HRS et 2) les méthodes de classification tant pour la délimitation que pour la caractérisation des types de zones humides de montagne.

L'objectif des classifications orientées pixel est d'évaluer, au travers de méthodes relativement faciles à mettre en œuvre, si la THRS offre de meilleurs résultats pour la caractérisation des zones humides, compensant ainsi une moins bonne résolution spectrale. Les méthodes orientées pixel testées sont les suivantes :

– La *classification par maximum de vraisemblance* est une méthode efficace et couramment utilisée. Elle repose sur l'hypothèse que les pixels d'une classe sont répartis selon une distribution connue (Hubert-Moy *et al.*, 2001) et attribue alors chaque pixel à une classe selon une probabilité d'appartenance à cette dernière ;

– La *classification par distance minimale* se base sur les centres de gravité des réponses spectrales des zones d'entraînements. Elle associe à une classe les pixels présentant la distance la plus faible (ou distance minimale) avec les centres de gravité précédemment établis ;

– La *classification Spectral Angle Mapper* (SAM). L'algorithme détermine les angles de similarité entre un pixel et les centres de gravité des classes d'entrainement, puis l'affecte à la classe la plus proche (Kruse *et al.*, 1993) ;

– La *classification Support Vector Machine* (SVM), tout comme la méthode par distance minimum, fait partie des méthodes qui ne posent pas d'hypothèses quant à la distribution spectrale des pixels (Wu *et al.*, 2004). La classification SVM se base ainsi sur le découpage de l'espace spectral qui tend à maximiser les marges entre les classes ;

– Enfin, la classification *Self-Organizing feature Map* (SOM) est une méthode neuronale qui tient compte des informations de voisinage. Chaque unité de calcul (ou neurone) est structurée en couches et opère en parallèle. Selon une valeur d'activation déterminée lors d'une phase d'apprentissage, l'information spectrale contenue dans un pixel géo-localisé, est traitée pour être affectée à une classe prédéfinie. L'avantage de ce type de méthode repose sur la prise en compte de la distribution statistique non gaussienne des signatures spectrales ainsi que sur la pondération par le voisinage de l'affectation à une classe (Houet *et al.*, 2004).

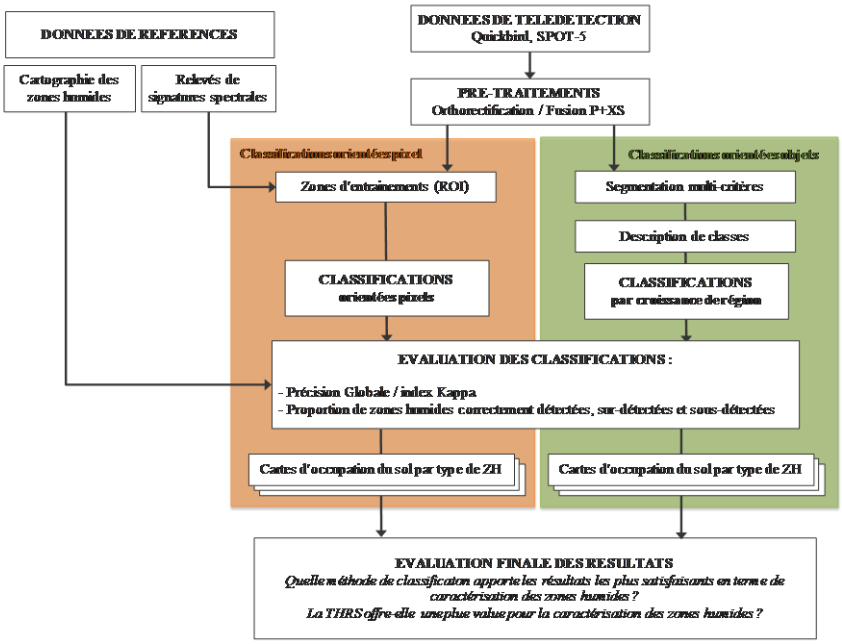


Figure 5. Protocole méthodologique pour l'évaluation des images THRS pour la cartographie des zones humides de montagne

Ces méthodes se basent sur des échantillons d'entraînement définis à partir de données terrain et qui servent de référence pour la classification de l'ensemble des pixels de l'image. De superficie réduite (1 à 2 m²), ces zones d'apprentissages sont définies autour des points de mesure spectro-radiométrique, zones pour lesquelles la composition végétale est connue et représentative des différentes zones humides de

montagne. Ces échantillons sont générés pour chaque type d'image utilisée.

