

Université de Montréal

L'utilisation de la polarimétrie radar et de la décomposition de Touzi pour la
caractérisation et la classification des physionomies végétales des milieux
humides: le cas du Lac Saint-Pierre

Par
Gabriel Gosselin

Département de géographie
Faculté des arts et des sciences

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Ph.D.
en Géographie

Mai 2013

© Gabriel Gosselin, 2013

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée :
L'utilisation de la polarimétrie radar et de la décomposition de Touzi pour la
caractérisation et la classification des physionomies végétales des milieux
humides: le cas du Lac Saint-Pierre

Présentée par :
Gabriel Gosselin

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Julie Talbot
président-rapporteur

François Cavayas
directeur de recherche

Ridha Touzi
codirecteur

Monique Bernier
membre du jury

André Beaudoin
examineur externe

Hélène Lebel
représentant du doyen de la FES

RÉSUMÉ

Les milieux humides remplissent plusieurs fonctions écologiques d'importance et contribuent à la biodiversité de la faune et de la flore. Même s'il existe une reconnaissance croissante sur l'importance de protéger ces milieux, il n'en demeure pas moins que leur intégrité est encore menacée par la pression des activités humaines. L'inventaire et le suivi systématique des milieux humides constituent une nécessité et la télédétection est le seul moyen réaliste d'atteindre ce but. L'objectif de cette thèse consiste à contribuer et à améliorer la caractérisation des milieux humides en utilisant des données satellites acquises par des radars polarimétriques en bande L (ALOS-PALSAR) et C (RADARSAT-2). Cette thèse se fonde sur deux hypothèses (chap. 1). La première hypothèse stipule que les classes de physiologies végétales, basées sur la structure des végétaux, sont plus appropriées que les classes d'espèces végétales car mieux adaptées au contenu informationnel des images radar polarimétriques. La seconde hypothèse stipule que les algorithmes de décompositions polarimétriques permettent une extraction optimale de l'information polarimétrique comparativement à une approche multipolarisée basée sur les canaux de polarisation HH, HV et VV (chap. 3). En particulier, l'apport de la décomposition incohérente de Touzi pour l'inventaire et le suivi de milieux humides est examiné en détail. Cette décomposition permet de caractériser le type de diffusion, la phase, l'orientation, la symétrie, le degré de polarisation et la puissance rétrodiffusée d'une cible à l'aide d'une série de paramètres extraits d'une analyse des vecteurs et des valeurs propres de la matrice de cohérence.

La région du lac Saint-Pierre a été sélectionnée comme site d'étude étant donné la grande diversité de ses milieux humides qui y couvrent plus de 20 000 ha. L'un des défis posés par cette thèse consiste au fait qu'il n'existe pas de système standard énumérant l'ensemble possible des classes physiologiques ni d'indications précises quant à leurs caractéristiques et dimensions. Une grande attention a donc été portée à la création de ces classes par recoupement de sources de données diverses et plus de 50 espèces végétales ont été regroupées en 9 classes physiologiques (chap. 7, 8 et 9). Plusieurs analyses sont proposées pour valider les hypothèses de cette thèse (chap. 9). Des analyses de sensibilité par diffusigramme sont utilisées pour étudier les caractéristiques et la dispersion des physiologies végétales dans différents espaces constitués de paramètres polarimétriques ou canaux de polarisation (chap. 10 et 12). Des séries temporelles d'images RADARSAT-2 sont

utilisées pour approfondir la compréhension de l'évolution saisonnière des physionomies végétales (chap. 12). L'algorithme de la divergence transformée est utilisé pour quantifier la séparabilité entre les classes physiologiques et pour identifier le ou les paramètres ayant le plus contribué(s) à leur séparabilité (chap. 11 et 13). Des classifications sont aussi proposées et les résultats comparés à une carte existante des milieux humide du lac Saint-Pierre (14). Finalement, une analyse du potentiel des paramètres polarimétrique en bande C et L est proposé pour le suivi de l'hydrologie des tourbières (chap. 15 et 16).

Les analyses de sensibilité montrent que les paramètres de la 1^{re} composante, relatifs à la portion dominante (polarisée) du signal, sont suffisants pour une caractérisation générale des physionomies végétales. Les paramètres des 2^e et 3^e composantes sont cependant nécessaires pour obtenir de meilleures séparabilités entre les classes (chap. 11 et 13) et une meilleure discrimination entre milieux humides et milieux secs (chap. 14). Cette thèse montre qu'il est préférable de considérer individuellement les paramètres des 1^{re}, 2^e et 3^e composantes plutôt que leur somme pondérée par leurs valeurs propres respectives (chap. 10 et 12). Cette thèse examine également la complémentarité entre les paramètres de structure et ceux relatifs à la puissance rétrodiffusée, souvent ignorée et normalisée par la plupart des décompositions polarimétriques.

La dimension temporelle (saisonnière) est essentielle pour la caractérisation et la classification des physionomies végétales (chap. 12, 13 et 14). Des images acquises au printemps (avril et mai) sont nécessaires pour discriminer les milieux secs des milieux humides alors que des images acquises en été (juillet et août) sont nécessaires pour raffiner la classification des physionomies végétales. Un arbre hiérarchique de classification développé dans cette thèse constitue une synthèse des connaissances acquises (chap. 14). À l'aide d'un nombre relativement réduit de paramètres polarimétriques et de règles de décisions simples, il est possible d'identifier, entre autres, trois classes de bas marais et de discriminer avec succès les hauts marais herbacés des autres classes physiologiques sans avoir recours à des sources de données auxiliaires. Les résultats obtenus sont comparables à ceux provenant d'une classification supervisée utilisant deux images Landsat-5 avec une exactitude globale de 77.3% et 79.0% respectivement. Diverses classifications utilisant la machine à vecteurs de support (SVM) permettent de reproduire les résultats obtenus avec l'arbre hiérarchique de classification. L'exploitation d'une plus forte dimensionalité par le SVM, avec une précision

globale maximale de 79.1%, ne permet cependant pas d'obtenir des résultats significativement meilleurs. Finalement, la phase de la décomposition de Touzi apparaît être le seul paramètre (en bande L) sensible aux variations du niveau d'eau sous la surface des tourbières ouvertes (chap. 16). Ce paramètre offre donc un grand potentiel pour le suivi de l'hydrologie des tourbières comparativement à la différence de phase entre les canaux HH et VV.

Cette thèse démontre que les paramètres de la décomposition de Touzi permettent une meilleure caractérisation, de meilleures séparabilités et de meilleures classifications des physionomies végétales des milieux humides que les canaux de polarisation HH, HV et VV. Le regroupement des espèces végétales en classes physionomiques est un concept valable. Mais certaines espèces végétales partageant une physionomie similaire, mais occupant un milieu différent (haut vs bas marais), ont cependant présenté des différences significatives quant aux propriétés de leur rétrodiffusion.

