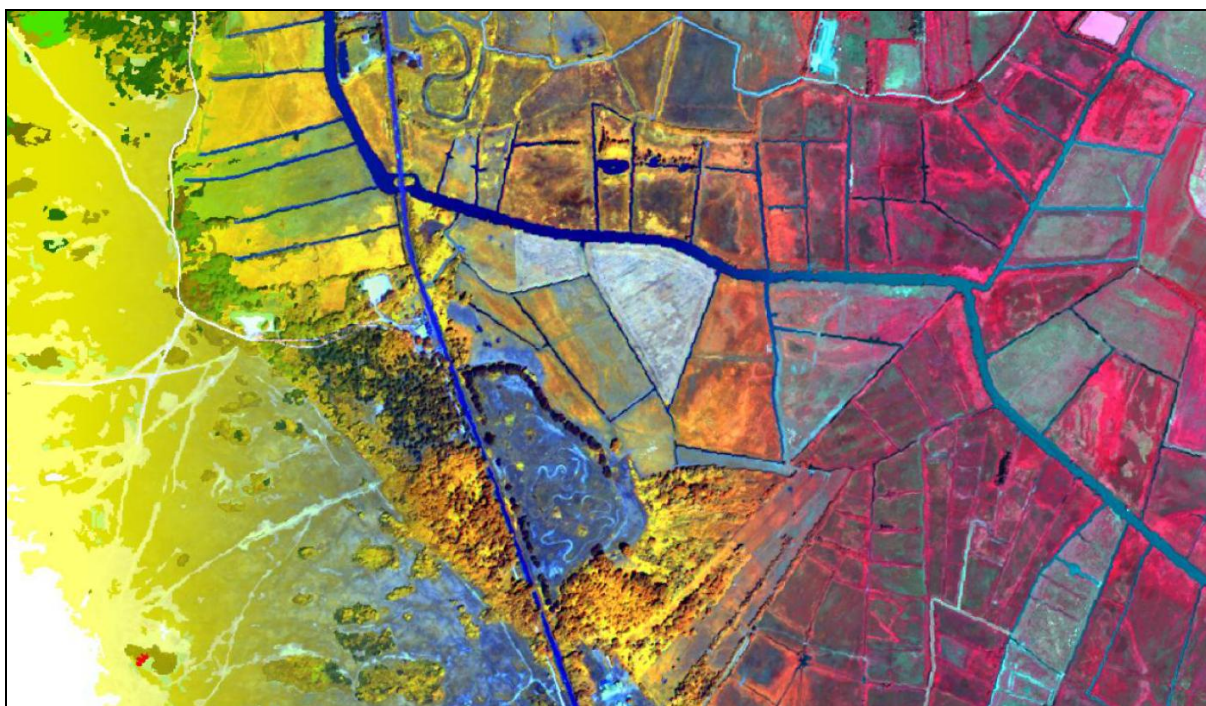


Cartographie automatique des végétations du site de Sauzaie Jaunay (Vendée) à partir d'une image à très haute résolution Worldview-2

Annexe 11 au rapport « Cartographie des grands types de végétation par télédétection : étude de faisabilité (Bretagne, Basse-Normandie et Pays-de-la Loire) »

Rapport d'étude – Octobre 2012



Réalisation :

Sébastien Rapinel¹⁻², Laurence Hubert-Moy²

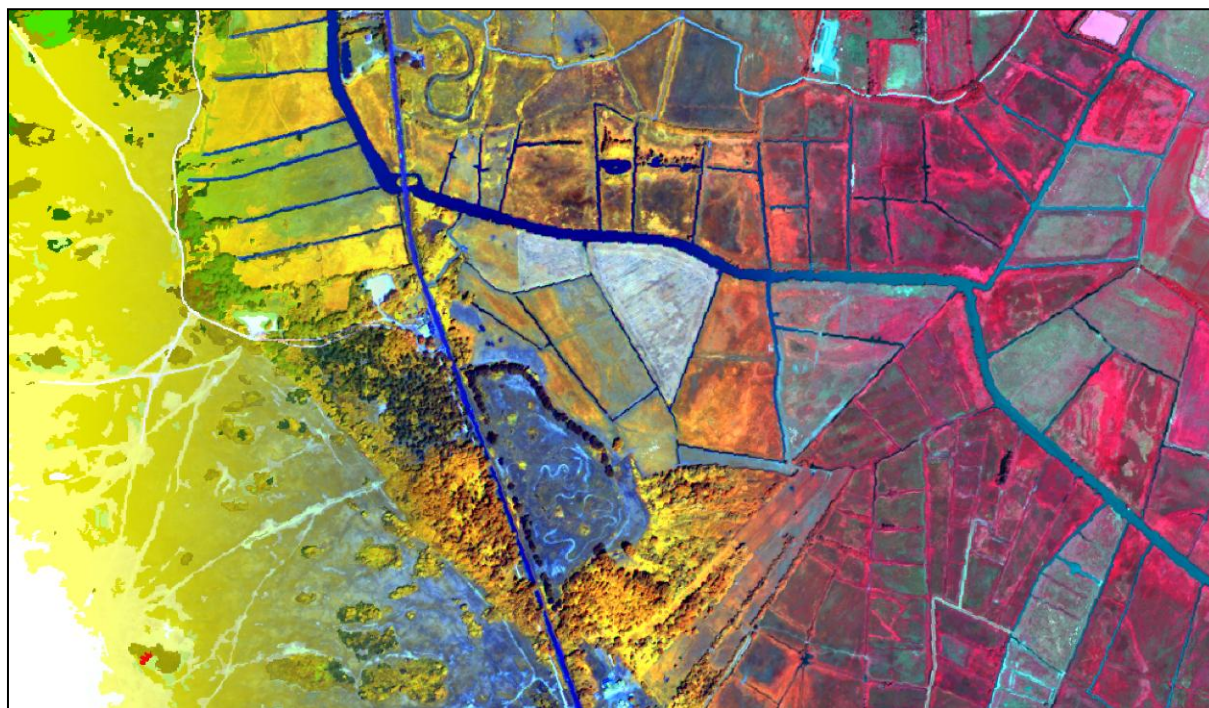
Correspondants CBN de Brest :

Vanessa Sellin¹, Sylvie Magnanon¹

¹ Conservatoire Botanique National de Brest

² LETG Rennes COSTEL UMR CNRS 6554

Cartographie automatique des végétations du site de Sauzaie Jaunay (Vendée) à partir d'une d'image à très haute résolution Worldview-2



RAPPORT D'ÉTUDE - OCTOBRE 2012

AUTEURS : S. RAPINEL¹⁻², L. HUBERT-MOY²

CORRESPONDANTS CBN-BREST : V. SELLIN¹, S. MAGNAGNON¹

¹ CONSERVATOIRE BOTANIQUE NATIONAL DE BREST

² LETG RENNES COSTEL UMR CNRS 6554



SOMMAIRE

Sommaire	2
Introduction.....	3
1. Méthodologie.....	3
1.1. Site d'étude	3
1.2. Données.....	4
1.2.1. Image Worldview-2	4
1.2.2. Données auxiliaires.....	5
1.3. Prétraitements de l'image	7
1.3.1. Fusion de l'image Worldview-2	7
1.3.2. Corrections atmosphériques.....	8
1.3.3. Corrections géométriques.....	8
1.3.4. Élaboration d'une image de texture	8
1.4. Élaboration d'un masque des zones à dominante humide.....	9
1.5. Extraction de l'occupation du sol par approche automatique	10
1.5.1. Typologie	11
1.5.2. Classification supervisée pixel.....	13
1.5.3. Classification orientée-objet.....	14
1.5.4. Nettoyage	17
1.6. Validation.....	18
2. Résultats.....	20
2.1. Niveau 1	20
2.2. Niveau 2.....	22
2.3. Niveau 3.....	25
3. Discussion	29
3.1. Potentialités, limites et perspectives de la démarche	29
3.2. Rapport coût/efficacité de la démarche.....	31
Conclusion	33
Bibliographie.....	34
Liste des figures.....	36
Liste des tableaux.....	37

INTRODUCTION

Le Conservatoire Botanique National (CBN) de Brest a entrepris une démarche de cartographie des végétations naturelles et semi-naturelles au 1 :25 000ème sur l'ensemble du Grand-Ouest de la France. Cette cartographie a pour objectifs de fournir un inventaire exhaustif et spatialisé de l'état de la ressource et d'identifier des secteurs prioritaires pour mener des actions spécifiques d'aménagement et de sauvegarde. Depuis plusieurs années, le CBN de Brest intègre des relevés de végétation ponctuels effectués lors de campagnes terrain dans une base de données. Si ces relevés permettent d'identifier et de caractériser avec précision les végétations naturelles, ils ne couvrent que des sites de quelques hectares. Les données de télédétection apparaissent donc comme une source d'information intéressante pour réaliser une carte des végétations naturelles et semi-naturelles sur des secteurs géographiques plus étendus. Un certain nombre d'études scientifiques soulignent l'intérêt des données de télédétection caractérisées par une Très Haute Résolution Spatiale (THRS), inférieure à 5 mètres, pour la cartographie automatique de la végétation (Laba et al., 2008; Andresen et al., 2007; Dogan et al., 2009, Harris and Bryant, 2009; Gilmore et al., 2008). Cependant, ces études portent le plus souvent sur des sites de quelques hectares seulement, et la reproductibilité des méthodes présentées sur des sites plus étendus ou *a fortiori* sur des sites aux caractéristiques paysagères différentes reste à évaluer.

Dans ce contexte, le CBN de Brest a souhaité identifier les potentialités de données issues de différents capteurs de télédétection à THRS pour cartographier des végétations naturelles sur quelques sites-test en développant une approche qui soit robuste et opérationnelle sur l'ensemble du Grand-Ouest de la France. Pour cela, le CBN de Brest a entrepris d'évaluer des images satellitaires SPOT-5 et Worldview-2 et des photographies aériennes en infrarouge couleur (BD ORTHO, IGN ®) sur trois sites d'une dizaine de km² localisés dans les départements de la Manche, du Finistère et de la Vendée. L'évaluation des images SPOT-5 et de l'orthophotoplan infrarouge ayant déjà été effectuée (Sellin et al., 2013), cette étude est focalisée sur l'évaluation d'une image Worldview-2 pour la cartographie automatique des végétations naturelles sur un des sites test, en l'occurrence celui de Sauzaie-Jaunay en Vendée.

La première partie de ce rapport présente le site d'étude, les données utilisées et la démarche développée pour cartographier automatiquement la végétation avec différents niveaux de précision thématiques. Les résultats sont détaillés dans une seconde partie. La dernière partie discute de l'intérêt et des limites de la démarche.

1. MÉTHODOLOGIE

1.1. Site d'étude

Le site d'étude couvre une zone de 48 km² située au sud de Saint-Gilles-Croix-de-Vie en Vendée (**Figure 1**). Il s'agit d'une zone littorale comprenant une grande diversité de milieux et d'usages. Il inclut des secteurs urbanisés, des espaces agricoles intensifs (grandes cultures de tournesols et maïs) mais aussi extensifs ou en déprise, des bas-marais et un secteur dunaire. Une partie du site d'étude, qui comprend les marais du Jaunay et les dunes de la Sauzaie, est classée en zone NATURA 2000 pour sa flore remarquable.

1.2. Données

Dans le cadre de ce travail, la donnée principale utilisée est une image Worldview-2. Nous avons aussi exploité des couches thématiques complémentaires.

1.2.1. Image Worldview-2

Le capteur Worldview-2 présente une très bonne résolution spatiale, avec des pixels ayant une taille de 2m X 2m pour les bandes multispectrales, et 0,5m X 0,5m pour la bande panchromatique. Il présente aussi une résolution spectrale élevée (il s'agit d'un capteur super-spectral), avec 8 bandes multispectrales : en plus des bandes du bleu (450-510 nm), du vert (510-580 nm), du rouge (630-690 nm) et du proche-infrarouge (770-895 nm), le capteur Worldview-2 possède 4 bandes spectrales absentes des capteurs multispectraux tels SPOT 5 ou Quickbird: le bleu côtier (400-450 nm), dédiée à l'étude de la bathymétrie, le jaune (585-625 nm), destiné à caractériser le jaunissement de la végétation, le red-edge (705-745nm), centré sur le début de la portion de haute réflectivité de la végétation, et une seconde bande dans le proche infrarouge (860-1040 nm) qui est moins sensible que la première aux effets atmosphériques. Ces caractéristiques spatiales et spectrales en font un outil potentiellement intéressant pour caractériser finement la végétation.