L'utilisation de masques d'humidité issus des indices NDWI et NDWI2, générés respectivement à partir des images Spot et Quickbird, présente des intérêts multiples. Ils permettent 1) de s'affranchir *a priori* de zones non humides et ainsi permettre une identification plus précise des zones humides effectives, 2) d'analyser l'efficacité d'un indice produit avec et sans la bande du moyen infrarouge, et donc de savoir si la plus faible résolution spectrale de l'image Quickbird est compensée ou même améliorée par sa THRS. Des masques d'humidité sont produits de façon empirique (seuillage) grâce aux zones d'apprentissage (figure 6). A noter que, quel que soit l'indice, l'eau apparaît comme « non humide » car la réflectance de l'eau n'est pas comprise dans les intervalles de réflectance caractéristiques de sols et de types de végétation présentant un niveau d'humidité significatif.

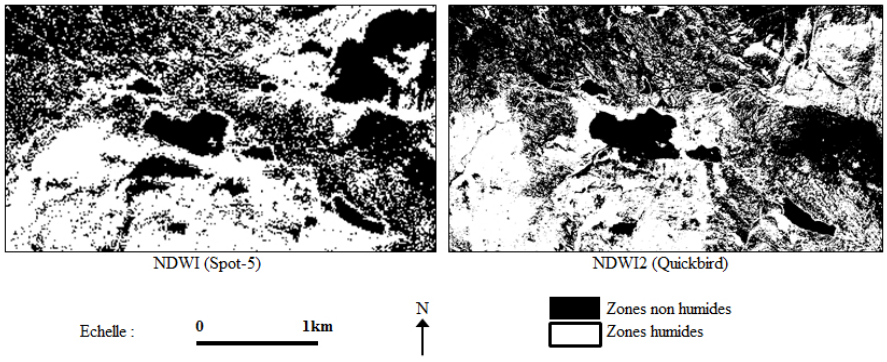


Figure 6. Masques issus des indices d'humidité NDWI et DWI2

Une seconde approche consiste à réaliser une classification orientée objet. Le choix s'est porté vers ce type de traitements car ils présentent l'avantage d'intégrer diverses couches d'informations lors de la description des classes (pente, voisinage, etc.). Ils restent également facilement reproductibles sur d'autres zones géographiques et/ou à différentes dates. Cette méthode comprend deux étapes successives : une segmentation, suivie d'une classification par croissance de région basée sur une description préétablie de chaque classe d'occupation du sol (figure 7). La segmentation de l'image en polygones homogènes permet de discriminer différents objets. Chaque classe de zone humide est définie empiriquement par des critères permettant leur distinction. Un algorithme de classification labellise alors chaque objet à la classe qui lui correspond. Un algorithme de classification par croissance de région est ensuite appliqué afin de classer, de façon itérative, les objets adjacents dont la certitude d'appartenance à une classe d'occupation du sol est très forte. La probabilité d'appartenance est définie par l'utilisateur soit à partir de seuils, soit à partir d'une valeur statistique (écart type).