Mots clés : Lac Saint-Pierre, milieux humides, physionomie végétale, polarimétrie radar, décompositions polarimétriques, décomposition incohérente de Touzi, RADARSAT-2, ALOS-PALSAR

ABSTRACT

Wetlands fill many important ecological functions and contribute to the biodiversity of fauna and flora. Although there is a growing recognition of the importance to protect these areas, it remains that their integrity is still threatened by the pressure of human activities. The inventory and the systematic monitoring of wetlands are a necessity and remote sensing is the only realistic way to achieve this goal. The primary objective of this thesis is to contribute and improve the wetland characterization using satellite polarimetric data acquired in L (ALOS-PALSAR) and C (RADARSAT-2) band. This thesis is based on two hypotheses (Ch. 1). The first hypothesis stipulate that classes of plant physiognomies, based on plant structure, are more appropriate than classes of plant species because they are best adapted to the information content of polarimetric radar data. The second hypothesis states that polarimetric decomposition algorithms allow an optimal extraction of polarimetric information compared to a multi-polarized approach based on the HH, HV and VV channels (Ch. 3). In particular, the contribution of the incoherent Touzi decomposition for the inventory and monitoring of wetlands is examined in detail. This decomposition allows the characterization of the scattering type, its phase, orientation, symmetry, degree of polarization and the backscattered power of a target with a series of parameters extracted from an analysis of the coherency matrix eigenvectors and eigenvalues.

The lake Saint-Pierre region was chosen as the study site because of the great diversity of its wetlands that are covering more than 20 000 ha. One of the challenges posed by this thesis is that there is neither a standard system enumerating all the possible physiognomic classes nor an accurate description of their characteristics and dimensions. Special attention was given to the creation of these classes by combining several data sources and more than 50 plant species were grouped into nine physiognomic classes (Ch. 7, 8 and 9). Several analyzes are proposed to validate the hypotheses of this thesis (Ch. 9). Sensitivity analysis using scatter plots are performs to study the characteristics and dispersion of plant physiognomic classes in various features space consisting of polarimetric parameters or polarization channels (Ch. 10 and 12). Time series of made of RADARSAT-2 images are used to deepen the understanding of the seasonal evolution of plant physiognomies (Ch. 12). The transformed divergence algorithm is used to quantify the separability between physiognomic classes and to identify the parameters (s) that contribute the most to their separability (Ch. 11 and 13). Classifications are also

proposed and the results compared to an existing map of the lake Saint-Pierre wetlands (Ch. 14). Finally, an analysis of the potential of polarimetric parameters in C and L-band is proposed for the monitoring of peatlands hydrology (Ch. 15 and 16).

Sensitivity analyses show that the parameters of the 1st component, relative to the dominant (polarized) part of the signal, are sufficient for a general characterization of plant physiognomies. The parameters of the second and third components are, however, needed for better class separability (Ch. 11 and 13) and a better discrimination between wetlands and uplands (Ch. 14). This thesis shows that it is preferable to consider individually the parameters of the 1st, 2nd and 3rd components rather than their weighted sum by their respective eigenvalues (Ch. 10 and 12). This thesis also examines the complementarity between the structural parameters and those related to the backscattered power, often ignored and normalized by most polarimetric decomposition.

The temporal (seasonal) dimension is essential for the characterization and classification of plant physiognomies (Ch. 12, 13 and 14). Images acquired in spring (April and May) are needed to discriminate between upland and wetlands while images acquired in summer (July and August) are needed to refine the classifications of plant physiognomies. A hierarchical classification tree developed in this thesis represents a synthesis of the acquired knowledge (Chapter 14). Using a relatively small number of polarimetric parameters and simple decision rules, it is possible to identify, among other, three low marshes classes and to discriminate with success herbaceous high marshes from other physiognomic classes without using ancillary data source. The results obtained are comparable to those from a supervised classification using two Landsat-5 images with an overall accuracy of 77.3% and 79.0% respectively. Various classifications using the support vector machine (SVM) can reproduce the results obtained with the hierarchical classification tree. But the possible exploitation by the SVM of a higher dimensionality, with a maximum overall accuracy of 79.1%, does not allow however to achieve significantly better results. Finally, the phase of the Touzi decomposition appears to be the only parameter (in L-band) sensitive to changes in water level beneath the peat surface (Ch. 16). Therefore, this parameter offer a great potential for peatlands hydrology monitoring compared to the HH-VV phase difference.

This thesis demonstrates that the Touzi decomposition parameters allow a better characterization, better separability and better classifications of wetlands plant physiognomic classes than HH, HV and VV polarization channels. The grouping of plant species into physiognomic classes is a valid concept. However, some plant species sharing a similar physiognomy, but occupying a different environment (high vs. low marshes), have presented significant differences in their scattering properties.

Keywords: Lake Saint-Pierre, wetlands, plant physiognomy, radar polarimetry, polarimetric decompositions, Touzi incoherent decomposition, RADARSAT-2, ALOS-PALSAR.

REMERCIEMENTS

Je tiens avant tout à remercier François Cavayas pour m'avoir fait découvrir la télédétection il y a bien longtemps déjà. Vous m'avez aussi offert dans le cadre des projets PDAOT mes premières expériences professionnelles en télédétection ainsi que la possibilité de voyager. C'est d'ailleurs lors d'un symposium en Chine que vous m'aviez proposé d'entreprendre une thèse sous votre supervision. C'est avec vous que j'ai appris l'importance d'allier les connaissances techniques aux connaissances théoriques. Merci également pour votre patience lors de la correction des nombreuses versions de cette thèse, surtout qu'elle a été réalisée à distance depuis que je réside à Ottawa. Mille mercis ne sauraient exprimer entièrement ma gratitude.

Je tiens à remercier tout autant Ridha Touzi qui a su me transmettre son enthousiasme et une partie de sa vaste connaissance de la polarimétrie radar. Je vous suis aussi reconnaissant de m'avoir offert l'opportunité de venir travailler avec vous au centre canadien de télédétection. Aussi importants que les idées et la ténacité dans la réalisation d'une thèse, vous m'avez offert à la fois du financement et un accès privilégié aux images RADARSAT-2 et ALOS-PALSAR.

Merci aussi à ma famille immédiate et spécialement à mes parents, Danielle et Michel Gosselin, pour votre support moral lorsqu'il a été nécessaire. Merci aussi de ne pas m'avoir trop taquiné au cours des deux dernières années lorsque je mentionnais, encore, que cette fois c'était la bonne, que la thèse était presque complétée!