L'image Worldview-2 que nous avons utilisée a été acquise le 25 mai 2011 à 11h33 GMT avec un angle de visée au NADIR de 14,8 ° en mode multispectrale (soit 8 bandes à 2,0 mètres de résolution horizontale) et panchromatique (soit une bande à 0,5 mètre de résolution horizontale). Les images Worldview-2 sont livrées en luminance exo-atmosphérique relative, avec des valeurs de pixels exprimées en 16 bits, c'est-à-dire s'échelonnant entre 0 et 65536. Les caractéristiques détaillées de l'image sont présentées dans le **Tableau 1**. La qualité de l'image est excellente, avec très peu d'ombres portées et aucun voile nuageux. La date d'acquisition de l'image est adaptée à l'étude de la végétation, car fin mai le développement de la végétation est optimal pour l'étude des habitats naturels. Cependant, au moment de l'acquisition, une partie des prairies venait d'être fauchée, ce qui rend leur caractérisation impossible.

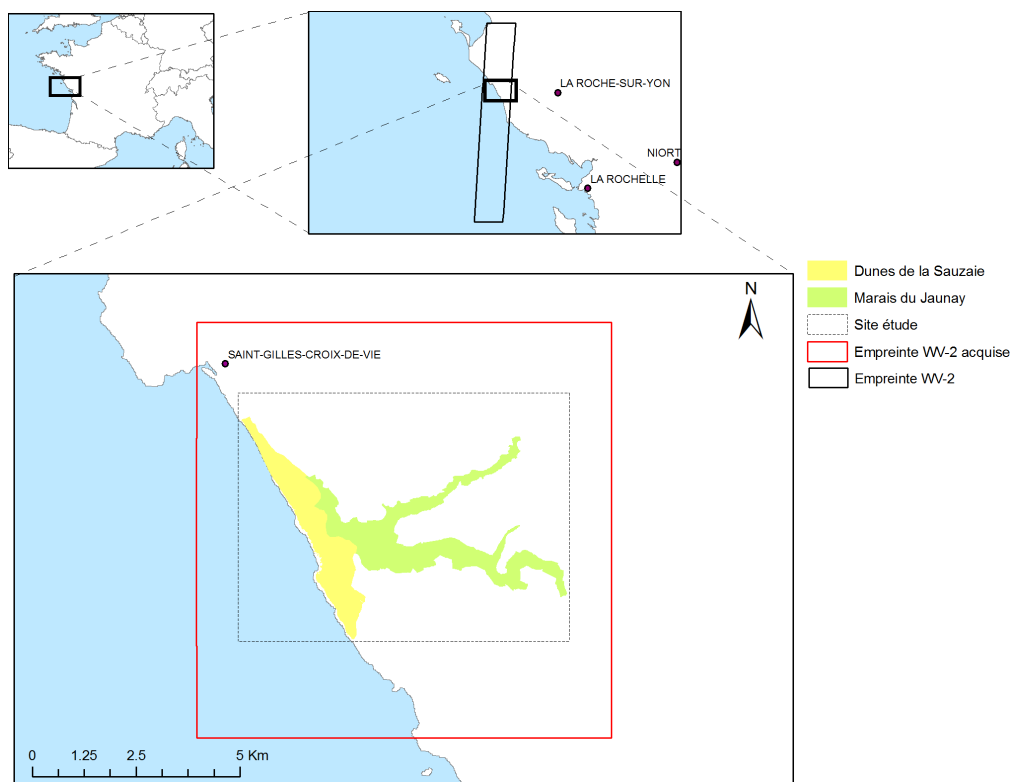


Figure 1 – Localisation du site de Sauzaie-Jaunay et emprise de l'image Worldview-2

L'emprise de la scène Worldview-2 représente une bande de 17 km de largeur sur 120 km de longueur, soit 2040 km² (**Figure 1**). Le Conservatoire Botanique National de Brest a acquis une partie de la scène centrée sur le site d'étude (100 km²) au prix de 2670 €, ce qui représente un coût d'acquisition de 26 €/km². Il s'agit d'une image d'archive. Dans le cas d'une image programmée, le coût d'acquisition serait d'environ 32€/km².

Tableau 1 – Caractéristiques de l'image Worldview-2

Date d'acquisition	Bande spectrale	(μm)	Résolution horizontale (m)	Profondeur spectrale (bits)
	Panchromatique	0,45-0,80	0,5	
25 mai 2011	1-Bleu côtier	0,40-0,45	2,0	16
	2-Bleu	0,45-0,51		
	3-Vert	0,51-0,58		
	4-Jaune	0,58-0,62		
	5-Rouge	0,63-0,69		
	6-Red-edge	0,70-0,74		
	7-Proche infrarouge 1	0,77-0,89		
	8-Proche infrarouge 2	0,86-1,04		

1.2.2. Données auxiliaires

Des données complémentaires à l'image Worldview-2 ont été utilisées pour réaliser la classification automatique de la végétation naturelle et semi-naturelle (**Tableau 2**). Ces données,

géo-référencées en Lambert-93, sont extraites de bases de données nationales qui offrent une couverture exhaustive du territoire français et peuvent être obtenues à faible coût, voire gratuitement, auprès de différents organismes (IGN, BRGM...).

La BD TOPO IGN ® est utilisée pour la prise en compte du réseau routier, des surfaces bâties, des boisements artificiels, des zones intertidales et de l'altitude. L'information relative aux boisements artificiels est considérée dans le cadre de cette étude, car elle est intégrée dans la couche VEGETATION-version 2 de la BD TOPO IGN ® disponible sur le département de la Vendée. L'échelle d'exploitation de la BD TOPO IGN ® est le 1/25 000ème, ce qui est cohérent avec la précision attendue dans cette étude. Toutefois, les dates de mise à jour de cette base de données ne sont pas précisées, ce qui peut entraîner des différences avec les images satellitaires.

La BD CARTHAGE contient les informations relatives aux surfaces en eau et au réseau hydrographique (cours d'eau et principaux canaux, temporaires ou permanents). Cette couche d'information est dérivée de la photo-interprétation de la BD ORTHO IGN ®, ce qui induit parfois des approximations sur la spatialisation du réseau hydrographique au sein des milieux boisés.

La BD Parcellaire IGN ® contient des informations sur les limites cadastrales. Cette couche d'information est disponible au format vectoriel sur la plupart du territoire national. Cependant, les limites cadastrales de certaines communes sont disponibles uniquement au format raster avec une résolution horizontale de 0,05 m. Dans ce cas, un prétraitement est nécessaire afin de les vectoriser. De plus, il arrive ponctuellement que les limites cadastrales ne coïncident pas avec les limites des parcelles d'occupation et d'utilisation des sols. Dans ce cas, une mise à jour par photo-interprétation ou par segmentation de la BD ORTHO peut s'avérer nécessaire. Par conséquent, le terme "parcelle" correspond dans cette étude ici à une unité homogène d'occupation du sol qui peut coïncider ou non avec une parcelle cadastrale.

La BD ORTHO IGN ® correspond à des photographies aériennes ortho-rectifiées à 0,5 m de résolution spatiale. Sa précision horizontale est estimée à 0,25 m, ce qui en fait une donnée de référence pour la réalisation de nombreuses couches d'informations (BD TOPO IGN ®, BD CARTHAGE). Cependant, la fréquence de mise à jour de cette donnée est de l'ordre de 5 ans, ce qui peut induire des décalages spatio-temporels lors de sa comparaison avec des données plus récentes.

La BD Scan-Géol du BRGM contient des informations relatives à la géologie. Elle permet de spatialiser les secteurs de sables dunaires ou encore d'alluvions sur lesquels peuvent se développer des formations végétales spécifiques (xérophiles ou hygrophiles). Cette couche d'information est livrée au format raster. Il est donc nécessaire de la vectoriser par photo-interprétation dans le cas d'une analyse SIG. Son échelle d'exploitation est le 1/50 000ème, ce qui peut entraîner des approximations spatiales dans le cadre d'études menées à des échelles plus fines.

La couche des milieux à composante humide a été réalisée par le Muséum d'Histoire Naturelle et l'IFEN en 2002. Elle correspond à une sélection des ZNIEFF, de sites d'intérêt communautaires et de polygones de la couche CORINE Land Cover. La couche des milieux à composante humide peut contribuer à la spatialisation des zones humides dans lesquelles on retrouve une végétation majoritairement hygrophile. Toutefois, son échelle du 1/100 000ème, grossière, conduit à une surestimation spatiale des milieux à composante humide. Une

combinaison de cette couche avec d'autres sources d'informations, telles qu'un MNT ou la BD CARTHAGE, doit être effectuée afin de délimiter plus finement les zones humides.

Tableau 2 – Caractéristiques des données auxiliaires spatialisées utilisées pour la cartographie de la végétation naturelle et semi-naturelle

Couche	Thématique(s)	Format	Échelle	Producteur
BD TOPO IGN ®	Routes, bâtis, boisements artificiels, Modèle Numérique de Terrain, zones intertidales	Vecteur	1/25 000ème	IGN
BD CARTHAGE	Surfaces en eau	Vecteur	1/25 000ème	SANDRE
BD Parcellaire IGN ®	Limites cadastrales	Vecteur Raster	1/5 000ème	IGN
BD ORTHO IGN ®	Occupation du sol, corrections géométriques	Raster	1/5 000ème	IGN
BD Scan-géol	Géologie	Raster	1/50 000ème	BRGM
Milieux à composante humide	Zones humides	Vecteur	1/100 000ème	MNHN

1.3. Prétraitements de l'image

L'image Worldview-2 livrée par la société Digitalglobe ® a déjà fait l'objet d'une orthorectification pour corriger les déformations liées au relief, et d'un géoréférencement en WGS-84. De plus, des corrections radiométriques ont été appliquées pour convertir les valeurs numériques valeurs de luminance exo-atmosphérique. Des prétraitements supplémentaires ont été effectués dans le cadre de cette étude pour améliorer la qualité de l'image.

1.3.1. Fusion de l'image Worldview-2

L'image Worldview-2 a été acquise simultanément en mode multi-spectral (8 bandes à 2,0 m de résolution) et panchromatique (1 bande à 0,5 m de résolution). La bande panchromatique a été fusionnée avec chacune des 8 bandes multi-spectrales afin de combiner la résolution spatiale de la bande panchromatique avec la résolution spectrale des bandes multi-spectrales (**Figure 2**). Pour cela, la méthode de fusion Gram-schmidt (Laben et Brower, 2000) a été appliquée avec un ré-échantillonnage au plus proche voisin. Les 8 bandes résultantes ont une résolution spatiale de 0,5 m, ce qui permet de disposer d'une image ayant une excellente précision géométrique. Toutefois, comme les valeurs spectrales sont artificiellement restituées à 0,5m de résolution spatiale, cela peut affecter la séparabilité spectrale entre les différentes formations végétales quand elle est appréhendée avec les données ayant une résolution de 0,5m.

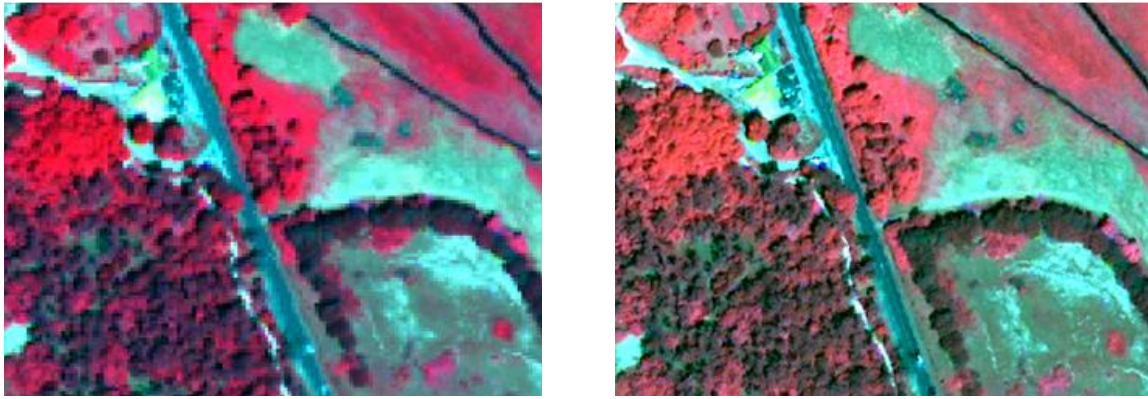


Figure 2 – Composition colorée (rouge = bande 7, vert = bande 5, bleu = bande 3) de l’image Worldview-2 avec les bandes multispectrales d’origine (pixels de 2m X 2m à gauche) et fusionnées (pixels de 0,5m X 0.5m à droite)

1.3.2. Corrections atmosphériques

Les images Worldview-2 sont livrées en valeurs de luminance exo-atmosphérique relative. Il est nécessaire de les corriger radiométriquement et atmosphériquement afin d’obtenir des valeurs de réflectance au sol et de pouvoir ainsi effectuer des comparaisons temporelles.

Les corrections radiométriques et atmosphériques ont été effectuées à l’aide du logiciel ENVI. Le module de corrections atmosphériques utilisé (FLAASH) repose sur le modèle MODTRANS (Berk *et al.*, 1999)..