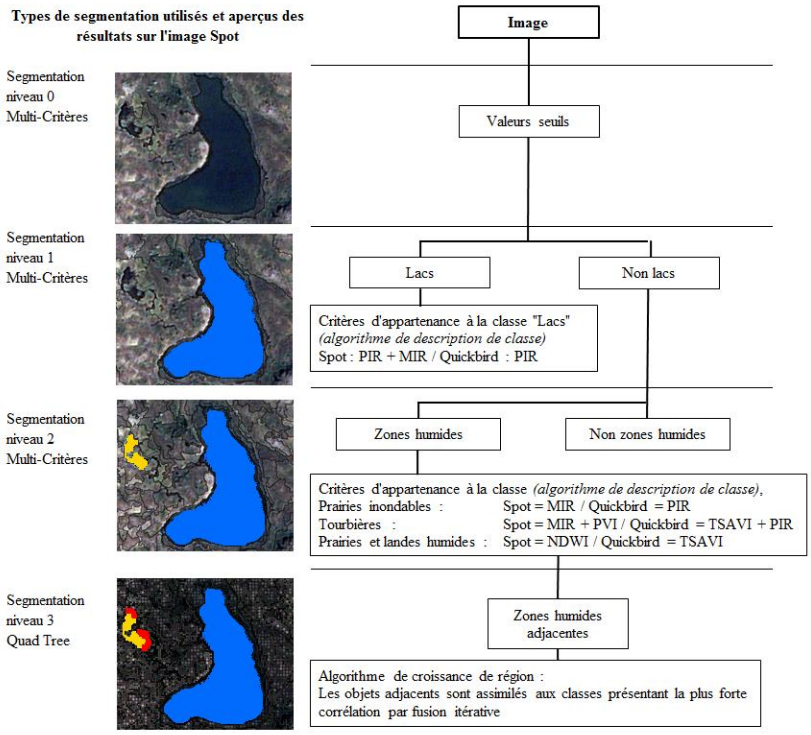


Figure 7. Méthode de classification orientée objet par croissance de région

3.4. Évaluation

Les méthodes de classification sont évaluées en comparant les résultats obtenus avec la carte de référence des zones humides de Bassiès. Dans un premier temps, les méthodes orientées pixel sont comparées à l'aide d'indices de Kappa et de Précision Globale (Pontius, 2000). Dans un second temps, la meilleure méthode est comparée à la méthode orientée objet, en estimant la part de zones humides correctement détectée par rapport aux 7,25 ha de zones humides inventoriées sur le terrain. La sur-détection est également évaluée. Les traitements offrant la sur-détection la plus faible peuvent ainsi permettre d'orienter des analyses ultérieures (validations sur le terrain, inventaires exhaustifs, etc.) vers des zones plus réduites et présentant de plus fortes chances d'accueillir des milieux humides. À l'issue de cette étape, il est alors possible 1) d'évaluer la plus-value de la THRS pour la caractérisation des petites zones humides de montagne mais également 2) de déterminer la méthode de classification la plus satisfaisante.

4. Résultats

Au terme des traitements effectués, les résultats portent sur 1) l'apport des différentes méthodes de classifications pour la détection des petites zones humides de montagne, 2) la détection des types de milieux selon les capteurs utilisés et 3) l'efficacité relative à l'utilisation de masques d'humidité NDWI et NDWI2.

4.1. Évaluation des méthodes de classification

D'une façon générale, la détection des zones humides est un objectif scientifique complexe en télédétection. Le contexte montagnard rend cela encore plus difficile en raison des effets du relief (illumination des versants, ombres portées des crêtes, etc.). La petite taille, l'hétérogénéité intrinsèque et la variabilité de l'hydromorphie de surface des objets à détecter constituent là encore des facteurs contraignants. Néanmoins, d'après les données terrain, près de 55 % de zones humides sont correctement détectées. Les résultats varient selon le type de classification.

Tableau 4. Précision globale (PG) et indice de Kappa (K) des classifications orientées pixel et orientées objet

	Quickbird (0,7 m)		Quickbird (2,8 m)		Spot (5 m)		Spot (10 m)	
	PG (%)	K	PG (%)	K	PG (%)	K	PG (%)	K
Distance minimum	82	0,62	80	0,59	79	0,58	77	0,56
Maximum de vraisemblance	82,	0,64	85	0,70	76	0,55	78	0,59
SAM	76	0,53	78	0,57	74	0,50	73	0,52
SVM	86	0,70	84	0,66	81	0,60	80	0,62
Kohonen's SOM	89,	0,76	88	0,72	93	0,84	93	0,84