Le doctorat aura été pour moi une expérience extraordinaire, enrichissante, mais aussi un long marathon. Je vous laisse donc sur ces mots simples mais remplis de sagesse :

"It ain't over 'til it's over" (Ce n'est pas fini, tant que ce n'est pas fini)

- Lawrence Peter "Yogi" Berra, 1973 -

Gabriel Gosselin

17 novembre 2012

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction	1
1.1. Inventaire et suivi des milieux humides	3
1.2. Évaluation du potentiel des données radar multipolarisées : problématique	6
1.3. Objectifs et hypothèses.....	9
1.4. Contribution de la recherche à l'avancement des connaissances	10
1.5. Structure de la thèse	10
 PARTIE I - LES DONNÉES DES RADARS POLARIMÉTRIQUES ET LEUR ANALYSE	
2. Les radars polarimétriques satellitaires ALOS-PALSAR et RADARSAT-2.....	13
2.1. Les paramètres d'opération d'un RSO polarimétrique : bref aperçu	13
2.1.1. Fréquences d'émission	13
2.1.2. Diversité des polarisations.....	14
2.1.3. Géométrie d'acquisition	16
2.1.4. Résolution.....	19
2.2. Les mesures d'un RSO.....	22
2.2.1. L'équation radar et coefficient de rétrodiffusion	23
2.2.2. Distance oblique vs distance temps (<i>slant range</i> vs <i>ground range</i>)	25
2.2.3. Sigma zero (σ^0), Beta zero (β^0) et Gamma zero (γ^0).....	26
2.3. Autres facteurs relatifs à l'estimation du coefficient de rétrodiffusion.....	27
2.3.1. Raccourcissement et repliement des pentes.....	27
2.3.2. Le chatoiement et les traitements multi-vues	28
3. Analyses des données polarimétriques.....	30
3.1. La polarimétrie radar : notions de base	30
3.1.1. Polarisation d'une onde monochromatique	30
3.1.2. Degré de polarisation et temps de cohérence de la cible.....	34
3.2. Représentations d'une onde partiellement polarisée.....	36
3.2.1. Matrice de Kennaugh ($[K_4]$) et autres matrices en puissance	36
3.2.2. Matrices de covariance ($[C_3]$) et de cohérence ($[T_3]$)	38
3.3. Notions d'importantes liées à la compréhension des décompositions polarimétriques	39
3.3.1. Les cibles canoniques.....	40
3.3.2. Les plans de symétrie.....	42
3.3.3. La calibration des capteurs polarimétriques	45
3.4. Les décompositions polarimétriques.....	48
3.4.1. Décompositions cohérentes vs décompositions incohérentes	48
3.4.2. Historique	49
3.4.3. La décomposition incohérente de Touzi basé sur le modèle du TSVM	55
3.5. Superposition horizontale et verticale des mécanismes de rétrodiffusion et leur interprétation via les paramètres de la décomposition de Touzi	58

PARTIE II : CARACTÉRISATION DES MILIEUX HUMIDES PAR POLARIMÉTRIE RADAR: PROBLÉMATIQUE

4. Les milieux humides, un aperçu général.....	65
4.1. Les tourbières.....	65
4.2. Les marécages.....	67
4.3. Les marais.....	68
4.4. Les eaux peu profondes.....	68
5. Inventaire et cartographie des milieux humides.....	69
5.1. Continuum et gradients biogéochimiques	69
5.2. National Wetland Inventory (NWI)	70
5.3. Le Système Canadien de Classification des Terres Humides (SCCTH) et l'Inventaire Canadien des terres humides (ICTH).....	71
5.4. Le Système de Classification des Milieux Humides du Québec (SCMHQ)	73
5.5. La classification des milieux humides de Jeglum.....	79
5.6. Conclusion.....	80
6. Apport des données radar à l'inventaire et la cartographie des milieux humides : revue de littérature	81
6.1. Introduction	81
6.2. Études avec l'imagerie radar	85
6.2.1. Hydrologie	87
6.2.2. Écologie.....	88
6.3. Études avec les données polarimétriques	94
6.3.1. Hydrologie	94
6.3.2. Écologie.....	95
7. Notions de physionomie végétale.....	98
7.1. Niveaux de perception du SCMHQ et compatibilité avec les données radar.....	98
7.2. Stratification horizontale et verticale des physionomies végétales.....	101
7.3. Arrimage entre le SCMHQ et les physionomies végétales	105

PARTIE III : CADRE DE LA RECHERCHE

8. Approche méthodologique.....	107
8.1. Aperçu général.....	107
8.2. La région du Lac Saint- Pierre.....	110
8.3. Données RSO polarimétriques et prétraitements.....	112
8.3.1. ALOS-PALSAR	112
8.3.2. RADARSAT-2.....	113
8.4. Données de support.....	114
8.4.1. Images satellitaires optiques	114
8.4.2. Données cartographiques	116
8.5. Les analyses des données sur les physionomies végétales.....	117
8.5.1. Les analyses de sensibilité.....	117
8.5.2. Le classificateur supervisé SVM	117
8.5.3. Les analyses de séparabilité.....	120
9. Physionomies végétales des milieux humides de la région du Lac Saint-Pierre et établissement d'une base de données	122
9.1. Caractéristiques des secteurs étudiés	122
9.1.1. Le secteur des Îles de Sorel	122

9.1.2.	Le Secteur de la tourbière de la Baie des Mines.....	123
9.2.	Regroupement des espèces végétales en classes physionomiques et description des quelques physionomies typiques	124
9.2.1.	Herbacées hautes [H1]	128
9.2.2.	Les physionomies herbacées hautes [H2]	130
9.2.3.	Les physionomies herbacées moyennes [h1].....	133
9.2.4.	Physionomies arborées [A1], arbustives [A2] et arbrisseaux [A3].....	136
9.3.	Création d'une base de données sur les physionomies végétales	142
9.3.1.	ALOS-PALSAR PLR (2006-2007)	143
9.3.2.	RADARSAT-2 (2009)	148

PARTIE IV : ANALYSE DES DONNÉES POLARIMÉTRIQUES ALOS-PALSAR POUR L'IDENTIFICATION DES PHYSIONOMIES VÉGÉTALES

10.	Sensibilité des paramètres de la décomposition de Touzi aux caractéristiques des physionomies végétales	152
10.1.	Les canaux de polarisation	152
10.2.	Type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1})	156
10.3.	Phase du type dominant de rétrodiffusion symétrique ($\Phi_{\alpha s1}$) et comparaison avec la différence de phase HH-VV ($\phi_{hh} - \phi_{vv}$).....	159
10.3.1.	Comparaison des deux phases	160
10.3.2.	Le type dominant et la phase du type dominant de rétrodiffusion symétrique	162
10.4.	Valeurs propres normalisées ($\lambda_{1N}, \lambda_{2N}, \lambda_{3N}$)	164
10.4.1.	Distributions	164
10.4.2.	Anisotropie	167
10.4.3.	Relation entre les composantes principales et la polarisation σ_{hv}^0	170
10.5.	Premier et second type de rétrodiffusion symétrique.....	171
10.5.1.	Relations.....	171
10.5.2.	Interprétation physique de α_{s2}	175
10.5.3.	Type global de rétrodiffusion symétrique (α_{sg}).....	179
10.6.	L'hélicité (τ)	181
10.6.1.	Analyse par pixel à l'échelle de la scène.....	181
10.6.2.	Analyse à l'échelle des objets.....	185
10.6.3.	Analyse de l'hélicité pour les objets présentant un bris de la symétrie azimutale.....	187
10.7.	L'angle d'orientation ψ	191
10.8.	La radiométrie.....	200
10.9.	Résumé	203
11.	Potentiel des paramètres de la décomposition de Touzi pour l'identification des classes physionomiques	206
11.1.	Détection des marécages arborés et arbustifs ([A1], [A2])	206
11.2.	Les marais herbacés (c171)	213
11.2.1.	Caractérisation de la rétrodiffusion du Phalaris.....	216
11.3.	Les tourbières ouvertes ([A3], [h1]).....	223
11.4.	Analyse de séparabilité des physionomies végétales	227