1.3.3. Corrections géométriques

En plus des prétraitements géométriques effectués par Digitalglobe ®, des corrections géométriques supplémentaires ont été réalisées pour d’une part changer le système de projection de l’image et d’autre part améliorer sa précision horizontale.

L’image Worldview-2 livrée en WGS-84 a été convertie en système de projection RGF Lambert-93 qui est le référentiel français utilisé pour la plupart des données géographiques présentes dans les bases de données nationales. Des corrections géométriques supplémentaires ont été apportées à l’image Worldview-2 avec une donnée de référence plus précise, la BD ORTHO de l’IGN ® (précision horizontale de 0,25 m.). Une sélection de 18 points de calage, répartis de façon homogène sur l’ensemble de l’image a été effectuée sur des éléments fixes du paysage (lignes de marquage au sol, croisement de routes...). Une transformation géométrique de 1^{er} ordre a été appliquée. L’erreur quadratique moyenne obtenue sur l’image rectifiée est inférieure à 1 pixel, soit 0,5 m.

1.3.4. Élaboration d’une image de texture

En complément de l’information spectrale, la texture apporte des informations complémentaires qui peuvent améliorer la qualité des classifications des images de télédétection.

Dans le cadre de cette étude, deux images de dissimilarité ont été dérivées respectivement de la bande panchromatique et de la bande 7 (infrarouge) avec une matrice de co-occurrence de taille 3x3 (**Figure 3**).



Figure 3 – Extrait de l'image de dissimilarité obtenue à partir de la bande 7 (0,77-0,89 μm). *Les éléments du paysage d'aspect lisse, tels que les surfaces en eau ou les sols nus, sont caractérisés par une faible dissimilarité (teintes noires) alors que les éléments du paysage d'aspect rugueux, tels que les arbres ou les surfaces bâties, sont caractérisés par une forte dissimilarité (teintes blanches).*

1.4. Élaboration d'un masque des zones à dominante humide

Une cartographie des limites des Zones à Dominante Humide (ZDH) du site de Sauzaie-Jaunay a été effectuée en s'inspirant d'une méthode déjà mise en œuvre pour l'Agence de l'Eau Seine-Normandie (I-MAGE CONSULT, 2006b) et EPIDOR (I-MAGE CONSULT, 2006a). Cette méthode permet de cartographier, l'ensemble des enveloppes de zones humides (zones où la probabilité de présence d'une zone humide est très élevée). Ainsi, au-delà des zones humides à fort intérêt patrimonial, elle permet de cartographier la quasi-totalité des zones humides, incluant ainsi les zones humides parfois qualifiées d'ordinaires.

Le travail consiste dans un premier temps à réaliser un masque discriminant les zones humides potentielles et les zones présumées non humides à l'aide d'un indice topographique dérivé d'un MNT. Les limites des zones présumées humides sont ensuite affinées à partir de la photo-interprétation d'orthophotoplans, d'images satellitaires, de fonds topographiques et de cartes géologiques. Cette étape s'appuie sur des clés d'interprétation établies à partir de l'analyse de relevés effectués sur le terrain. La méthode utilisée combine donc traitements analogiques (PIAO : photo-interprétation assistée par ordinateur), traitements numériques (image satellitaires, données altimétriques (MNT), données thématiques...), et l'exploitation de relevés de terrain (clés d'interprétation et de validation des orthophotoplans et des images). L'échelle de cartographie du masque est le 1/50 000ème.

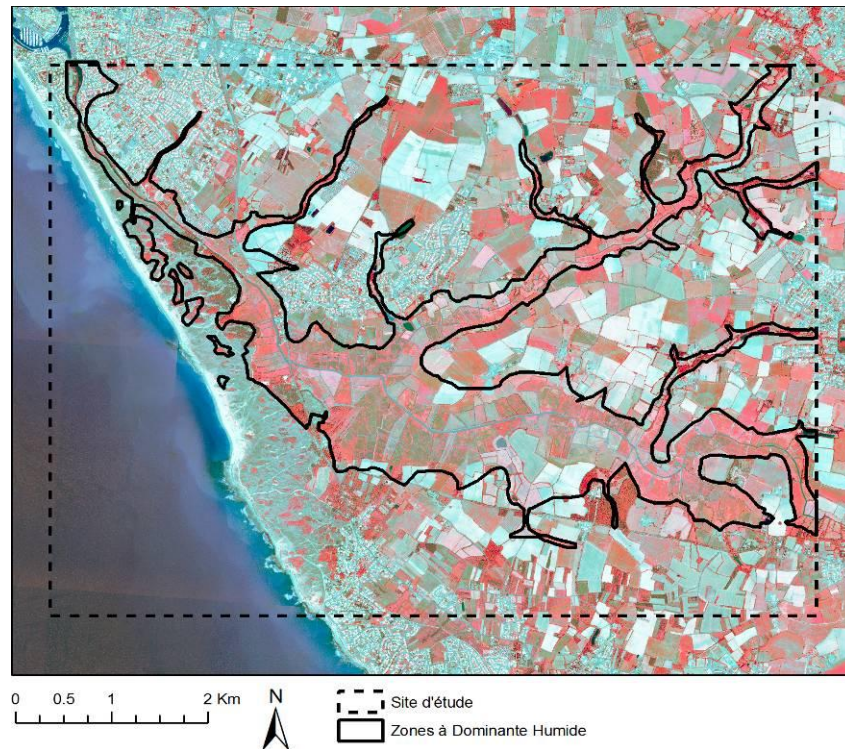


Figure 4 – Localisation des zones à dominante humide sur le site de Sauzaie-Jaunay

1.5. Extraction de l'occupation du sol par approche automatique

La cartographie de la végétation naturelle et semi-naturelle a été effectuée sur la totalité des 48 km² du site d'étude sans occulter les surfaces agricoles comparativement avec les 8 bandes multispectrales puis avec les 8 bandes fusionnées afin de déterminer l'intérêt de la fusion pour la classification des images Worldview-2.

L'approche développée ici repose sur un traitement automatique combinant une classification supervisée de type « pixel » à une classification de type orientée-objet (Figure 5). Dans un premier temps, une classification supervisée basée sur le pixel a été appliquée sur l'image afin d'exploiter au mieux l'information spectrale contenue dans les 8 bandes. Dans un second temps, la classification a été intégrée et améliorée dans une démarche dite « orientée-objet », avec une prise en compte de l'information contextuelle, de forme et de texture.

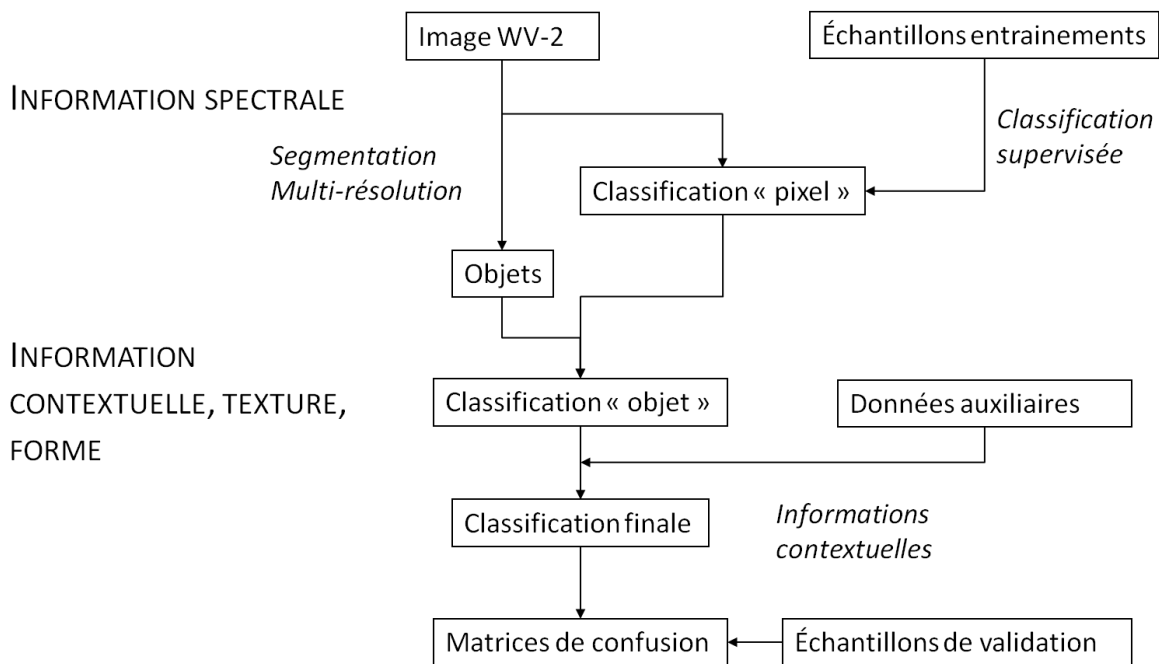


Figure 5 - Approche de classification mise en œuvre pour la cartographie de la végétation naturelle et semi-naturelle à partir de l'image Worldview-2

1.5.1. Typologie

La cartographie a été effectuée selon une typologie dérivée de la typologie des végétations établie par le CBN de Brest qui comporte huit niveaux hiérarchiques emboîtés. Certaines classes de la typologie du CBN ont été regroupées, car si elles ne sont pas identifiables individuellement par télédétection, elles le deviennent quand plusieurs types de végétation sont affectés à une même classe¹. Dans le cadre de cette étude, l'occupation des sols a été classée en trois niveaux hiérarchiques emboîtés (**Tableau 3**).

Le premier niveau comprend deux classes de la typologie du CBN, « Végétations artificielles » et « Végétations naturelles et semi-naturelles », auxquelles nous avons ajouté une troisième classe, les « Milieux non végétalisés ».

Le second niveau comprend trois classes de la typologie du CBN, « Forêts », « Fourrés arbustifs » et « Herbacées », auxquelles nous avons ajouté quatre classes : « Milieux aquatiques et pelouses amphibies » « Cultures » ; « Plantations » ; « Parcs, jardins et stades ». La classe "Milieux aquatiques et pelouses amphibies" inclue d'une part la classe « Végétations aquatiques » (niveau 1 de la typologie du CBN) qui comprend toutes les végétations des eaux courantes ou stagnantes et d'autre part, les « Prairies et pelouses amphibies » (niveau 4 de la typologie du CBN). La classe "Cultures" correspond aux parcelles agricoles destinées aux cultures céréalières. Elle exclue les parcelles labourées qui sont associées à la classe "Terres arables". La classe "Plantations" regroupe les parcelles de plantation d'espèces arborescentes destinées à l'exploitation du bois et à

¹ La nomenclature CBN a été modifiée pour cette étude par Vanessa Sellin (CBN Brest), Sylvie Magnagnon (CBN Brest) et Sébastien Rapinel (CBN Brest/LETG).

la coupe. La classe "Parcs, jardins et stades" comprend l'ensemble des parcs urbains, des jardins d'ornements, des potagers et des terrains de sports.

Le troisième niveau comprend cinq classes de la typologie du CBN, « Forêts caducifoliées mésophiles », « Forêts caducifoliées hygrophiles », « Fourrés arbustifs caducifoliés mésophiles », « Fourrés arbustifs caducifoliés hygrophiles », « Pelouses sur sable fixées » auxquelles s'ajoutent les six classes suivantes « Forêts sempervirentes mésophiles » ; « Forêts sempervirentes xérophiles » ; « Prairies et pelouses mésophiles » ; « Prairies et pelouses hygrophiles » ; « Pelouses sur sable non fixées » ; et « Roselières ». La classe "Forêts sempervirentes mésophiles" comprend les végétations ligneuses supérieures à 7 mètres, au feuillage permanent, et adaptées aux sols secs. La classe "Forêts sempervirentes xérophiles" comprend les végétations ligneuses supérieures à 7 mètres, au feuillage permanent, et adaptées aux sols très secs. La classe « Prairies et pelouses mésophiles » comprend les végétations herbacées essentiellement de type graminées adaptées aux sols secs. La classe « Prairies et pelouses hygrophiles » comprend les végétations herbacées essentiellement de type graminées adaptées aux sols humides. La classe "Pelouses sur sable non fixées" correspond aux pelouses présentes sur les dunes mobiles. La classe "Roselières" correspond à la classe "Roselières et cariçales" de la typologie du CBN.

Les classes « Eaux marines » ; « Surfaces bâties » ; « Routes » ; « Rochers côtiers » ; « Sables » et « Terres arables » ont été ajoutées en raison de leur intérêt en tant qu'information contextuelle pour la classification puis regroupées dans la classe « Milieux non végétalisés ».

Si la classe « Eaux marines » située au-delà de la limite des plus basses eaux peut être facilement identifiée et masquée à l'aide de données vectorielles, il convient cependant de la cartographier au sein de la zone intertidale afin de la distinguer du sable et des végétations halophytes.

Tableau 3 – Typologie en trois niveaux hiérarchiques utilisées sur le site de Sauzaie-Jaunay. Les classes représentées en gras correspondent à la typologie du CBN.