Les indices de précision globale (PG) et de Kappa affichent des valeurs supérieures pour les classifications SOM. Pour des images Quickbird, le taux de précision globale est de 89 % en moyenne, et de 93 % avec Spot. Les autres méthodes présentent des valeurs inférieures (tableau 4) variant de 80 à 85 % de PG avec des images THRS, et de 73 à 81 % avec Spot. Les valeurs de l'indice de Kappa sont, pour la SOM, meilleures avec des données Spot (0,83) qu'avec des données Quickbird (0,72 à 0,76). Pour les autres méthodes, l'indice de Kappa ne dépasse jamais 0,7 quel que soit le type d'images utilisées. Toutefois, la prise en compte de ce type d'indicateur ne suffit pas à elle seule pour rendre compte de la qualité des classifications. Il est nécessaire de regarder le taux de zones humides correctement

détectées, sous-détectées et sur-détectées. Les traitements appliqués aux images non masquées montrent des résultats similaires pour les classifications orientées pixel et les classifications orientée objet (figure 8a). Les classifications, au travers de la méthode neuronale SOM, détectent 3,86 ha (53 %) de zones humides à partir des données Spot et 3,90 ha (54 %) à partir de données Quickbird, contre respectivement 3,47 ha (48 %) et 3,74 ha (52 %) pour la méthode de classification orientée objet.

Au regard des surfaces de zones humides sur-détectées, une distinction peut être faite entre ces traitements (figure 8b). En utilisant des données discriminantes pour l'identification des différents types de zones humides, une classification orientée objet focalise ses traitements sur la détection d'objets répondant aux critères prédéfinis, contrairement à une classification orientée pixel qui vérifie si chacun des pixels est similaire aux signatures spectrales des échantillons d'entraînement. Ainsi, avec seulement 122 ha de zones sur-détectées sur la zone d'étude en moyenne (126 ha pour Quickbird et 118 ha pour Spot) contre 545 ha pour des classifications orientées pixel (542 ha pour Quickbird et 547 ha pour Spot), les classifications orientées objet offrent les résultats les plus intéressants. Ils limitent les analyses ultérieures (validations sur le terrain, inventaires exhaustifs, etc.) sur des zones plus réduites et présentant de plus fortes chances d'accueillir des milieux humides.

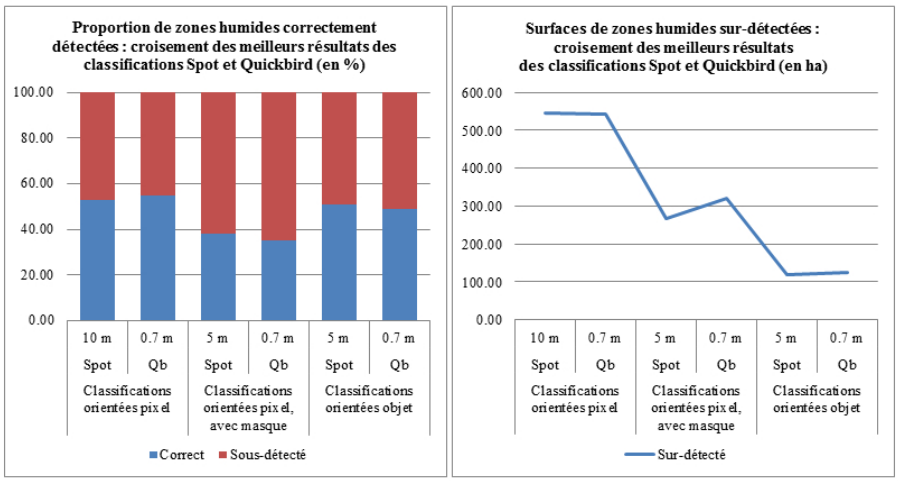


Figure 8. Comparaison des méthodes de classification neuronale (SOM) et orientée objet :a) part de zones humides correctement détectées, b) superficies de zones humides sur-détectées

4.2. La THRS pour compenser la richesse spectrale ?

L'analyse des superficies de zones humides correctement détectées montre des résultats similaires entre les images Quickbird et Spot (tableau 5). Concernant la classification SOM, l'image Quickbird détecte en moyenne 54 % de zones humides contre 53 % à partir d'une image Spot (10 m), soit une différence de seulement 400 m². Si cela peut paraître faible, rappelons que la taille moyenne des tourbières varie entre 200 et 350 m². Avec la méthode orientée objet, la détection des zones humides est proche entre les images Spot (52 %) et Quickbird (48 %) avec une différence d'environ 2700 m². Une analyse des types de zones humides correctement identifiées montre des niveaux de détection différents selon les capteurs et la méthode de classification. Les prairies inondables sont mieux identifiées avec Spot (52 % - méthode objet) qu'avec Quickbird (23 % - méthode objet). Au contraire, les prairies et landes humides sont plus précisément reconnues avec des images Quickbird (83% - méthodes pixel) qu'avec Spot (67 % - méthode pixel). Enfin, la caractérisation des tourbières est meilleure avec des images Quickbird (49 % - méthode objet) qu'avec des images Spot (40 % - méthode objet).