11.4.1.	Séparabilité entre groupes de physionomies	227
11.4.2.	Séparabilité des classes physionomiques des milieux humides	231
11.5.	Résumé	234

PARTIE V : ANALYSE DES DONNÉES RADARSAT-2 POUR L'IDENTIFICATION DES PHYSIONOMIES VÉGÉTALES

12.	Sensibilité des paramètres de Touzi aux variations saisonnières des physionomies végétales	237
12.1.	Paramètres polarimétriques examinés.....	237
12.2.	Physionomies végétales des bas et des hauts marais : signatures temporelles.....	239
12.2.1.	Physionomies herbacées hautes [H1].....	239
12.2.2.	Physionomies herbacées hautes [H2].....	245
12.2.3.	Physionomies herbacées moyennes [h1].....	252
12.3.	Physionomies arborées et arbustives des marécages et des milieux secs: signatures temporelles.....	257
12.4.	Physionomies végétales des tourbières : signatures temporelles.....	261
12.4.1.	Tourbières ouvertes [A3, h1] vs tourbières boisées [A1, A2].....	261
12.4.2.	Fens vs Bogs (série FQ21-D)	263
12.5.	Physionomies végétales des marais et des marécages : analyse comparative par diffusigrammes	265
12.5.1.	Relation entre le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) et sa phase ($\Phi_{\alpha s1}$)	266
12.5.2.	Relation entre l'anisotropie (A) et λ_{1N}	268
12.5.3.	Relation entre σ_{hv} et λ_3	270
12.6.	Résumé	274
13.	Potentiel d'identification des classes physionomiques.....	276
13.1.	Séparabilités moyennes	276
13.2.	Séparabilités par classe physionomiques	280
13.2.1.	Classes de marais	280
13.2.2.	Marais vs milieux secs (agriculture).....	284
13.2.3.	Tourbières ouvertes et boisées vs physionomies arborées	285
13.3.	Résumé	288
14.	Analyses par classifications	290
14.1.	Classification hiérarchique pour la série FQ15-A	290
14.1.1.	Développement d'un arbre hiérarchique	290
14.1.2.	Interprétation des résultats.....	297
14.2.	Classification SVM et reproductibilité des résultats.....	305
14.2.1.	Configurations	306
14.3.	Interprétation et comparaison des résultats	307
14.4.	Résumé	319

PARTIE VI : HYDROLOGIE DES TOURBIÈRES

15.	Potentiel de la polarimétrie radar pour la caractérisation de l'hydrologie des tourbières.....	322
15.1.	L'hydrologie des tourbières.....	322

15.2.	L'acrotelme et le catotelme	324
15.3.	Conductivité hydraulique et profondeur de la nappe phréatique	325
15.4.	Capacité de pénétration du signal radar	326
16.	Utilisation de la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ pour le suivi de l'hydrologie des tourbières	328
16.1.	Analyses avec ALOS-PALSAR (2006-2007)	328
16.2.	Analyse des données RADARSAT-2 (2009)	332
16.2.1.	Réflectance	333
16.2.2.	Observation sur les valeurs propres	334
16.2.3.	Paramètres α_{s1} et $\Phi_{\alpha_{s1}}$	339
16.2.4.	Mode FQ02, novembre 2009	343
16.3.	Résumé	346
17.	Conclusion	347
17.1.	Réalisation des objectifs	348
17.1.1.	Compréhension approfondie des paramètres polarimétriques	348
17.1.2.	Paramètres de la 1 ^{re} composante vs les paramètres de la 2 ^e et 3 ^e composante de la décomposition de Touzi	349
17.1.3.	Paramètres de structures et paramètres radiométriques	350
17.1.4.	L'apport de la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$	352
17.2.	Apport des paramètres de la décomposition de Touzi par rapport aux canaux de polarisation HH, HV, VV	353
17.3.	Validité des classes de physiologies végétales par rapport aux classes basées sur les espèces végétales	354
17.4.	Contribution à un inventaire détaillé des milieux humides	357
18.	Bibliographie	i
18.1.	Article à comité de lecture et actes de congrès	i
18.2.	Manuels, thèses et mémoires	xiii
18.3.	Rapports techniques et Ressources électroniques	xvi
	Annexes	xix
	Annexe 1A: Espèces végétales de la classification du Centre Saint-Laurent (Letourneau et Jean, 2006)	xix
	Annexe 1B: Dimensions des principales espèces végétales du Lac Saint-Pierre et regroupement en classes physiologiques	xxi
	Annexe 2: Description des classes physiologiques obtenues par la classification ISODATA d'une image Landsat-5	xxiv

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1-1 : Différentes configurations de polarisation du capteur ALOS-PALSAR	15
Figure 2.1-2 : Géométrie d'acquisition des données RSO opérant en mode «strip-map»	17
Figure 2.1-3 : Géométrie d'acquisition du RSO PALSAR du satellite ALOS.....	18
Figure 2.1-4 : Modes d'acquisition du satellite RADARSAT-2	18
Figure 2.2-1: Distance-temps (<i>slant-range</i>) et distance au sol (<i>ground range</i>)	26
Figure 2.2-2 : Définition de la surface unitaire et de surface incidente pour la définition des paramètres de réflectivité des cibles distribuées	27
Figure 2.3-1 : Addition cohérente des échos radar menant au chatoiement.....	28
Figure 3.1-1 : Onde électromagnétique et ellipse de polarisation	31
Figure 3.1-2 : Ellipse de polarisation et sphère de Poincaré	32
Figure 3.1-3 : Temps de cohérence (τ_c) de la cible	35
Figure 3.3-1 : Cibles canoniques et signatures polarimétriques copolarisées associées dans la base H-V	42
Figure 3.3-2 : Les plans de symétrie de l'onde rétrodiffusée	44
Figure 3.3-3 : Différents types de calibration applicable aux capteurs RSO et RSOPOL.....	46
Figure 3.4-1 : Historique des principales décompositions du signal polarimétrique.....	51
Figure 3.4-2 : Sphère de Poincaré de la décomposition de Touzi.	56
Figure 3.4-3 : Angle d'orientation et de roulis de la cible	57
Figure 3.5-1 : Superposition horizontale et verticale des mécanismes de rétrodiffusion	59
Figure 3.5-2 : Effet de la fréquence sur les diffuseurs qui influenceront le coefficient de rétrodiffusion.....	61
Figure 3.5-3 : Effet d'une modification des conditions environnementales sur le type de rétrodiffusion dominant d'une physionomie végétale : exemple du niveau d'eau.....	63
Figure 5.1-1 : Relation entre les types généraux de milieux humides du Canada en fonction des principaux gradients biogéochimiques	70
Figure 5.3-1 : Systèmes hydrologiques et développement de terres humide au Canada	72
Figure 5.4-1 : Système riverain du SCHMQ	76
Figure 5.4-2 : Système marégraphique du SCMHQ	76
Figure 5.4-3 : Système d'écoulement ou de précipitations du SCMHQ	77
Figure 5.4-4 : Représentation des sous-formes des bogs en milieu boréal et subarctique selon leurs morphologies, leurs biotopes et leurs physionomies.....	78
Figure 5.4-5 : Représentation des sous-formes des fens en milieu boréal et subarctique selon leurs morphologies, leurs biotopes et leurs physionomies.....	79
Figure 6.3-1 : L'effet de la végétation sur l'estimation du niveau d'eau	95
Figure 7.1-1 : Représentation des divers biotopes d'une tourbière	99
Figure 7.1-2 : Relations entre le climat régional, les biotopes et la physionomie végétale	101
Figure 8.1-1 : Approche méthodologique	109
Figure 8.2-1 : La région du Lac Saint-Pierre (contour rouge: zones de conservation; contour noir : zones tampons).....	111
Figure 8.3-1 : Couverture des données RADARSAT-2 (FQ) et ALOS-PALSAR (PLR) des secteurs d'étude ainsi que de la carte des milieux humides établie par le Centre Saint-Laurent	112
Figure 8.5-1 : Principes de base de la machine à vecteur de support	120
Figure 9.1-1 : Les Îles de Sorel, types de milieux humides	122
Figure 9.1-2 : La tourbière de la Baie des Mines et les milieux humides avoisinants.....	123