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Milieus non végétalisés		
Végétations artificielles	Cultures	
	Plantations	
	Parcs, jardins et stades	
Végétations naturelles et semi-naturelles	Forêts	Forêts caducifoliés mésophiles
		Forêts caducifoliés hygrophiles
		Forêts sempervirents mésophiles
		Forêts sempervirents xérophiles
	Fourrés arbustifs	Fourrés arbustifs caducifoliés mésophiles
		Fourrés arbustifs caducifoliés hygrophiles
	Milieus aquatiques et pelouses amphibies	
	Herbacées	Prairies/Pelouses mésophiles
		Prairies/Pelouses hygrophiles
		Pelouses sur sable non fixées
		Pelouses sur sable fixées
Roselières		

1.5.2. Classification supervisée pixel

Après avoir testé plusieurs algorithmes, le choix s’est porté sur un mode de classification supervisée par maximum de vraisemblance qui a fourni les meilleurs résultats. 282 échantillons d’entraînement homogènes ont été sélectionnés à partir de relevés terrains et de l’image Worldview-2 (par photo-interprétation), ce qui représente une surface totale de 1,37 km² (**Figure 6**). Les classes « Prairies fauchées » ; « Cultures 1 » ; « Cultures 2 » et « Ombres » non présentes dans la typologie finale ont été ajoutées en raison de leurs signatures spectrales particulières puis reclassées lors de la classification orientée-objet.

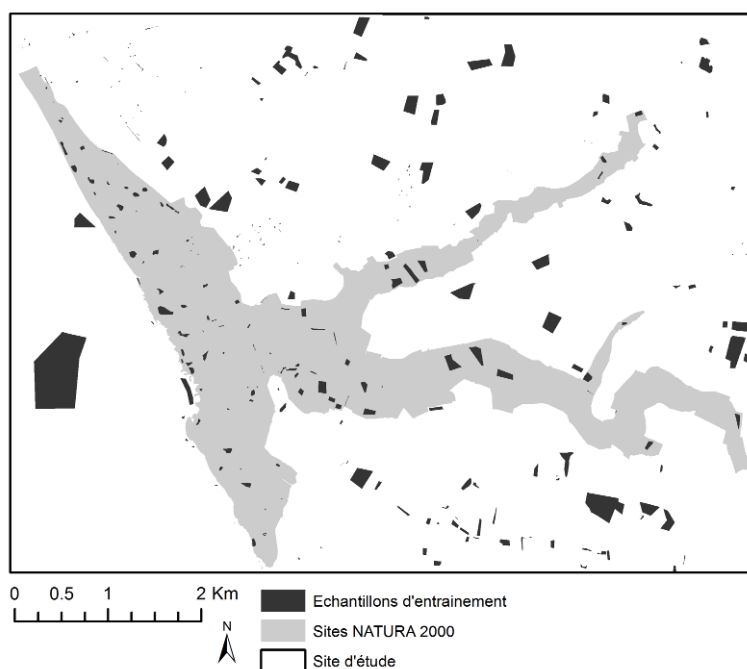


Figure 6 – Localisation des échantillons d'entraînement pour la classification supervisée

1.5.3. Classification orientée-objet

La classification de type orientée-objet permet d'affiner la qualité de la classification « pixel » en intégrant des critères de contexte, de forme et de texture. Tout d'abord, l'image Worldview-2 a été segmentée selon des critères spectraux et de forme afin d'en dériver des objets homogènes. Le choix des paramètres de segmentation a été fait de façon à obtenir les objets les plus larges possibles tout en restant suffisamment fins pour ne pas intégrer différentes formations végétales (**Tableau 4**).

Tableau 4 – Paramètres de segmentation multi-résolution utilisés sur les images multispectrales et fusionnées Worldview-2

DONNÉES	ÉCHELLE	FORME	COMPACITÉ
Multispectrales	20,0	0,1	0,5
Fusionnées	40,0	0,1	0,5

Puis, la couche vectorielle contenant l'ensemble des objets a été croisée avec la couche raster contenant la classification pixel afin d'attribuer la classe majoritaire à chaque objet (**Figure 7**). Cette opération a permis d'une part d'éliminer l'effet « poivre et sel » de la classification « pixel » et d'autre part d'obtenir une classification où chaque objet est caractérisé par une forme, une texture et un contexte de voisinage mais aussi de niveau hiérarchique. Les objets appartenant à la classe « Prairies fauchées » ont été affectés aux classes « Prairies/Pelouses mésophiles » ou « Prairies/Pelouses hygrophiles » suivant qu'ils sont localisés ou non en zone humide. Les objets classés « Cultures 1 » et « Cultures 2 » ont été reclassés en « Cultures ».

Les couches thématiques ont été intégrées durant cette étape pour apporter une information contextuelle afin d'améliorer la classification. Pour chaque classe, les objets mal

classés ont été reclassés suivant des critères de contexte, de forme et de texture (**Tableau 5 et 6**). L'intégration de critères de contexte et de forme est intéressante car, contrairement aux caractéristiques spectrales, leurs valeurs sont invariantes quelque soit le site, le type d'image et la date d'acquisition. En revanche, le critère de texture peut varier suivant la résolution des images.

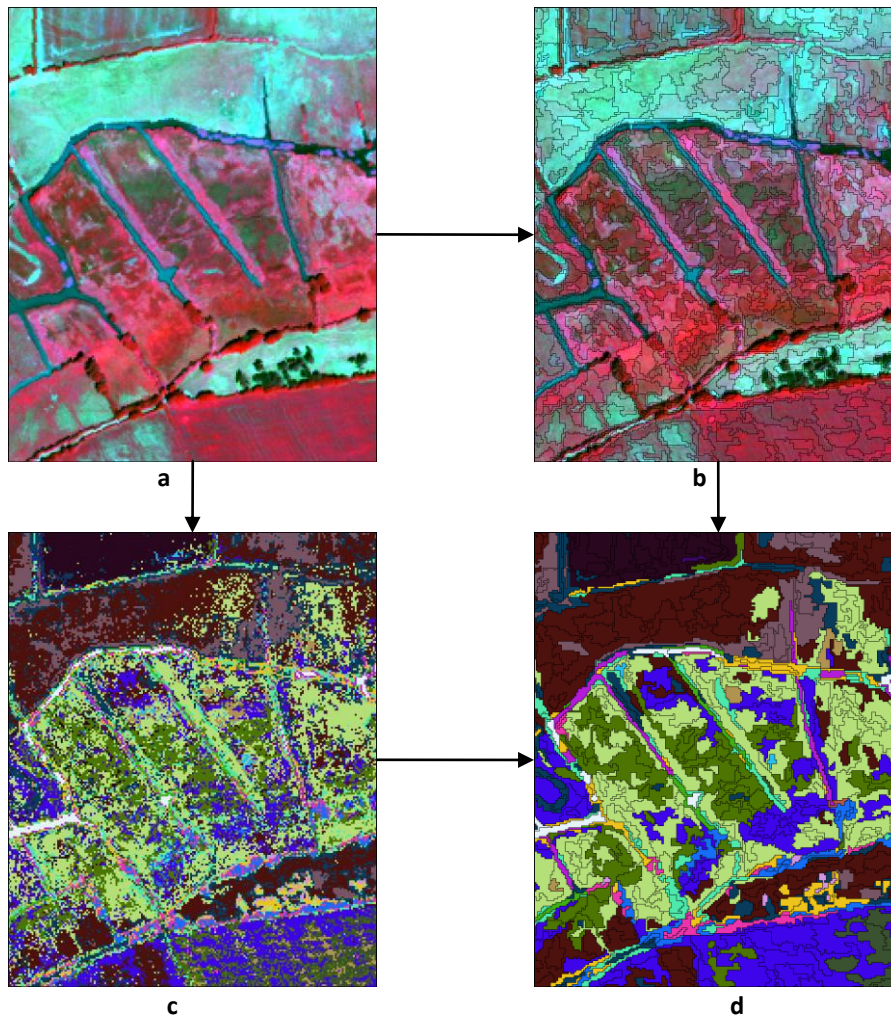


Figure 7 – Procédure d'attribution de la classe majoritaire aux objets : (a) image Worldview-2 ; (b) segmentation avec création d'objets ; (c) classification « pixel » ; (d) croisement de la classification « pixel » avec la couche « objets »

Tableau 5 – Critères de contexte, de forme et de texture pris en compte pour chaque classe

CLASSE	CONTEXTE	FORME	TEXTURE
Eaux marines	Intersecte avec zones intertidales BD TOPO	Superficie > 4000 m ²	
Surfaces bâties	Distance bâti BD TOPO < 150 m Et Distance route BD TOPO < 60 m	Superficie > 20 m ²	Dissimilarité < 0,70
Routes	Bordure à route BD TOPO		
Rochers côtiers	Distance Eaux marines < 40 m		
Sables	Distance Eaux marines < 400 m		
Terres arables	Distance Eaux marines > 600 m Et Limites BD Parcellaire		
Cultures	Limites BD Parcellaire	Superficie > 1000 m ²	
Plantations	Intersecte avec couche végétation BD TOPO		
Parcs, jardins et stades	Limites BD Parcellaire Et Bordure à Surfaces bâties	Superficie < 2000 m ²	
Forêts caducifoliées mésophiles	Intersecte pas avec couche ZDH		Dissimilarité > 0,25
Forêts caducifoliées hygrophiles	Intersecte avec couche ZDH		Dissimilarité > 0,25
Forêts sempervirentes mésophiles	Intersecte pas avec couche ZDH		
Forêts sempervirentes xérophiles	Intersecte avec couche Sables dunaires		
Fourrés arbustifs caducifoliés mésophiles	Intersecte pas avec couche ZDH		Dissimilarité > 0,25
Fourrés arbustifs caducifoliés hygrophiles	Intersecte avec couche ZDH		Dissimilarité > 0,25
Milieus aquatiques et pelouses amphibies	Bordure à BD CARTHAGE		
Prairies/Pelouses mésophiles	Intersecte pas avec couche ZDH Et Limites BD Parcellaire		
Prairies/Pelouses hygrophiles	Intersecte avec couche ZDH Et Limites BD Parcellaire		
Pelouses sur sable non fixées	Distance couche Sables dunaires < 100 m Ou Intersecte avec couche Sables dunaires		
Pelouses sur sable fixées	Intersecte avec couche Sables dunaires		
Roselières	Intersecte avec couche ZDH		

Tableau 6 – Reclassification des objets issus de la classification « pixel » selon des critères de contexte, de forme et de texture

CLASSIFICATION PIXEL	RECLASSIFICATION	CRITÈRES
Eaux marines	Non classées	-
Surfaces bâties	Non classées	-
Routes	Non classées	-
Rochers côtiers	Non classés	-
Sables	Terres arables	-
Terres arables	Sables	Distance eaux marines < 600 m
	Non classés	Distance eaux marines > 600 m
Cultures	Non classés	-
Parcs, jardins et stades	Cultures	Superficie > 5000 m ²
	Non classés	Superficie < 5000 m ²
Forêts caducifoliées mésophiles	Forêts caducifoliées hygrophiles	Dissimilarité > 0,25
	Prairies/Pelouses hygrophiles	Dissimilarité < 0,25
Forêts caducifoliées hygrophiles	Forêts caducifoliées mésophiles	Intersecte pas avec couche ZDH
	Prairies/Pelouses hygrophiles	Dissimilarité < 0,25
Forêts sempervirentes mésophiles	Forêts sempervirentes xérophiles	Intersecte avec couche Sables dunaires
Forêts sempervirentes xérophiles	Forêts sempervirentes mésophiles	Intersecte pas avec couche Sables dunaires
Fourrés arbustifs caducifoliés mésophiles	Fourrés arbustifs caducifoliés hygrophiles	Intersecte avec couche ZDH
	Prairies/Pelouses mésophiles	Dissimilarité < 0,25
Fourrés arbustifs caducifoliés hygrophiles	Fourrés arbustifs caducifoliés mésophiles	Intersecte pas avec couche ZDH
	Prairies/Pelouses hygrophiles	Dissimilarité < 0,25
Milieus aquatiques et pelouses amphibies	Non classés	-
Prairies/Pelouses mésophiles	Prairies/Pelouses hygrophiles	Intersecte avec couche ZDH
Prairies/Pelouses hygrophiles	Prairies/Pelouses mésophiles	Intersecte pas avec couche ZDH
Pelouses sur sable non fixées	Prairies/Pelouses mésophiles	-
Pelouses sur sable fixées	Non classés	-
Roselières	Cultures	Dissimilarité < 0,15
	Fourrés arbustifs caducifoliés mésophiles	Dissimilarité > 0,15

1.5.4. Nettoyage

Une phase de nettoyage a permis d'améliorer la qualité de la classification mais aussi de réduire le nombre d'objets afin de faciliter le traitement et l'exploitation de la couche d'information sous SIG.