Tableau 5. Proportion moyenne des types de zones humides détectées selon le type de méthode de classification ("Pixels" vs. *"Objets") et le type d'images HRS/THRS*

Type de zone humide		Tourbières		Prairies et landes humides		Prairies inondables		Superficie totale	
Capteurs		Spot	QB	Spot	QB	Spot	QB	Spot	QB
Zones humides correctement détectées (%)	Pixels	34	13	67	83	30	5	53	54
								Moyenne : 53,5	
	Objets	40	49	56	55	52	23	52	48
								Moyenne : 50	

Plusieurs éléments peuvent expliquer ces variations. Les prairies inondables, majoritairement situées en bordure de cours d'eau et de zones lacustres sont caractérisées par une très forte teneur en eau. Spot-5 permettrait une meilleure détection de ces milieux grâce au canal du MIR. Les tourbières présentent elles aussi une forte teneur en eau. Cependant, leur taux d'humidité est dépendant du type et de l'état de la végétation présente, et/ou de son état de comblement. Des stades d'évolution différenciés peuvent expliquer la détection variable de ces écosystèmes. Enfin, les landes et prairies humides présentent *a priori* un degré d'humidité moindre car recouverts d'eau de manière épisodique. La présence d'un canal MIR est ici moins déterminante et permet à des images THRS de les détecter plus efficacement, malgré son acquisition en août et de plus en 2003, année de grande sécheresse. La qualité de la détection à partir de l'image Quickbird serait ainsi dépendante du degré d'humidité des milieux. Toutefois, les résultats obtenus

témoignent que la THRS compense l'absence du canal du MIR fourni par les données HRS.

5. Discussion

5.1. Apports de l'approche méthodologique pour la cartographie des zones humides

Les résultats de cette étude montrent que la THRS compense une moindre richesse spectrale pour la caractérisation des petites zones humides de montagne avec un taux de détection moyen supérieur à 50 %. Toutefois, il est important de noter que l'image Quickbird est acquise en août 2003, période de forte sécheresse. Si les résultats issus de ces données THRS permettent de détecter une superficie de zones humides équivalente à 50 % des zones humides inventoriées en 2010, on peut émettre l'hypothèse que les résultats auraient été meilleurs à partir d'une image Quickbird de 2010.

De plus, les résultats issus des classifications se bornent très souvent aux taux de détection des zones d'intérêt (Kappa, Précision Globale), sans tenir compte de la sur-détection. Il semble capital, dans le cas des zones humides, d'en tenir compte pour l'évaluation, étant donné que cela permet de réduire les zones potentielles à prospecter, soit par des relevés de terrain, soit par photo-interprétation, engendrant une réduction des coûts et du temps nécessaires à leur inventaire.

5.2. De la détection de l'humidité ?

Les traitements issus des classifications utilisant des masques d'humidité présentent des résultats antagonistes. L'utilisation d'un masque d'humidité pose des problèmes de sous-détection (figure 8) : bien que réduisant presque de moitié la quantité de zones humides sur-détectées, il diminue également la qualité des traitements en omettant la moitié d'entre elles. Les images masquées affichent des résultats en moyenne deux fois inférieurs à des classifications à partir d'images « brutes ». Trois hypothèses explicatives possibles : 1) un seuillage trop restrictif à partir des indices d'humidité, masquant un certain nombre de zones humides peut expliquer ces résultats ; 2) les masques d'humidité, dérivés des données Spot et Quickbird (NDWI et NDWI2), tendent à détecter l'humidité de la végétation plutôt que l'humidité des sols ; 3) les données Quickbird, acquises durant la sécheresse de 2003, ne permettent pas de bien rendre compte de leur aptitude à détecter l'humidité des sols du fait, potentiellement, de faibles teneurs en eau cette année-là. Dans tous les cas, l'utilisation d'un masque d'humidité ne semble pas être une technique de traitement satisfaisante à partir d'images HRS/THRS car la diminution de la sur-détection induite par l'utilisation d'un masque d'humidité n'engendre pas d'amélioration de la détection des petites zones humides de montagne.