Figure 9.2-1 : Évolution quotidienne du niveau de l'eau (en mètres) du lac Saint-Pierre entre 2006 et 2009	126
Figure 9.2-2 : Relation entre la profondeur de l'eau et les principales espèces végétales émergentes	127
Figure 9.2-3 : Physionomies herbacées hautes 1 [H1] : (A) Typha Sp. et (B) Maïs.	129
Figure 9.2-4 : Évolution saisonnière de la biomasse aérienne (AGB) et souterraine (BGB) du Typha Sp.	129
Figure 9.2-5 : Physionomies herbacées hautes 2 [H2]	130
Figure 9.2-6 : Évolution saisonnière de la biomasse aérienne totale et de la densité d'un peuplement typique de <i>Zizania aquatica</i>	132
Figure 9.2-7 : Principales espèces végétales de la physionomie herbacée moyenne 1 [h1] ...	134
Figure 9.2-8 : Scirpe américain [53-20], sites de faible densité	135
Figure 9.2-9 : (A) Production nette journalière ($\text{g m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$) et (B) évolution de la biomasse aérienne (g m^{-2}) au cours de la saison de croissance pour la prêle fluviale (<i>Equisetum fluviale</i>) et la Scirpe fluviale (<i>Scirpus fluvialis</i>)	136
Figure 9.2-10 : Photo-interprétation de la tourbière de la Baie des Mines	140
Figure 9.2-11 : Photographies au sol de la tourbière de la Baie des Mines, 26 novembre 2009	141
Figure 9.2-12 : Tourbière de la Baie des mines, profondeur de la tourbe (cm).....	142
Figure 9.3-1 : Conditions météorologiques enregistrées pour trois stations de la région du lac Saint-Pierre à l'automne 2006 et au printemps 2007	144
Figure 9.3-2 : Création des objets vectoriels à partir de la classification non supervisée ISODATA	146
Figure 9.3-3 : Carte des objets vectoriels RADARSAT-2	148
Figure 10.1-1 : Position des classes physionomiques dans les espaces formés des canaux de polarisation : (A) $\sigma_{hh}^0 - \sigma_{vv}^0$; (B) $\sigma_{hh}^0 - \sigma_{hv}^0$ et (C) des rapports entre canaux de polarisations	155
Figure 10.2-1 : Relations entre (A) le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) et le ratio de polarisation $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ ainsi que (B) la polarisation σ_{hv}^0	158
Figure 10.3-1 : Images des phases $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ et de $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (novembre 2006).....	161
Figure 10.3-2 : Comparaison entre $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ et $\Phi_{\alpha_{s1}}$ par classe physionomique.....	161
Figure 10.3-3 : Relation par classe physionomique entre (A) α_{s1} et $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et (B) entre $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et σ_{hv}^0 , novembre 2006	163
Figure 10.4-1 : Relations entre les valeurs propres normalisées λ_{1N} , λ_{2N} et λ_{3N} , par physionomie végétale : (1 ^{ère} rangée) 10 novembre 2006,	166
Figure 10.4-2 : Relation entre la première valeur propre (λ_{1N}) et l'Anisotropie (A) par physionomie végétale : (A) 10 novembre 2006 (B) 13 mai 2007	168
Figure 10.4-3 Anisotropie (A), (A) 10 novembre 2006 et (B) 13 mai 2007.....	169
Figure 10.4-4 : Fraction de polarisation, (A) 10 novembre 2006 et (B) 13 mai 2007	169
Figure 10.4-5: Relation entre valeurs propres λ_{1N} , λ_{2N} et λ_{3N} et le canal de polarisation σ_{hv}^0 , par physionomie végétale : (A) à (C) : 10 novembre 2006 ; (D) à (F) : 13 mai 2007.....	171
Figure 10.5-1 : Relation entre le type dominant (α_{s1}) et le second type de rétrodiffusion symétrique (α_{s2}) par classe physionomique selon λ_{1N} , 10 novembre 2006 et 13 mai 2007	173