Les objets appartenant aux classes « Cultures » ; « Terres arables » ; « Prairies/Pelouses mésophiles » et « Prairies/Pelouses hygrophiles » ont été dilatés jusqu'aux limites parcellaires. Les objets classés en « Ombres » ont été fusionnés avec l'objet voisin avec lequel ils partagent la plus grande longueur de contact.

1.6. Validation

Les deux cartes d'occupation du sol obtenues respectivement à partir du traitement automatique des images Worldview-2 multispectrales et fusionnées ont été croisées avec les points de validation afin d'évaluer leur qualité.

243 points de validation ont été dérivés des campagnes terrain effectuées les mois de mars et juillet 2009 et le 24 juillet 2012, mais aussi de photo-interprétation de l'image Worldview-2 (**Figure 8**).

En effet, l'essentiel des relevés terrain effectués lors des deux premières missions sont localisés dans la zone NATURA 2000 (dunes de la Sauzaie et marais du Jaunay). Une troisième mission a été effectuée le 24 juillet 2012 hors site NATURA 2000 afin de couvrir l'ensemble du site d'étude. Des points de validation supplémentaires ont été ajoutés par photo-interprétation de l'image Worldview-2 pour les classes « Plantations » ; « Cultures » ; « Rochers côtiers » ; « Terres arables » ; « Surfaces bâties » ; « Routes » ; « Sable » ; « Parcs, jardins et stades » ; « Eaux marines » et « Milieux aquatiques et pelouses amphibies ».

Les points de validation effectués sur le terrain ont été géo-référencés avec un GPS (précision horizontale < 2 m). Seuls les points localisés au sein d'espaces présentant une végétation homogène (15 x 15 m) et hors des échantillons d'entraînement ont été conservés.

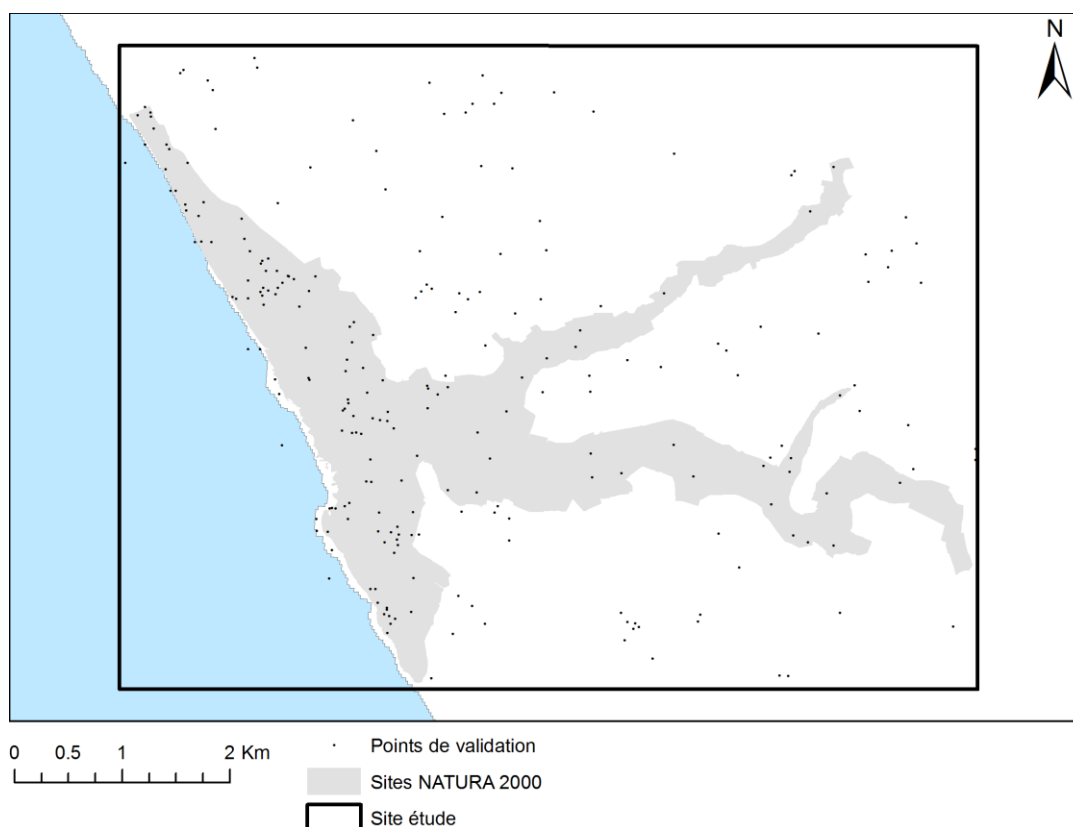


Figure 8 – Localisation des points de validation

Idéalement, le nombre de points de validation devrait être identique pour chaque classe. Pour cette raison, certaines classes largement représentées sur le site d'étude (ex. : « Prairies/Pelouses hygrophiles » ; « Cultures ») ont été sous-échantillonnées volontairement tout

en veillant à conserver une répartition spatiale homogène. À l'inverse, certaines classes peu représentées sur l'image, *a fortiori* sur des espaces homogènes de 15 x 15 m, tel que les « Fourrés arbustifs caducifoliés hygrophiles » ou les « Roselières » ont peu de points de validation. Après ré-échantillonnage, le nombre de points de validation par classe s'échelonne entre 3 pour la classe « Roselières » à 23 pour la classe « Prairies/Pelouses hygrophiles » (**Tableau 7**). La classe « Milieux non végétalisés » contient un nombre plus important de points de validation car elle comprend plusieurs sous-classes utilisées comme source d'information contextuelle telles que les routes, les surfaces bâties ou le sable.

Tableau 7 – Nombre de points de validation par classe

CLASSES	NOMBRE
Milieux non végétalisés	45
Cultures	21
Plantations	6
Parcs, jardins et stades	10
Forêts caducifoliées mésophiles	13
Forêts caducifoliées hygrophiles	9
Forêts sempervirentes mésophiles	7
Forêts sempervirentes xérophiles	11
Fourrés arbustifs caducifoliés mésophiles	20
Fourrés arbustifs caducifoliés hygrophiles	5
Milieux aquatiques et pelouses amphibies	9
Prairies/Pelouses mésophiles	21
Prairies/Pelouses hygrophiles	23
Pelouses sur sable non fixées	16
Pelouses sur sable fixées	22
Roselières	3

Afin d'évaluer la classification de la végétation naturelle et semi-naturelle, deux lots de points de validation ont été créés. Le premier englobe les 243 points relatifs à l'ensemble des classes alors que le second ne contient que les 159 points liés exclusivement aux classes de végétations naturelles et semi-naturelles.

Les deux lots de points de validation et la classification ont été rastérisés à la résolution de l'image Worldview-2, c'est-à-dire 2,0 m en mode multi-spectral et 0,5 m en mode fusionné. Un indice de Kappa (Congalton *et al.*, 1983) a été calculé pour chaque niveau hiérarchique de la typologie en croisant les couches de points de validation et de classification.

L'évaluation de la qualité des classifications a été effectuée à travers le calcul d'indices de Kappa dont la valeur est comprise entre -1 et 1. Si la classification est parfaite, Kappa=1 ; si la proportion correcte observée est plus grande que la proportion correcte attendue due au hasard, Kappa > 0 ; si la proportion correcte observée est inférieure à la proportion correcte attendue due au hasard, Kappa < 0 (Pontius, 2000). Pour une classification donnée, un coefficient de Kappa supérieur à 0,8 indique une très bonne qualité de classification, un coefficient compris entre 0,6 et 0,8 indique une classification de bonne qualité, en dessous de 0,6 la qualité de classification est faible.

2. RÉSULTATS

Les résultats de la classification de l'occupation du sol du site de Sauzaie Jaunay à partir de l'image Worldview-2 sont présentés aux trois niveaux hiérarchiques.

2.1. Niveau 1

Au niveau 1 de la typologie, qui comprend trois classes, les indices de kappa des classifications dérivées des images multispectrales et fusionnées sont très bons avec des valeurs s'élevant respectivement à 0,90 et 0,88. L'analyse des matrices de confusion pour l'image multi-spectrale (**Tableau 8**) et fusionnée (**Tableau 9**) met en évidence la bonne classification des « Milieux non végétalisés ». Quelques confusions sont observées entre les classes « Végétations artificielles » et « Végétations naturelles ». Elles s'expliquent par la similarité des signatures spectrales de certaines prairies et de certaines cultures à la date d'acquisition de l'image (25 mai 2011). On peut observer que la précision des résultats obtenus est légèrement supérieure avec l'image non fusionnée qu'avec l'image fusionnée.

Tableau 8 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 1 issue de l'image Worldview-2 multispectrale (lignes) et les points de validation (colonnes)

Classification	Code	Validation			Total	Sur-détections
		1	2	3		
Milieux non végét.	1	47	1	2	50	0.06
Végét. artificielles	2		28	1	29	0.03
Végét. naturelles	3		8	156	164	0.05
Total colonne		47	37	159	243	
Sous-détections		0.00	0.24	0.02		
Précision globale	0,95					
Indice Kappa	0,90					

Tableau 9 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 1 issue de l'image Worldview-2 fusionnées (lignes) et les points de validation (colonnes)

Classification	Code	Validation			Total	Com.er.
		1	2	3		
Milieux non végét.	1	45	1	1	47	0.04
Végét. artificielles	2	2	27	2	31	0.13
Végét. naturelles	3		9	156	165	0.05
Total colonne		47	37	159	243	
Omission er.		0.04	0.27	0.02		
Précision globale	0,94					
Indice Kappa	0,88					

Les résultats cartographiques sont présentés sur la **Figure 9**. Les secteurs non végétalisés, tels que les surfaces maritimes, les communes de Saint Gilles Croix de Vie et Givrand, les terres arables sont bien identifiés. Le site NATURA 2000 des dunes de la Sauzaie et des marais du Jaunay sont correctement cartographiés en « Végétations naturelles et semi-naturelles ».

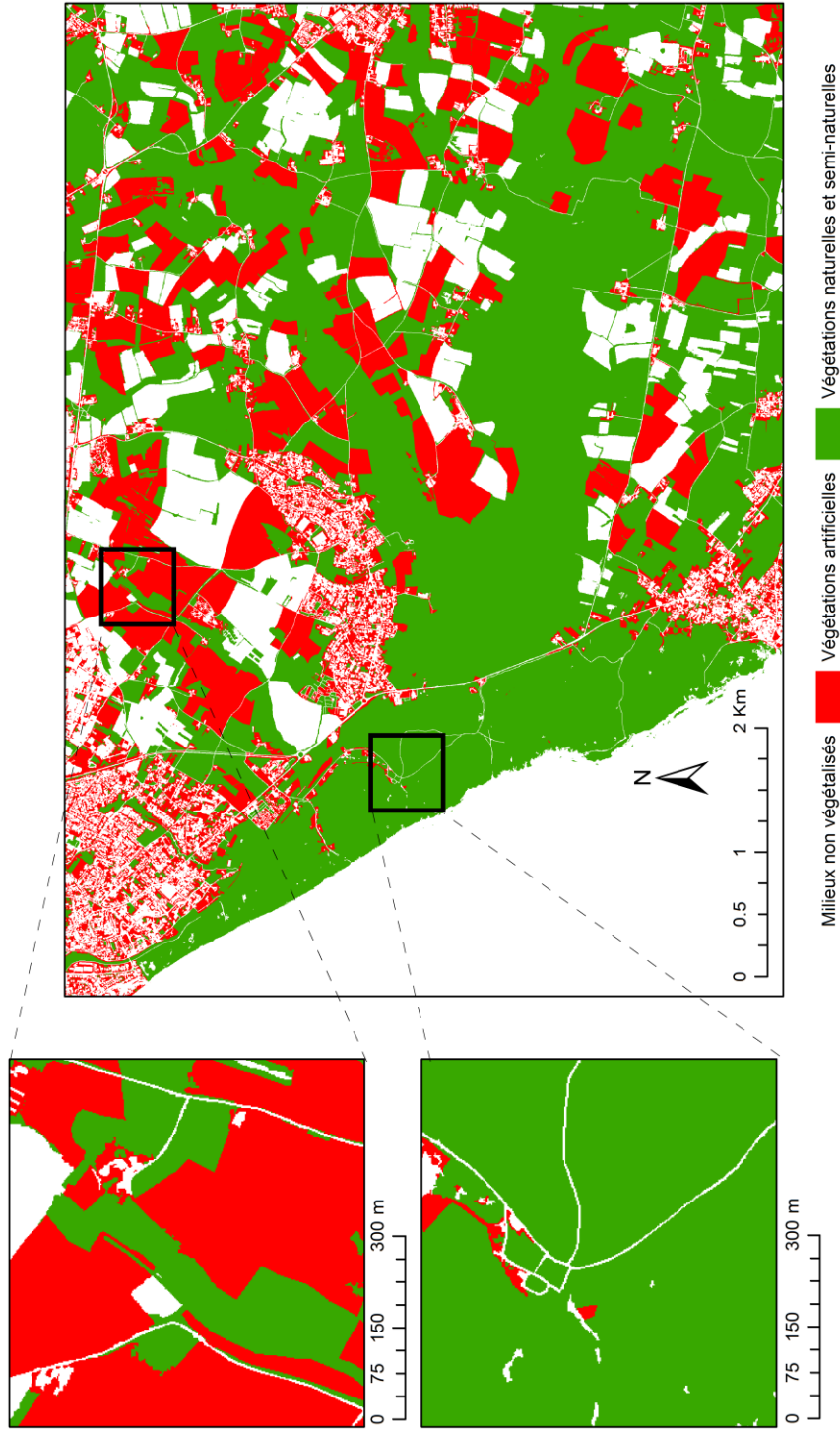


Figure 9– Carte de la végétation de niveau 1 dérivée par classification automatique de l'image Worldview-2

2.2. Niveau 2

Au niveau 2 de la typologie, qui comprend huit classes, les indices de kappa des classifications dérivées des images multispectrales et fusionnées sont très bons avec des valeurs s'élevant respectivement à 0,85 et 0,82. Les valeurs de ces indices restent encore très bons pour les seules classes de végétations naturelles et semi-naturelles puisqu'ils atteignent respectivement 0,85 et 0,83.