5.3. Apports de la très haute répétitivité temporelle pour la cartographie des zones humides

Avec l'acquisition possible d'une image sur la même zone tous les 3 à 5 jours, la très haute répétitivité temporelle des images THRS (Pléiades ou encore Venμs) présente un potentiel non négligeable pour la détection des zones humides. Du fait de la variabilité des phénomènes hydriques (climatiques, hydrologiques, etc.), de la durée ou la fréquence des phénomènes de submersion (Bailly *et al.*, 2003 ; Buckwell *et al.*, 1999), le suivi de l'évolution phénologique (profils temporels) de la végétation de ces milieux doit favoriser leur détection. En effet, la végétation propre aux zones humides de montagnes connaît généralement un retard de développement du fait des conditions bioclimatiques du milieu. De plus, en fin de période estivale, la végétation chlorophyllienne de ces milieux est moins sensible à un déficit hydrique. La THRS du canal proche infrarouge doit pouvoir contribuer à leur caractérisation. Ainsi, l'acquisition rapprochée d'images aux cours des périodes de croissance et de sénescence, époques les plus représentatives des décalages entre espèces, devrait améliorer de façon substantielle les résultats. Cela requiert au préalable d'acquérir des connaissances relatives au développement spécifique de chaque type de végétation/formation végétale.

6. Conclusion

La méthode de classification orientée objet (par croissance de région) élaborée offre les meilleurs résultats pour la délimitation et la caractérisation des zones humides de montagne. En effet, si le taux de détection est similaire à une classification orientée pixel de type neuronal (*Kohonen Self Organizing Feature Map*), elle permet de réduire de près de 80 % le taux de sur-détection. De par son aspect homogène et non pixellisé, la classification orientée objet est, de plus, nettement plus facile à exporter en format vectoriel. Si la reproductibilité est loin d'être simple, le processus de classification reste toutefois simplifié et applicable à d'autres zones géographiques et/ou à des dates différentes. Les résultats témoignent également d'une certaine inefficacité des masques d'humidité NDWI et NDWI2 utilisés initialement pour améliorer la qualité des classifications. L'hypothèse soulevée est que ces indices tendent, en période estivale, à détecter le niveau d'humidité de la végétation et non celle des sols. Les images HRS/THRS qui sont masquées avant classification affichent ainsi des résultats en moyenne deux fois inférieurs à des images non masquées, entraînant un manque de fiabilité de ces indicateurs pour cette étude.

L'analyse comparative des proportions de zones humides correctement classées montre une détection similaire des différents milieux pour chacun des capteurs. Avec 3,8 ha (52,4 %) de zones humides détectées en moyenne par Spot contre 3,7 ha (51 %) par Quickbird, la THRS compense l'absence du canal du moyen infrarouge de Spot. Les résultats concernant la caractérisation des types de zones humides avec

les données THRS montrent que celle-ci s'améliore avec la baisse du degré d'humidité propre à chacun de ces milieux, toutes méthodes confondues.

Enfin, si ces résultats semblent mitigés, notamment en raison de la date d'acquisition des seules données THRS disponibles (forte sécheresse en août 2003), ils montrent que ce type de données témoignent d'un fort potentiel pour la détection et la caractérisation des zones humides de montagnes, équivalent aux capacités de Spot-5 (10 m) en année normale. La très haute répétitivité temporelle des données Pléiades ou Venμs devrait renforcer d'autant plus cette aptitude.

Remerciements

Ce travail est financé par le projet Orféo-Pléiades CNES (GT3 : « Cartographie et Aménagement »), par le CETE-SO (acquisition des données Quickbird) et a bénéficié du soutien du projet OPA-OHM Vicdessos (relevés de terrain).