Figure 10.5-2 : Relation entre le type dominant (α_{s1}) et le second type de rétrodiffusion symétrique (α_{s2}) par classe physiologique selon τ_1 , données ALOS 10 novembre 2006,	174
Figure 10.5-3 : Relation entre α_{s1} et α_{s2} où la rétrodiffusions de surface est le mécanisme dominant, ALOS 10 novembre 2006.....	176
Figure 10.5-4 : Relation entre α_{s1} et α_{s2} pour les fortes valeurs d'Anisotropie (A), ALOS 10 novembre 2006 : (A) par pixel, (B) par objet, (C) localisation sur l'image	177
Figure 10.5-5 : Relation entre le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) et le type global de rétrodiffusion symétrique (α_{sg}), par physiologie végétale, 10 novembre 2006.....	180
Figure 10.5-6 : Relation entre le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) et le type global de rétrodiffusion symétrique (α_{sg}), en fonction de la première valeur propre (λ_{1N}) et de l'anisotropie (A), 10 novembre 2006	181
Figure 10.6-1 : Distribution normalisée de la première (τ_1), seconde (τ_2) et troisième (τ_3) hélicité (scènes complètes excluant les pixels d'eau libre du Lac Saint-Pierre), 10 novembre 2006 et 13 mai 2007	182
Figure 10.6-2 : Relation entre la première (τ_1) et la seconde hélicité (τ_2) par pixel (excluant les pixels d'eau libre du Lac Saint-Pierre) : (A) ALOS 10 novembre 2006 ; (B) ALOS 13 mai 2007.....	183
Figure 10.6-3 : Relation entre la première (τ_1), la seconde hélicité (τ_2) et le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}), scène complète (A et B) ,et par objets (C et D), 10 novembre 2006.....	185
Figure 10.6-4 : Relation entre la première (τ_1) et la seconde hélicité (τ_2) par physiologie végétale : (A) ALOS 10 novembre 2006 ; (B) ALOS 13 mai 2007 ; (C) τ_1 vs α_{s1} novembre 2006 ; (D) τ_2 vs α_{s1} novembre 2006.....	186
Figure 10.6-5 : Seuillage de la première hélicité (τ_1) et comparaison avec le ratio $\sigma_{RR}^0 / \sigma_{LL}^0$, 10 novembre 2006.....	188
Figure 10.6-6 : Relation entre la première et la seconde hélicité absolue ($ \tau_1 , \tau_2 $) en fonction des paramètres α_{s1} , α_{sg} , λ_{1N} et du canal σ_{hv}^0 , exemple 1 : A1 à H1, exemple 2 : A2 à H2, 10 novembre 2006	190
Figure 10.7-1 : Distributions normalisées du premier (ψ_1), second (ψ_2) et troisième (ψ_3) angle d'orientation, scènes complètes, 10 novembre 2006 et 13 mai 2007.....	191
Figure 10.7-2 : Relation par pixel entre le premier (ψ_1) et second (ψ_2) angle d'orientation en fonction de λ_{1N} et α_{s1} , 10 novembre 2006 et 13 mai 2007	193
Figure 10.7-3 : Relation entre le premier (ψ_1) et second (ψ_2) angle d'orientation par classe physiologique et en fonction de λ_{1N} et α_{s1}	194
Figure 10.7-4 : Vue générale des paramètres ψ_1 et ψ_2 , exemple 1 : 10 novembre 2006 (A1.1 à C1.1) et 13 mai 2007 (A1.2 à C1.2) ; exemple 2 : 10 novembre 2006 (A2.1 à C.1) et 13 mai 2007 (A2.2 à C2.2).....	196
Figure 10.7-5 : Relation entre l'angle d'orientation (ψ_1) et le ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ en fonction de α_{s1} , λ_{1N} et des physiologies végétales, 10 novembre 2006 et 13 mai 2007.....	198

Figure 10.7-6 : Relation entre l'angle d'orientation (ψ_1) et le ratio $\sigma_{135}^0 / \sigma_{45}^0$ en fonction de α_{s1} , λ_1 et des physiologies végétales, 10 novembre 2006 et 13 mai 2007	199
Figure 10.8-1 : 10 novembre 2006, relation entre α_{s1} et le <i>span</i> , (A), α_{sg} et le <i>span</i> (B).....	200
Figure 10.8-2 : Relation entre la troisième valeur propre (λ_{3N} et λ_3) et σ_{hv}^0	202
Figure 11.1-1 : Variations du niveau d'eau dans la région du Lac St-Pierre entre novembre 2006 et fin mai 2007	207
Figure 11.1-2 : Détection des marécages par seuillage du paramètre α_{s1} et du ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$, erreurs d'omissions et de commissions	208
Figure 11.1-3 : Extraction par seuillage des secteurs des marécages arborescents et arbustifs, 10 novembre 2006	210
Figure 11.1-4 : Extraction par seuillage des secteurs de marécages arborescents et arbustifs, 13 mai 2007.....	212
Figure 11.2-1 : Exemple d'un site de hauts marais à <i>Phalaris arundinacea</i>	214
Figure 11.2-2 : Évolution saisonnière de la signature spectrale d'un site dense de <i>Phalaris arundinacea</i> ([H2-88]), images Landsat de 2009	215
Figure 11.2-3 : Comparaison de l'évolution saisonnière de la signature spectrale du <i>Phalaris arundinacea</i> [H2-88] à celle des peuplements de feuillus et de conifères, année 2009	216
Figure 11.2-4 : Différences entre novembre 2006 et mai 2007 des canaux de polarisation ...	217
Figure 11.2-5 : Différences entre novembre 2006 et mai 2007, type dominant de rétrodiffusion symétrique.....	218
Figure 11.2-6 : Évolution temporelle des canaux de polarisation et des paramètres de la décomposition de Touzi (sélection) pour un secteur de haut-marais herbacé (H2-88, <i>Phalaris Arundinacea</i>).....	220
Figure 11.2-7 : Valeurs par objet des des marais herbacés ([H2], c171) et des tourbières ouvertes ([A3] [h1], c61) entre novembre 2006 et mai 2007 pour $\Phi_{\alpha s1}$ et λ_{1N}	221
Figure 11.2-8 : Évolution temporelle par objets de la phase $\Phi_{\alpha s1}$ comparée à celle des canaux de polarisation et des paramètres de décomposition, marais herbacés (H2, c171) et tourbières ouvertes (A3, c61).....	222
Figure 11.3-1 : Évolution saisonnière de la signature spectrale d'un site de bog à arbrisseaux et d'un site de fen herbacé, tourbière de la Baie des Mines	223
Figure 11.3-2 : Comparaison des canaux de polarisation et du <i>Span</i> entre les deux acquisitions ALOS.....	225
Figure 11.3-3: Comparaison du type symétrique de rétrodiffusion et des valeurs propres des deux dates d'acquisition ALOS.....	226
Figure 12.1-1 : Aide-mémoire pour la conversion (A) des unités d'intensité en dB et (B) des jours juliens en jours calendaires.....	238
Figure 12.1-2 : Évolution du niveau de l'eau du lac Saint-Pierre par rapport au zéro hydrographique, année 2009; les barres verticales indiquent les dates d'acquisition des données RS2.....	238
Figure 12.2-1 : Signatures saisonnières du Typha (<i>Typha angustifolia</i> ou <i>latifolia</i>) [H1-38] (colonne de gauche) et de l'Acore odorante (<i>Acorus calamus</i>) [H1-35] (colonne de droite); série FQ15-A.....	240
Figure 12.2-2 : Signatures saisonnières du Maïs [H1, 2-2]; en lignes pleines série FQ15-A, en lignes pointillées série FQ21-D.....	244
Figure 12.2-3 : Signatures saisonnières du <i>Phalaris</i> (<i>Phalaris arundinacea</i>) [H2-88] (colonne de gauche) et de la Zizanie (<i>Zizania sp.</i>) [H2-21] (colonne de droite); série FQ15-A.....	248