L'analyse des matrices de confusion, que ce soit pour l'image multi-spectrale (**Tableau 10**) ou l'image fusionnée (**Tableau 11**), met en évidence que les classes « Parcs et jardins », « Herbacées » et « Milieux aquatiques et pelouses amphibies » sont très bien identifiées. La classe « Plantations » est bien identifiée avec quelques confusions avec la classe « Forêts », cette dernière étant parfois confondue avec la classe « Fourrés arbustifs » (erreurs de sous-détection et de sur-détection respectivement de 20 et 24 %). Le constat est semblable pour la classe « Fourrés arbustifs » qui présente des confusions avec la classe « Forêt ». La classe « Cultures » est correctement identifiée avec cependant quelques confusions avec la classe « Herbacées » (sous-détection de 30 %).

Tableau 10 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 2 issue de l'image Worldview-2 multispectrale (lignes) et les points de validation (colonnes)

Classification	Code	Validation								Total	Sur-détections.
		1	21	22	23	31	32	35	36		
Milieux non végét.	1	47	1					2		50	0.06
Cultures	21		15							15	0.00
Parcs et jardins	22			9						9	0.00
Plantations	23				4	1				5	0.20
Forêts	31				2	32	8			42	0.24
Fourrés arbustifs	32		1			4	16	1		22	0.27
Herbacées	35		4	1		2	1	82		90	0.09
Milieux aquatiques	36					1			9	10	0.10
Total colonne		47	21	10	6	40	25	85	9	243	
Sous-détections.		0.00	0.29	0.10	0.33	0.20	0.36	0.04	0.00		

Précision globale **0,88**

Indice Kappa **0,85**

Tableau 11 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 2 issue de l’image Worldview-2 fusionnée (lignes) et les points de validation (colonnes)

Classification	Code	Validation								Total	Sur-détections
		1	21	22	23	31	32	35	36		
Milieu non végét.	1	45	1					1		47	0.04
Cultures	21		16			1				17	0.06
Parcs et jardins	22	2		7						9	0.22
Plantations	23				4	1				5	0.20
Forêts	31				1	30	4	1		36	0.17
Fourrés arbustifs	32				1	6	15	1		23	0.35
Herbacées	35		4	3		1	6	82		96	0.15
Milieux aquatiques	36					1			9	10	0.10
Total colonne		47	21	10	6	40	25	85	9	243	
Sous-détections		0.04	0.24	0.30	0.33	0.25	0.40	0.04	0.00		

Précision globale **0,86**

Indice Kappa **0,82**

Les résultats cartographiques sont présentés sur la **Figure 10**. Les parcs et jardins des communes de Saint Gilles Croix de Vie et Givrand sont bien cartographiés. Le réseau hydrographique des marais de la Jaunay est délimité précisément grâce à l’image Worldview-2. Le réseau boisé est bien apparent, que cela soit sous forme de bosquets, plantations, haies bocagères ou ripisylves. Tout comme pour le niveau 1 de la typologie, le site NATURA 2000 est bien cartographié, y compris les formations ligneuses sur les dunes de la Sauzaie. Cependant, hors site NATURA 2000, la classe «Herbacées» semble être surestimée au détriment de la classe « Cultures ».

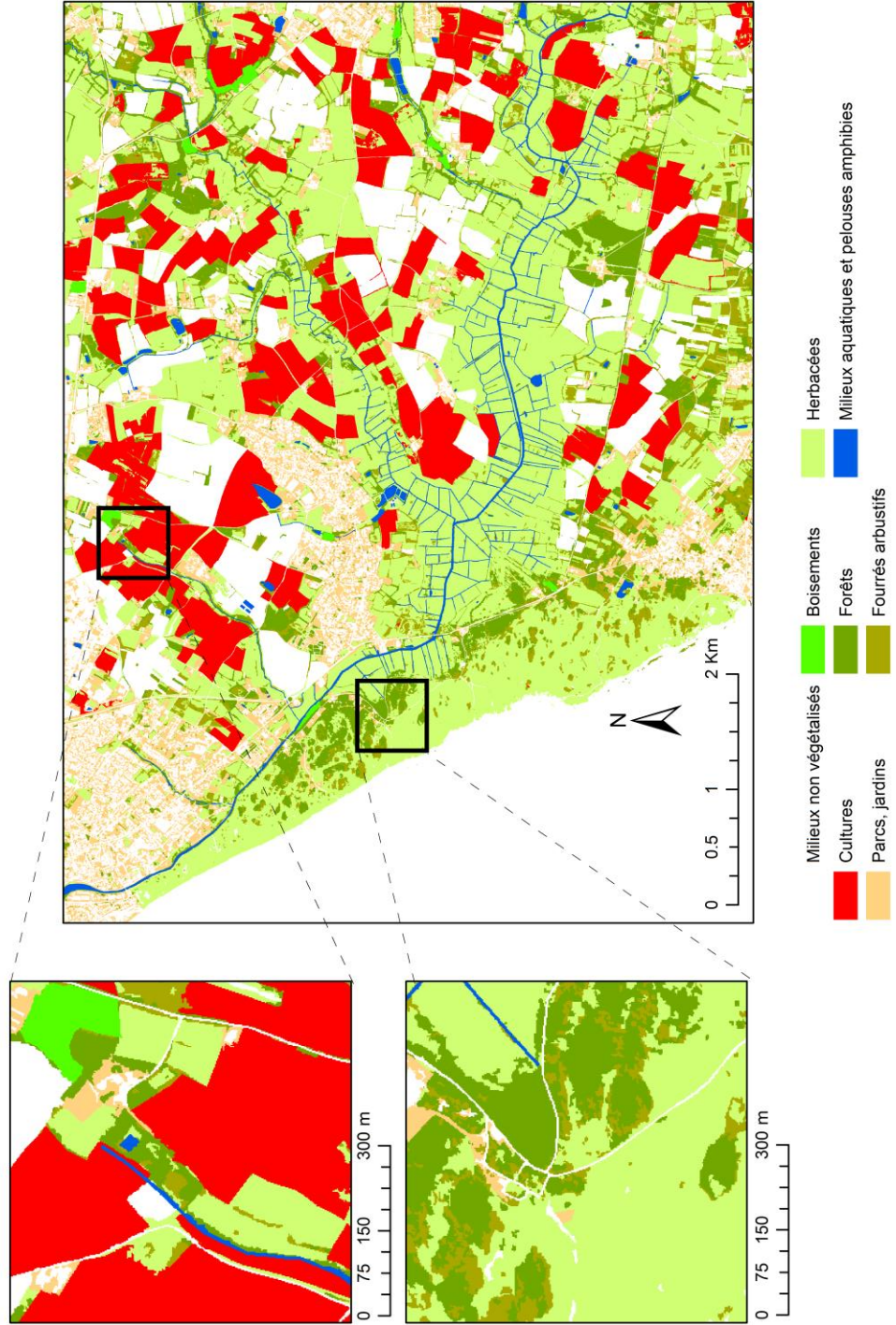


Figure 10 – Carte de la végétation de niveau 2 dérivée par classification automatique de l'image Worldview-2

2.3. Niveau 3

Au niveau 3 de la typologie, qui comprend seize classes, les indices de kappa des classifications dérivées des images multispectrales et fusionnées sont corrects, avec des valeurs respectives de 0,74 et 0,73. Les valeurs de ces indices sont de 0,66 et 0,67 pour les seules classes de végétations naturelles et semi-naturelles.

L'analyse des matrices de confusion, que ce soit pour l'image multi-spectrale (**Tableau 12**) ou l'image fusionnée (**Tableau 13**), montre les « Pelouses sur sable non fixées » et « Pelouses sur sable fixées » sont bien classées, puisque les erreurs de sous-détection comme de sur-détection sont inférieures à 9 %. Les « Pelouses et prairies mésophiles » sont classées avec une précision moyenne, puisque des erreurs de sur-détection sont observées au détriment de la classe « Cultures » et des erreurs de sous-détection sont produites à la faveur des classes « Pelouses et prairies hygrophiles » et « Roselières ». En revanche, la classe « Pelouses et prairies hygrophiles » est fréquemment confondue avec les classes « Roselières » et « Pelouses et prairies mésophiles ». La classe « Roselières » est quant à elle surestimée, principalement au détriment de la classe « Pelouses et prairies hygrophiles ». De plus, de nombreuses confusions sont observées entre les classes de couverts forestiers et de fourrés arbustifs, à l'exception des « Forêts sempervirentes mésophiles » qui sont bien classées.

Les résultats cartographiques sont présentés sur la **Figure 11** qui montre que les pelouses dunaires sont bien cartographiées. Elle met aussi en évidence que les roselières sont surestimées au sein des marais du Jaunay, car elles sont souvent confondues avec des prairies hygrophiles qui ont une forte activité chlorophyllienne. Les formations arborées de grande superficie (> 5 ha) sont bien représentées, tout comme les secteurs de fourrés arbustifs situés au sud du site d'étude. Les petites Zones à Dominante Humide situées dans les dépressions arrière-dunaires ne sont pas représentées avec précision dans le masque des Zones à Dominante Humide qui est au 1/50 000ème. En conséquence, on observe localement quelques confusions entre les classes de végétation hygrophiles et mésophile et/ou xérophile sur ces petites zones.

Tableau 12 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 3 issue de l'image Worldview-2 multispectrale (lignes) et les points de validation (colonnes)

Classification	Code	Validation															Total	Com.er.	
		1	21	22	23	36	311	312	314	316	321	322	351	352	353	354			356
Milieux non végét.	1	47	1												1	1		50	0.06
Cultures	21		15															15	0.00
Parcs et jardins	22			9														9	0.00
Plantations	23				4			1										5	0.20
Milieux aquatiques	36					9	1											10	0.10
Foret cadu. méso	311						5	1		1	1							8	0.38
Foret cadu. hygro	312				2		4	5			1	3						15	0.67
Foret semp. méso	314								6									6	0.00
Foret semp. xéro	316						1		1	8	3							13	0.38
Fourrés cadu. méso.	321		1				1	1		2	14							19	0.26
Fourrés cadu. hygro.	322									1	1	1						3	0.67
Prairies méso.	351		4	1			1					12				1		19	0.37
Prairies hygro.	352											4	12					16	0.25
Pel. sable non fixées	353													15				15	0.00
Pel. sable fixées	354											1				20		21	0.05
Roselières	356							1				1	3	11			3	19	0.84
Total colonne		47	21	10	6	9	13	9	7	11	20	5	21	23	16	22	3	243	
Omission er.		0.00	0.29	0.10	0.33	0.00	0.62	0.44	0.14	0.27	0.30	0.80	0.43	0.48	0.06	0.09	0.00		

Précision globale **0,76**

Indice Kappa **0,74**

Tableau 13 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 3 issue de l’image Worldview-2 fusionnée (lignes) et les points de validation (colonnes)

Classification	Code	Validation															Total	Com.er.	
		1	21	22	23	36	311	312	314	316	321	322	351	352	353	354			356
Milieux non végét.	1	45	1												1			47	0.04
Cultures	21		16				1											17	0.06
Parcs et jardins	22	2		7														9	0.22
Plantations	23				4			1										5	0.20
Milieux aquatiques	36					9	1											10	0.10
Forêt cadu. méso	311						5			1								6	0.17
Forêt cadu. hygro	312				1		3	6			1	1						12	0.50
Forêt semp. méso	314								7	1								8	0.13
Forêt semp. xéro	316						1			7	2							10	0.30
Fourrés cadu. méso.	321						1	2		2	13							18	0.28
Fourrés cadu. hygro.	322				1					1		2					1	5	0.60
Prairies méso.	351		4	3							3		12			1		23	0.48
Prairies hygro.	352											5	14				1	20	0.30
Pel. sable non fixées	353													15				15	0.00
Pel. sable fixées	354											1				21		22	0.05
Roselières	356						1			1	2	2	9				1	16	0.94
Total colonne		47	21	10	6	9	13	9	7	11	20	5	21	23	16	22	3	243	
Omission er.		0.04	0.24	0.30	0.33	0.00	0.62	0.33	0.00	0.36	0.35	0.60	0.43	0.39	0.06	0.05	0.66		