Bibliographie

Bailly J.-S., Puech C., Massé J. (2003). Application de l'imagerie à très haute résolution spatiale pour le suivi de l'hydromorphie du marais atlantique de Bourgneuf. *Photo-interprétation*, vol. 39, n° 1, p. 22-30 et p. 57-59.

Baret F., Guyot G., Major D.-J. (1989). TSAVI: a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. *Proceedings of the 12th Canadian symposium on remote sensing*, IGARSS'89, Vancouver (Canada), 10-14 juillet, vol. 3, p. 1355-1358.

Barnaud G., Fustec É. (2007). *Conserver les zones humides : pourquoi ? Comment ?*, Quae/Educagri, Paris.

Benito C., Bonnefoi S. (juillet 2010). *Les zones humides de Bassiès*. Rapport de stage de l'Ecole d'architecture et des paysages, Bordeaux.

Benz U.-C., Hofmann P., Lingenfelder I., Heynen M. (2003). Multi-resolution, objet-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 58, p. 239-258.

Brinson M. (1993). *A hydrogeomorphic classification for wetlands*. Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-4, US Army Corps of Engineers.

Buckwell P., Sandoz A., Chauvelon P., Prosper-Laget V. (1999). Étude et suivi d'un milieu aquatique temporaire endoréique méditerranéen : les Cerisières (Tour du Valat, Camargue). *Dynamiques naturelles et gestion des espaces littoraux*, Méditerranée, 4, p. 19-28.

Chiu W.-Y., Couloigner I. (2004). Evaluation of incorporating texture into wetland mapping from multispectral images. *EARSeL eProceedings*, p. 363-371.

Clément B., Hubert-Moy L., Rapinel S. (2008). *Évaluation des fonctions des zones humides à partir de données de télédétection à très haute résolution spatiale : application expérimentale à la Basse Vallée de la Dordogne*. Rapport d'étude.

Crist E.-P., Cicone R.-C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data – The TM Tasseled Cap. *Proceedings of the 1984 IEEE Transactions on Geosciences and*

Remote Sensing, vol. GE-22, n° 3, p. 256-263.

Gao B.-C. (1996). NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, vol. 58, p. 257-266.

Girard M.-C. et Girard C.-M. (1999). *Traitement des données de télédétection*, Dunod, Paris.

Houet T., Hubert-Moy L., Mercier G. (2004). *Modélisation du changement d'échelles en télédétection par une méthode neuronale : application à l'étude de l'évolution de l'occupation hivernale des sols en Bretagne*, http://cybergeo.revues.org/3617#texte

Hubert-Moy L. (2005). La télédétection : des outils multiples pour mieux connaître les zones humides. *Caractérisation des zones humides, Cahier Thématique du PNRZH, MEDD, Agences de l'eau, BRGM*, p. 54-62.

Hubert-Moy L., Michel K., Corpetti T. et Clément B. (2006). Object-oriented mapping and analysis of wetlands using Spot-5 data, *Proceedings of the 2006 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IGARSS'06, p. 3447-3450.

Hubert-Moy L., Houet T. et Lefeuvre E. (2003). Étude de zones humides à partir d'images hyperspectrales CASI : application aux fonds de vallées du massif Armoricain. *Photo-interprétation*, vol. 39, n° 1, p. 33-40, p. 60-61.

Hubert-Moy L., Cotonnec A., Le Du L., Chardin A., Perez P. (2001). A comparison of classification procedures of remotely sensed data applied on different landscape units, *Remote Sensing of Environment*, vol. 75, n° 2, p. 174-187.

Kruse F.-A., Lefkoff B., Boardman J.-B., Shapiro A.-T., Barloon P.-J., Goetz A.-F.-H. (1993). The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive Visualization and Analysis of Imaging spectrometer Data. *Remote Sensing of the Environment*, vol. 44, p. 145-163.

Lacoste A., Salanon R. (2006). *Éléments de biogéographie et d'écologie*, Armand Colin, Paris.

Lennon M., Mercier G., Hubert-Moy L. (2002). Classification of hyperspectral images with nonlinear filtering and support vector machine. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 24-28 juin 2002, Brest (France), vol. 3, p. 1670-1672.