Figure 12.2-4 : Signatures saisonnières du Blé [H2, 3-3] et du Foin [1-1]; série FQ15-A en trait plein, série FQ21-D en trait pointillé.....	250
Figure 12.2-5 : Signatures temporelles de : Eleocharis [h1-31] (1 ^{ère} col.), Scirpe des rivières [h1-27] (2 ^e col.),	256
Figure 12.3-1 : Signatures saisonnières des marécages arborés [A1-131] (1 ^{ère} col.); marécages arbustifs [A2-62] (2 ^e col.) et des physionomies arborées sur substrat sec [A1-63&65] (3 ^e col.). Séries FQ15-A (trait plein) et FQ21-D (trait pointillé).....	258
Figure 12.3-2 : Évolution temporelle des physionomies arborées sur substrat sec, série FQ21-D	260
Figure 12.4-1 : Signatures saisonnières des tourbières ouvertes [A3, h1] (1 ^{ière} col.) et boisées [A1, A2] (2 ^e col.), série FQ21-D	263
Figure 12.4-2 : Signatures saisonnières des Bogs à arbrisseaux [A3] (1 ^{ière} colonne) et des fens herbacés pauvres [h1] (2 ^e colonne), série FQ21-D.....	264
Figure 12.5-1 : Évolution temporelle des physionomies végétales des marais et des milieux secs pour α_{s1} et $\Phi_{\alpha s1}$ (série FQ15-A)	267
Figure 12.5-2 : Évolution temporelle des physionomies végétales des marais et des milieux secs pour λ_{1N} et A (série FQ15-A).....	269
Figure 12.5-3 : Position des physionomies végétales dans l'espace $\lambda_3 - \sigma_{hv}^0$	271
Figure 12.5-4 : Relation entre σ_{hv}^0 et λ_3 en fonction de l'angle d'orientation dominant ψ_1 , 18 septembre 2009, série FQ15-A.....	272
Figure 12.5-5 : Évolution temporelle du canal σ_{hv}^0 , de la troisième valeur propre λ_3 et de l'angle d'orientation ψ_1 pour un bas marais à Scirpes, série FQ15-A	273
Figure 14.1-1 : Signatures saisonnières comparatives des physionomies végétales du Lac Saint-Pierre par paramètre polarimétriques, série FQ15-A	293
Figure 14.1-2 : Arbre hiérarchique de classification.....	294
Figure 14.1-3 : Classification finales	298
Figure 14.1-4 : Comparaison des classifications, zone 1	302
Figure 14.1-5 : Comparaison des classifications, zone 2	303
Figure 14.1-6 : Comparaison des classifications, zone 3	304
Figure 14.2-1 : Vérité terrain, Classification CSL regroupée et cultures.....	306
Figure 14.3-1 : Classification SVM, configuration 1A à 1D.....	311
Figure 14.3-2 : Classification SVM, configuration 2A et 2B.....	312
Figure 14.3-3 : Classification SVM, configuration 3A et 3B (Landsat-5).....	312
Figure 14.3-4 : Vue générale, similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D	313
Figure 14.3-5 : Détail de la similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D, série FQ15-A, 2009, zone 1	317
Figure 14.3-6 : Détail de la similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D, série FQ15-A, 2009, zone 2	317
Figure 14.3-7 : Détail de la similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D, série FQ15-A, 2009, zone 3	318
Figure 14.3-8 : Détail de la similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D, série FQ15-A, 2009, zone 4	318
Figure 15.2-1 : Représentation de l'acrotelme et du catotelme	325
Figure 15.3-1 : Caractéristiques typiques de deux paramètres décrivant la conductivité hydraulique (k) des sols organiques	326

Figure 16.1-1 : Baie des Mines, évolution temporelle de la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et de la différence de phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$, 2006 et 2007	329
Figure 16.1-2 : Tourbière de la Baie des Mines, situation régionale et direction de l'écoulement de l'eau.....	331
Figure 16.1-3 : ALOS-PALSAR, tourbière de la Baie des Mines, angle d'orientation ψ_1 , nov. 2006 et mai 2007	332
Figure 16.2-1 : Évolution de la réflectance (Saison 2009).....	334
Figure 16.2-2 : Évolution temporelle des deux premières valeurs propres ($\lambda_{1N}, \lambda_{2N}$) et de la polarisation croisée (σ_{hv}^0), série temporelle FQ21-D, saison 2009	338
Figure 16.2-3 : Évolution du type global et dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{sg}, α_{s1}) et de la phase de Touzi ($\Phi_{\alpha_{s1}}$), série temporelle FQ21-D, saison 2009	342
Figure 16.2-4 : Valeurs propres ($\lambda_{1N}, \lambda_{2N}$), polarisation croisée (σ_{hv}^0) et paramètres α_{s1} , $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et α_{sg} de la décomposition de Touzi, image FQ02-A, 2009-11-26.....	344
Figure 16.2-5 : Comparaison du comportement de la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ pour deux images ALOS-PALSAR et deux images RADARSAT-2	346

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1-1 : Bandes micro-ondes (déjà utilisées ou couramment utilisées en télédétection)	14
Tableau 2.1-2 : Principales caractéristiques des faisceaux RADARSAT-2 en mode polarimétrique fin (FQ)	19
Tableau 3.4-1 : Résumé des paramètres de la décomposition <i>TSVM</i> de Touzi (Touzi, 2007) et comparaison (analogie) avec les paramètres de la décomposition de Cloude et les canaux de polarisation	58
Tableau 3.5-1 : Interprétation des mécanismes de rétrodiffusion en fonction de la fréquence	62
Tableau 5.4-1 : Niveaux de perception et échelles cartographiques du Système de Classification des Milieux Humides du Québec (SCMHQ)	74
Tableau 5.5-1 : Classes physionomiques de la classification de Jeglum	80
Tableau 6.1-1 : Études portant sur les milieux humides faisant appel aux données radar	85
Tableau 6.2-1 : Imagerie radar optimale pour des applications écologiques et hydrologiques reliées aux milieux humides (adapté de)	86
Tableau 6.2-2 : Regroupement des classes morphologiques	90
Tableau 6.2-3 : Indices biophysiques radar	92
Tableau 6.2-4 : Indice de séparabilité pour quelques classes de tourbière	94
Tableau 7.2-1 : Physionomies végétales basées sur la notion de strates végétales	103
Tableau 7.2-2 : Types de physionomies proposées par le NWWG (1997)	104
Tableau 8.3-1 : Données ALOS-PALSAR-PLR	113
Tableau 8.3-2 : Données RADARSAT-2 (année-mois-jour)	114
Tableau 8.4-1 : Images Landsat-5 et Landsat-7 (Path14/Row28) utilisées comme données de support	115
Tableau 9.2-1 : Classes de physionomies végétales	125
Tableau 9.2-2 : Biomasse aérienne totale (ABG) et productivité journalière du <i>Typha latifolia</i> et du <i>Phalaris arundinacea</i> pour un marais d'eau douce du Wisconsin (43°31'N, 88°25'W)	132
Tableau 9.2-3 : Classes de densité et de hauteur des peuplements forestiers de la carte écoforestière du Québec	137
Tableau 9.2-4 : Biomasses aériennes moyennes (g m^{-2}) pour un site de Bog et un site de Fen pauvre de la tourbière de la Mer Bleue	139
Tableau 9.3-1 : Sources des données sur les physionomies végétales à l'étude	143
Tableau 9.3-2 : Répartition du nombre d'objets et d'échantillons par classe de physionomie végétale	147
Tableau 9.3-3 : Répartition du nombre d'objets par classe physionomique	149
Tableau 10.5-1 : Sommaire des objets par classes physionomiques avec une anisotropie supérieure à 0,3, 10 novembre 2006	178
Tableau 11.1-1 : Différence des paramètres α_{s1} , α_{sg} et α_C pour les classes physionomiques de marécages arbustifs (c181) et arborés (c191)	206
Tableau 11.1-2 : Détection des zones de marécages arborés par seuillage, erreurs de commission pour une erreur d'omission fixée à 15%	208