Précision globale **0,75**

Indice Kappa **0,73**

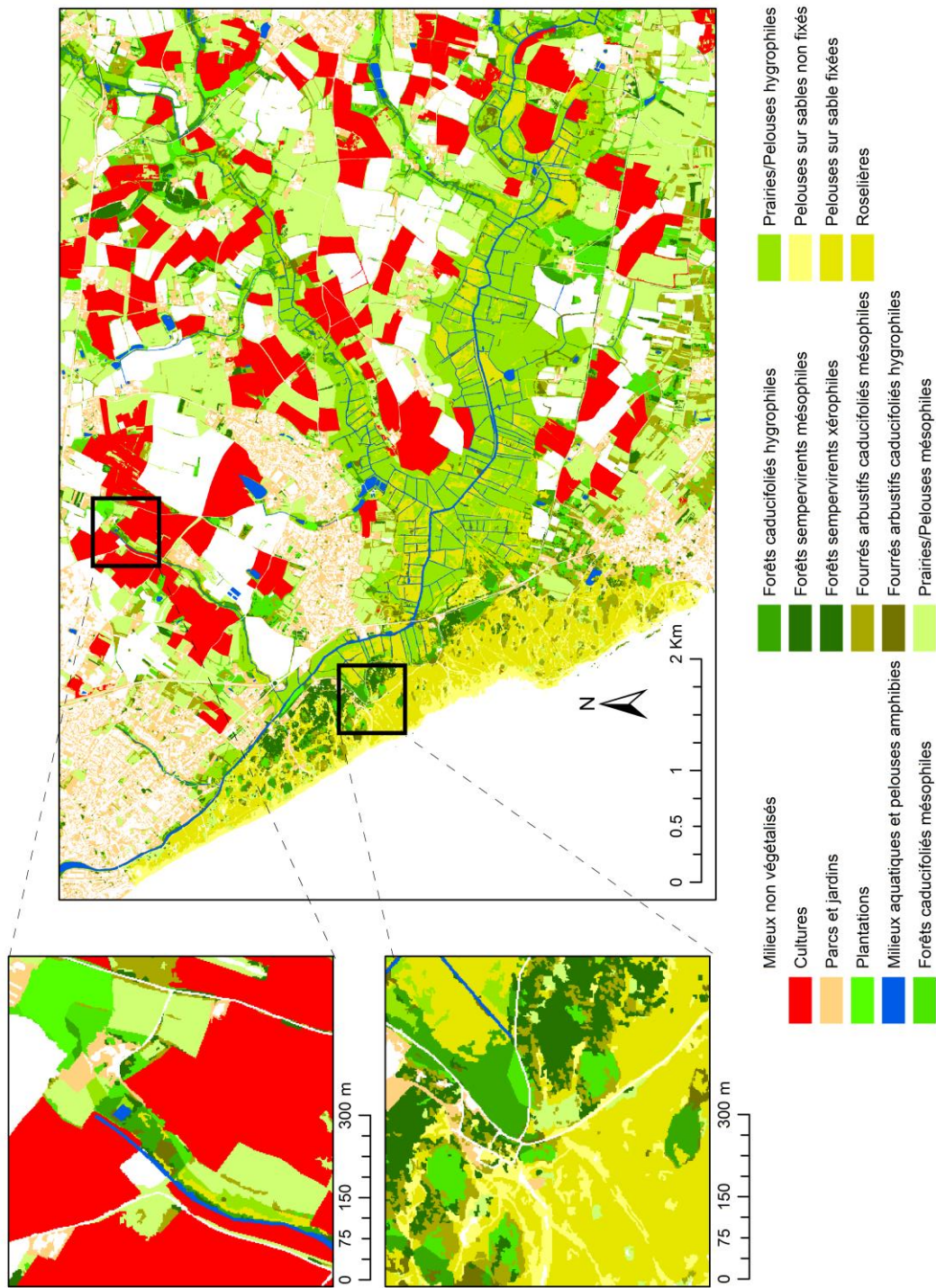


Figure 11 – Carte de la végétation de niveau 3 dérivée par classification automatique de l'image Worldview-2

3. DISCUSSION

3.1. Potentialités, limites et perspectives de la démarche

Le traitement automatique de l'image Worldview-2 a permis, sans cartographie préalable des sites d'intérêts, d'identifier correctement les végétations naturelles et semi-naturelles sur un site diversifié de 48 km² incluant aussi bien des secteurs dunaires, des marais, des petites zones humides de bas-fonds que de vastes parcelles agricoles et des milieux urbanisés (niveau 1 de la typologie développée par le Conservatoire Botanique National de Brest). Une fois identifiées, ces végétations naturelles et semi-naturelles ont pu être caractérisées avec précision au niveau 2 de la typologie développée par le Conservatoire Botanique National de Brest. En revanche, de nombreuses confusions sont apparues au niveau 3 de la typologie, en particulier entre les forêts et les fourrés. Les résultats des classifications obtenues à partir du traitement de l'image en mode multi-spectrale ou fusionné sont similaires.

L'image Worldview-2 traitée est de très bonne qualité, avec peu d'ombres portées, un faible angle d'incidence, peu de perturbations atmosphériques et une date d'acquisition optimale pour le suivi de la végétation. Cependant, certaines prairies venaient d'être fauchées, rendant leur caractérisation impossible. De plus, la similarité spectrale et texturale entre certaines prairies mésophiles et des cultures a entraîné des erreurs de classification. Ces remarques confirment les observations effectuées lors d'une étude portant sur la classification de l'occupation du sol en Vendée à partir d'une image Spot-5 acquise en juin (Corgne *et al.*, 2009). L'apport de données multi-temporelles, de type Landsat ou SPOT, pourrait permettre d'améliorer la classification en éliminant les confusions résiduelles entre les cultures et les prairies.

L'apport de l'image de texture (image de dissimilarité), a permis d'améliorer la classification des surfaces bâties mais aussi des strates ligneuses.

L'enveloppe des Zones à Dominante Humide a permis d'identifier les secteurs où la probabilité de rencontrer une zone humide est forte, c'est-à-dire les secteurs où la végétation est hygrophile et les sols sont hydromorphes. Cependant, cette enveloppe trouve son application optimale dans une approche descriptive au 1/50 000ème. Ainsi, à une échelle plus fine (inférieure ou égale au 1/25 000ème, la délimitation des zones humides peut être approximative et intégrer des secteurs non humides tel que des bourrelets alluviaux ou des pieds de versant, ce qui peut expliquer les erreurs observées sur le caractère humide/non humide de la végétation. L'apport de données altimétriques fines de type LiDAR, pourrait permettre de réduire sensiblement ces confusions (Rapinel, 2012).

L'apport d'autres données vectorielles complémentaires, telles que la BD TOPO ou la BD Parcellaire de l'IGN ® permet d'améliorer significativement la qualité de classification par l'apport d'informations contextuelles, que ce soit pour la cartographie des habitats naturels (Lucas *et al.*, 2007; Rapinel, 2012) ou du réseau bocager (Vannier *et al.*, 2011). Les données utilisées ici couvrent la totalité du territoire français métropolitain et sont disponibles à faible coût, voire gratuitement. Cette étude montre que leur utilisation est pertinente dans le cadre de la réalisation d'une cartographie des végétations naturelles et semi-naturelles au 1/25 000ème à l'échelle régionale. Toutefois, des corrections sont à apporter à la BD Parcellaire, d'une part pour mettre à

jour le découpage parcellaire et d'autre part pour créer une couche vectorielle du parcellaire pour certaines communes. Si ce travail de correction peut demander un investissement important en temps de traitement, il améliore la qualité de la classification automatique, en particulier pour les cultures et les jardins.

La validation des classifications a été effectuée à partir de relevés phytosociologiques² mais aussi de quelques points identifiés par photo-interprétation sur l'image Worldview-2³, en particulier pour les cultures et les prairies. Cette situation souligne l'intérêt d'effectuer des relevés terrain à une date proche du jour d'acquisition de l'image et sur l'ensemble du site d'étude et pour tous les types d'occupation du sol.

L'approche mise en œuvre a permis d'identifier avec précision les végétations naturelles et semi-naturelles sur l'ensemble du site d'étude. Pour cela, les milieux non végétalisés et les végétations artificielles ont été identifiés, caractérisés puis masqués. Cette démarche semble plus opérationnelle qu'une identification directe des végétations naturelles et semi-naturelles à partir de l'ensemble de l'image dans le sens où ces dernières ont des structures complexes et une grande diversité de faciès. Toutefois, des confusions sont apparues entre les prairies et certaines cultures, et ce malgré les bonnes résolutions spatiale et spectrale de Worldview-2. L'utilisation d'une autre image de télédétection acquise au cours d'une autre saison pourrait éliminer ces confusions. Ces corrections seraient d'autant plus rapides à effectuer que les limites parcellaires ont déjà été identifiées.

La caractérisation des végétations naturelles et semi-naturelles est de bonne qualité au niveau 2 de la typologie, même si des confusions sont observées entre les formations de type « Forêts » (hauteur > 7 m.) et « Fourrés arbustifs » (hauteur < 7 m). Les critères de texture ou de forme n'ont pas permis d'éviter toutes les confusions, car les faciès de ces milieux peuvent être proches. L'apport de données altimétriques de type LiDAR permettrait de caractériser automatiquement et avec précision les différentes strates de végétation (Genç *et al.*, 2004). La cartographie des milieux aquatiques et des pelouses amphibies est de très bonne qualité au sein des milieux ouverts. En revanche, l'identification automatique et directe des cours d'eau et fossés n'est pas possible dans les milieux fermés de type bois humides. Là encore, l'apport du LiDAR permettrait d'identifier avec précision les surfaces en eau et le réseau hydrographique, aussi bien en milieux ouverts que fermés (Rapinel *et al.*, 2011).

Au niveau 3 de la typologie, la démarche automatique testée ici sur l'image Worldview-2 ne semble pas encore opérationnelle. De nombreuses formations végétales présentent sur l'ensemble du site (48 km²) des signatures spectrales hétérogènes qui s'expliquent par les différents modes de gestion agricole, les durées d'inondations ou encore la nature des sols. Des traitements automatiques appliqués spécifiquement à des sites plus restreints, plus homogènes et préalablement délimités (dunes, marais...) permettraient vraisemblablement de caractériser avec précision les végétations naturelles et semi-naturelles avec un niveau de typologie plus détaillé (tel que celui correspondant au niveau 4 de la typologie du CBN de Brest), comme cela a été

² Les relevés phytosociologiques ont été effectués par Vanessa Sellin (CBN Brest) et Françoise Debaine (UMR LETG) lors de la première mission, et par Sébastien Rapinel (CBN Brest/LETG) lors de la seconde mission.

³ La photo-interprétation des points a été effectuée par Sébastien Rapinel (CBN Brest/LETG).

récemment démontré dans la littérature scientifique (Novack *et al.*, 2011; Eckert, 2012; Mutanga *et al.*, 2012).

3.2. Rapport coût/efficacité de la démarche

La démarche développée pour la cartographie des végétations naturelles et semi-naturelles à partir de l'image Worldview-2 est intéressante dans le cadre d'une approche opérationnelle car elle permet de spatialiser automatiquement une grande partie de l'information souhaitée. Cependant, des traitements pré et post-classification sont nécessaires pour corriger d'une part l'image Worldview-2 et assurer une compatibilité spatiale les données vectorielles et d'autre part les erreurs de classification restantes. Le coût et le temps nécessaire à l'élaboration de ces traitements (pour une personne qualifiée) sont présentés dans le **Tableau 14** pour le site de Sauzaie-Jaunay. L'image Worldview-2 a été acquise au prix de 2670 €, soit 26 €/km². Les prétraitements de cette image, incluant les corrections atmosphériques, les corrections géométriques, l'élaboration d'une image de texture, ont nécessité environ 1,5 journée de travail. La phase de classification demande environ 2,0 journées de travail, incluant une éventuelle adaptation du *ruleset*, la prise d'échantillons d'entraînement, le temps de classification. Le temps consacré à l'élaboration de la démarche de classification n'est pas ici pris en compte. Les corrections par photo-interprétation des erreurs de classification peuvent nécessiter deux journées de travail. Cependant, les corrections au niveau plus fin de la typologie nécessiteraient plus de temps que celles appliquées aux niveaux supérieurs. L'évaluation de la qualité, qui correspond au calcul et à l'interprétation de l'indice de Kappa associée à des matrices de confusion nécessite environ une journée de travail. Le temps consacré à cette opération reste sensiblement le même quelle que soit la superficie du site d'étude. Deux journées ont été nécessaires à la prise de points de validation sur le terrain par GPS. Cette étape peut demander un temps variable selon l'accessibilité propre au site (fossés, barbelés...), les connaissances géographiques et botaniques du site par l'opérateur, le temps d'accès en voiture au site. L'aide d'un gestionnaire ayant une bonne connaissance globale du site permet d'améliorer sensiblement l'efficacité des relevés terrain en ciblant des lieux variés et faciles d'accès.