McFeeters S.-K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 17, n° 7, p. 1425-1432.

Meinel G., Neubert M. (2004). A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data, *Proceedings of the IRSPS 2004 Annual Conference*, Istanbul (Turquie), p. 19-23.

Mérot P., Gascuel C. et Durand P. (2005). Typologie fonctionnelle : application aux petites zones humides de fond de vallée. *Caractérisation des zones humides, Cahier Thématique du PNRZH, MEDD, Agences de l'eau, BRGM*, p. 32-36.

Mérot P., Squividant H., Aurousseau P., Hefting M., Burt T., Maitre V., Kruk M., Butturini A., Thenail C., Viaud D. (2002). Testing a climato-topographic index for predicting wetland distribution along an European climate gradient. *Ecological Modelling*, vol. 163, p. 51-71.

Mignot J.-F. (2005). *L'inventaire des zones humides dans les SAGE*, http://www.eau-loire-bretagne.fr/collectivites/guides_et_etudes/planification

Muller S. (1996). Exposé introductif au colloque Biodiversité et gestion des écosystèmes

prairiaux : déterminisme et évolution de la biodiversité des écosystèmes prairiaux. *Ecosystèmes prairiaux, Acta Botanica Gallica*, vol. 143, p. 233-239.

Nabucet J. (2005). *Évaluation des données de télédétection à très haute résolution Quickbird pour l'estimation du taux de couverture hivernale des sols.* Mémoire de Master 2 Géographie Aménagement Société Environnement, Université Rennes.

Oruc M., Marangoz A.-M., Buyuksalih G. (2004). Comparison of pixel-based and object-oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands, *Proceedings of the IRSPS 2004 Annual Conference*, Istanbul (Turquie), p. 19-23.

OTB Monteverdi. (2010). *Orfeo Toolbox Classes*, http: // orfeo-toolbox. org/doxygen/classotb_1_1Simple Rcs PanSharpening FusionImageFilter.html#_details

Pontius R.-G. (2000). Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 66, n° 8, p. 1011-1016.

Puissant A. (2003). *Information géographique et images à très haute résolution : utilité et applications en milieu urbain*. Thèse de géographie, université Louis Pasteur de Strasbourg I.

Ramsar (2005). *Cadre intégré pour l'inventaire, l'évaluation et la surveillance continue des zones humides*, http://www.ramsar.org/pdf/key_guide_framework_inventory_f.pdf

Richardson A.-J., Wiegand C.-L. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, n° 43, p. 1541-1552.

Santurri L., Carlà R., Fiorucci F., Aiazzi B., Baronti S., Cardinali M., Mondini A. (2010). Assessment of very high resolution satellite data fusion techniques for landslide recognition, *ISPR S T C VII Symposium*, vol. 38, Part 7B, p. 492-497.

SSC/UICN. (2004). *Background : current knowledge of the status of freshwater biodiversity*, http://www.iucn.org/about/work/programmes/species/our_work/about_freshwater/

STRA-CO. (2003). Compte rendu de la 7ème réunion du Conseil pour la stratégie paneuropéenne de la diversité biologique et paysagère, 30-31 janvier, Genève.

Thomas C. (2006). *Fusion d'images de résolutions spatiales différentes*. Thèse de Doctorat de l'École des Mines de Paris.

Vannier C. (2006). *Télédétection et pratiques agricoles – Le cas particulier de l'identification des bordures de champs boisés à partir d'une méthode orientée objet*. Mémoire de Master 2 Géographie Aménagement Société Environnement, Université Rennes 2.

Vannier C., Hubert-Moy L. (2008). Detection of wooded hedgerows in high resolution satellite images using an object-oriented method, *Proceedings of the 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IGARSS'08, July 2008, Boston (USA), vol. IV, p. 731-734.

Vannier C., Hubert-Moy L. (2010). Wooded hedgerows characterization in rural landscape using very high spatial resolution satellite images, *Proceedings of the 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IGARSS'10, 25-30 July 010, Honolulu (USA), p. 347-350.

Wu T.-F., Lin J.-C., Weng R.-C. (2004). Probability estimates for multi-class classification by pairwise coupling. *Journal of Machine Learning Research*, vol. 5, p. 975-1005.