Les corrections liées à la mise à jour de la BD Parcellaire par photo-interprétation de l'image Worldview-2 ont nécessité environ une demi-journée de travail pour le site de Sauzaie-Jaunay. Ces corrections sont importantes dans le sens où elles permettent d'éviter des erreurs de classification par la suite. Dans le cadre de cette démarche expérimentale, la mise à jour du parcellaire a été effectuée par approche automatique orientée-objet à partir de l'image Worldview-2. Mais cette démarche expérimentale reste à valider sur d'autres sites et éventuellement d'autres sources d'information (BD ORTHO de l'IGN ®).

L'élaboration de la couche vectorielle des Zones à Dominante Humide nécessite environ une demi-journée de travail. La question de son échelle de précision et de son utilisation a déjà été abordée auparavant. Enfin, la BD SCAN-Géol nécessite aussi une demi-journée de traitement pour la vectorisation des contours par photo-interprétation.

Au total, la démarche appliquée de cartographie de la végétation naturelle à partir de l'image Worldview-2 sur le site de Sauzaie-Jaunay (48 km²) nécessiterait 11,5 journées de travail pour une personne qualifiée.

Tableau 14 – Coûts et temps de traitement des données nécessaires pour une personne pour la cartographie des végétations naturelles et semi-naturelles sur le site de Sauzaie-Jaunay

DONNÉE	COÛT ACQUISITION	TACHE	TEMPS (EN JOURS)
Worldview-2	2670 €	Prétraitements	1,5
		Classification	2,0
		Corrections	2,0
		Évaluation de la qualité de la classification	1,0
Contrôles terrains	500 €	Observations	2,0
		Sélection des points de validation	1,0
BD Parcellaire	0 €	Corrections	0,5
Couche ZDH	0 €	Calcul de l'indice topographique	0,5
		Affinement par photo-interprétation	0,5
BD Scan-Géol	0 €	Photo-interprétation des contours	0,5
TOTAL	3170 €		11,5

Les logiciels utilisés dans cette démarche sont les suivants : Arcgis (ESRI ®) pour l'analyse de données SIG, ENVI (ITT ®) pour les traitements de l'image Worldview-2 et eCognition (Trimble ®) pour la classification orientée-objets. Des solutions *open-source* et alternatives à ces logiciels payants sont aujourd'hui disponibles comme par exemple les suites Qgis et GRASS, mais elles sont souvent moins complètes et nécessitent de solides compétences en géomatique et programmation.

CONCLUSION

Le traitement automatique de l'image Worldview-2 a permis de cartographier les végétations naturelles et semi-naturelles du site de Sauzaie-Jaunay à une échelle inférieure au 1/25 000ème. L'intégration d'informations relatives à la texture, la forme et le contexte des objets thématiques détectés sur l'image et à partir de couches géographiques issues de bases de données nationales ont permis d'améliorer significativement la qualité des classifications. La démarche mise en œuvre semble être robuste et est facilement reproductible

Malgré la très bonne résolution spatiale (2,0 mètres) et spectrale (8 bandes) de Worldview-2, des confusions sont apparues entre certaines classes de végétations, en particulier entre les cultures et les prairies et entre les végétations arbustives et arborées. L'apport de données de télédétection THRS acquises à des saisons différentes et de données altimétriques faciliterait leur discrimination.

Au vu du coût d'acquisition (26 €/km²) et de l'emprise spatiale de chaque scène (2000 km²), l'image Worldview-2 semble plutôt destinée à la caractérisation fine de la végétation sur des sites d'intérêt de quelques hectares préalablement identifiés. Les comparaisons en cours (Sellin *et al.*, à paraître) avec les résultats obtenus à partir des images SPOT-5 et de la BD ORTHO infrarouge couleur permettront de déterminer la perte d'information engendrée par l'utilisation de ces dernières sur l'ensemble du Grand-Ouest de la France.

BIBLIOGRAPHIE

- ANDRESEN, T., MOTT, C., SCHUPFERLING, R., ZIMMERMANN, S. ET SCHNEIDER, T., 2007. Analyse orientada a Objectos de Dados de Sensoriamento Remoto para a Obtenção de Parametros Aquaticos/Terrestres. In Kux H. et Blaschke T., *Sensoriamento remoto e SIG avançados*, Oficina de textos, Sao Paulo, pp. 241–250.
- BERK, A., ANDERSON, G.P., BERNSTEIN, L.S., ACHARYA, P.K. ; DOTHE, H., MATTHEW, M.W., ADLER-GOLDEN, S.M. ; CHETWYND JR, J.H. ; RICHTSMEIER, S.C., PUKALL, B. & OTHERS, 1999. MODTRAN4 radiative transfer modeling for atmospheric correction. In *SPIE's International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*. p. 348–353.
- CALOZ, R. ET COLLET, C., 2001. *Traitements numériques d'images de télédétection. Précis de télédétection, Vol. 3*, Presses de l'Université du Québec, Québec, 386 p.
- COHEN, J., 1960. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), pp,37–46.
- CONGALTON, R.G., ODERWALD, R.G. ET MEAD, R.A., 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate analysis statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49, pp. 1671–1678.
- CORGNE, S., NABUCET, J. ET BAH, F., 2009. Détermination de l'occupation du sol sur le bassin de la vie et du Jaunay par télédétection, LETG Rennes COSTEL, 33 p.
- DOGAN, O.K., AKYUREK, Z. ET BEKLIOGLU, M., 2009. Identification and mapping of submerged plants in a shallow lake using quickbird satellite data. *Journal of Environmental Management*, 90(7), pp. 2138–2143.
- ECKERT, S., 2012. Improved Forest Biomass and Carbon Estimations Using Texture Measures from WorldView-2 Satellite Data. *Remote Sensing*, 4(4), pp. 810–829.
- GENÇ, L.; DEWITT, B. ET SMITH, S., 2004. Determination of Wetland Vegetation Height with LiDAR. *Turkish Journal of agriculture and forestry*, 28(1), pp. 63–71.
- GILMORE, M.S., WILSON, E.H., BARRETT, N., CIVCO, D.L., PRISLOE, S., HURD, J.D. ET CHADWICK, C., 2008. Integrating multi-temporal spectral and structural information to map wetland vegetation in a lower Connecticut River tidal marsh. *Remote Sensing of Environment*, 112(11), pp. 4048–4060.
- GIRARD, M.C. & GIRARD, C.M., 1999. *Traitement des données de télédétection*, Dunod, Paris, 530 p.
- HARRIS, A. ET BRYANT, R.G., 2009. A multi-scale remote sensing approach for monitoring northern peatland hydrology: Present possibilities and future challenges. *Journal of Environmental Management*, 90(7), pp. 2178–2188.
- I-MAGE CONSULT, 2006(a). Cartographie des zones à dominante humide du bassin de la Dordogne, EPIDOR, 40 p.
- I-MAGE CONSULT, 2006(b). Cartographie des zones humides du bassin Seine-Normandie, AESN, 47 p.
- LABA, M., DOWNS, R., SMITH, S., WELSH, S., NEIDER, C., WHITE, S., RICHMOND, M., PHILPOT, W. ET BAVEYE, P., 2008. Mapping invasive wetland plants in the Hudson River National

- Estuarine Research Reserve using quickbird satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 112(1), pp. 286–300.
- LABEN, C.A. ET BROWER, B.V., 2000. *Process for enhancing the spatial resolution of multispectral imagery using pan-sharpening*. United States Eastman Kodak Company (Rochester, New York). US Patent 6011875. <http://www.freepatentsonline.com/6011875.html>.
- LUCAS, R., ROWLANDS, A., BROWN, A., KEYWORTH, S. & BUNTING, P., 2007. Rule-based classification of multi-temporal satellite imagery for habitat and agricultural land cover mapping. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 62(3), pp. 165-185.
- MUTANGA, O., ADAM, E. & CHO, M.A., 2012. High density biomass estimation for wetland vegetation using WorldView-2 imagery and random forest regression algorithm. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18(0), pp. 399-406.
- NOVACK, T., ESCH, T., KUX, H. & STILLA, U., 2011. Machine Learning Comparison between WorldView-2 and QuickBird-2-Simulated Imagery Regarding Object-Based Urban Land Cover Classification. *Remote Sensing*, 3(10), pp. 2263–2282.
- PONTIUS, R., 2000. Quantification Error Versus Location Error in Comparison of Categorical Maps. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 66(8), pp. 1011–1016.
- RAPINEL S., HUBERT-MOY L., CLÉMENT B., 2011. Using LiDAR data to evaluate wetland functions. *34th International Symposium for Remote Sensing of Environment*, Sydney, Australia, 10-15 April.
- RAPINEL, S., 2012. *Contribution de la télédétection à l'évaluation des fonctions des zones humide : de l'observation à la modélisation prospective*. Thèse de doctorat. Université Rennes 2, Rennes, 384p.
- SELLIN V., GOURMELON F. MAGNANON S., 2013 - Cartographie des grands types de végétation par télédétection : étude de faisabilité (Bretagne, Basse-Normandie et Pays-de-la Loire). Rapport d'étude Conservatoire Botanique National de Brest/UMR CNRS LETG.
- VANNIER C., HUBERT-MOY L., NABUCET J., 2011. Analyse spatiale de la dynamique de l'occupation du sol aux échelles de la parcelle et de l'ilot parcellaire, application en paysage bocager, *Revue Internationale de Géomatique*, 21, pp. 353-374.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Localisation du site de Sauzaie-Jaunay et emprise de l'image Worldview-2.....	5
Figure 2 – Composition colorée (rouge = bande 7, vert = bande 5, bleu = bande 3) avec les bandes multispectrales (gauche) et fusionnées (droite).....	8
Figure 3 – Extrait de l'image de dissimilarité obtenue à partir de la bande 7	9
Figure 4 – Localisation des Zones à Dominante Humide sur le site de Sauzaie-Jaunay....	10
Figure 5 - Approche de classification mis en œuvre pour la cartographie de la végétation naturelle et semi-naturelle à partir de l'image Worldview-2.....	11
Figure 6 – Procédure d'attribution de la classe majoritaire aux objets : (a) image Worldview-2 ; (b) segmentation avec création d'objets ; (c) classification « pixel » ; (d) croisement de la classification « pixel » avec la couche « objets ».....	15
Figure 7 – Localisation des points de validation	18
Figure 8– Carte de la végétation de niveau 1 dérivée par classification automatique de l'image Worldview-2	21
Figure 9 – Carte de la végétation de niveau 2 dérivée par classification automatique de l'image Worldview-2	24
Figure 10 – Carte de la végétation de niveau 3 dérivée par classification automatique de l'image Worldview-2	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Caractéristiques de l'image Worldview-2.....	5
Tableau 2 – Caractéristiques des données auxiliaires spatialisées utilisées pour la cartographie de la végétation naturelle.....	7
Tableau 3 – Typologie en trois niveaux hiérarchiques utilisées sur le site de Sauzaie-Jaunay	13
Tableau 4 – Paramètres de segmentation multi-résolution utilisés sur les images multispectrales et fusionnées Worldview-2	14
Tableau 5 – Critères de contexte, de forme et de texture intégrés pour chaque classe	16
Tableau 6 – Reclassification des objets issus de la classification « pixel » ne correspondant pas aux critères de contexte, de forme et de texture	17
Tableau 7 – Nombre de points de validation par classe	19
Tableau 8 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 1 issue de l'image Worldview-2 multispectrale (lignes) et les points de validation (colonnes)	20
Tableau 9 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 1 issue de l'image Worldview-2 fusionnées (lignes) et les points de validation (colonnes)	20
Tableau 10 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 2 issue de l'image Worldview-2 multispectrale (lignes) et les points de validation (colonnes)	22
Tableau 11 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 2 issue de l'image Worldview-2 fusionnée (lignes) et les points de validation (colonnes).....	23
Tableau 12 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 3 issue de l'image Worldview-2 multispectrale (lignes) et les points de validation (colonnes)	26
Tableau 13 – Matrice de confusion entre la classification de la végétation de niveau 3 issue de l'image Worldview-2 fusionnée (lignes) et les points de validation (colonnes).....	27
Tableau 14 – Coûts et temps de traitement des données nécessaires pour une personne pour la cartographie des végétations naturelles et semi-naturelles sur le site de Sauzaie-Jaunay....	32