Tableau 11.4-1 : Séparabilités moyennes par groupe de physionomies et entre groupes de physionomies obtenues avec l’algorithme de la divergence transformée, 10 novembre 2006	228
Tableau 11.4-2 : Séparabilités des classes de physionomies végétales des milieux humides mesurée avec la divergence transformée	234
Tableau 12.2-1: Biomasse aérienne totale (ABG) et productivité journalière du <i>Typha latifolia</i> et du <i>Phalaris arundinacea</i> pour un marais d’eau douce du Wisconsin (43°31’N, 88°25’W)	247
Tableau 12.2-2 : Rendements annuels (t / ha) pour quelques grandes cultures du Québec	251
Tableau 12.4-1 : Valeurs propres normalisées et <i>span</i> des tourbières ouvertes et boisées, saison 2009, série FQ21-D	265
Tableau 13.1-1 : Séparabilité moyenne totale par configuration et par date	278
Tableau 13.2-1 : Détail des séparabilités entre les classes physiologiques des marais pour les configurations A4, E1 et H1	281
Tableau 13.2-2 : Détail des séparabilités entre les classes physiologiques arborées et celles des marais pour les configurations A4, E1 et H1	282
Tableau 13.2-3 : Détail des séparabilités entre le <i>Typha</i> [H1-38] et les espèces végétales de la classe physiologiques [H2] pour les configurations E1 et H1	283
Tableau 13.2-4 : Détail des séparabilités entre les classes physiologiques des marais et celles des cultures pour les configurations A4, E1 et H1	285
Tableau 13.2-5 : Séparabilités entre les classes physiologiques des tourbières boisées et ouvertes vs les physiologies arborées pour les configurations A4, E1 et H1	287
Tableau 13.2-6 : Séparabilités entre les classes physiologiques des tourbières boisées et ouverte vs les physiologies arborées pour la configuration E2	288
Tableau 14.1-1 : Matrices de confusion, classification RS2 hiérarchique et Landsat-5 MLC, saison 2009, série FQ15-A	301
Tableau 14.2-1 : Paramètres et images utilisés pour les différentes classifications SVM	307
Tableau 14.3-1 : Résultats des classifications SVM	308
Tableau 14.3-2 : Matrice de confusion, classification SVM configuration 1A	309
Tableau 14.3-3 : Matrice de confusion, classification SVM configuration 1C	309
Tableau 14.3-4 : Matrice de confusion, classification SVM configuration 2A	310
Tableau 14.3-5 : Matrice de confusion, classification SVM configuration 3A	310
Tableau 14.3-6 : Comparaison entre la classification hiérarchique et la classification SVM (config. 1D)	314
Tableau 15.2-1 : Principales distinctions entre l’acrotelme et le catotelme d’une tourbière ..	324
Tableau 16.2-1 : Résumé des conditions météorologiques et des valeurs attendues et observées de la phase Φ_{α_1} , série FQ21-D, saison 2009	342

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

BNDT	Base nationale de données topographiques (du Québec, 1: 20 000)
BDCA	Base de données des cultures assurées (du Québec, 1: 20 000)
CSL	Centre Saint-Laurent (Classification des milieux humides du Québec)
D/H	Classe de densité-hauteur (de la carte écoforestière du Québec)
dB	Décibels
d.t	Divergence transformée (Algorithme de la)
FQ	Mode polarisée fin du satellite Radarsat-2 (Fine-Quad polarisation)
ICTD	Décomposition incohérente (d'une cible) (<i>Incoherent Target Decomposition</i>)
j.j	Jour julien
LOS	Ligne de visée du radar (Radar <i>line of sight</i>)
MNÉ	Modèle numérique d'élévation
MLC	Classification par maximum de vraisemblance (<i>maximum likelihood classifier</i>)
NTS	Système national de référence cartographique (du Canada, 1: 50 000) (<i>National Topographic System</i>)
RS1	RADARSAT-1
RS2	RADARSAT-2
RSO	Radar à synthèse d'ouverture
RSOPOL	Radar à synthèse d'ouverture polarimétrique
SIEF	Système d'information écoforestière (du Québec, 1: 20 000)
SLC	Données complexes à visée simple (<i>Single look complex</i>)
SVM	Machine à vecteur de support (<i>support vector machine</i>)
TSVM	<i>Target scattering vector model</i>
R_x	Réception (du signal radar)
T_x	Transmission (du signal radar)
$T_x R_x$	Antenne de transmission-Réception
ha	hectares
km^2	Kilomètres carrés
m^2	Mètres carrés

LISTE DES SYMBOLES

- Décomposition de Touzi
 - α_{s1} Magnitude du type dominant de rétrodiffusion symétrique
 - α_{s2} Magnitude second type de rétrodiffusion symétrique
 - α_{s3} Magnitude du troisième type de rétrodiffusion symétrique
 - α_{sg} Type global de rétrodiffusion symétrique
 - Φ_{as1} Phase du type dominant de rétrodiffusion symétrique
 - Φ_{as2}, Φ_{as3} Phase du second et troisième type de rétrodiffusion symétrique
 - $\tau_1, |\tau_1|$ Première hélicité et valeur absolue de la première hélicité
 - $\tau_2, |\tau_2|$ Seconde hélicité et valeur absolue de la seconde hélicité
 - τ_3 Troisième hélicité
 - ψ_1, ψ_2, ψ_3 Premier, second et troisième angle d'orientation
 - m_1, m_2, m_3 Première, seconde et troisième amplitude maximale normalisée
- Décomposition de Cloude
 - $\bar{\alpha}_C$ Type de rétrodiffusion global de Cloude
 - $\bar{\beta}_C$ Angle d'orientation moyen de Cloude
- Décomposition de Freeman
 - F_{odd} Puissance de la composante de surface de la rétrodiffusion totale
 - F_{dbl} Puissance de la composante double-bond // //
 - F_{vol} Puissance de la composante volumique // //
 - $F_{\%odd}$ Composante normalisée de la rétrodiffusion de surface
 - $F_{\%dbl}$ Composante normalisée de la rétrodiffusion double
 - $F_{\%vol}$ Composante normalisée de la rétrodiffusion volumique
- Matrices, vecteurs et valeurs propres
 - $[S]$ Matrice complexe de rétrodiffusion (2x2)
 - $[C]$ Matrice de covariance (3x3)
 - $[T]$ Matrice de cohérence (3x3)
 - vecteurs
 - $\lambda_1, \lambda_3, \lambda_2$ Première, seconde et troisième valeur propre ($[C]$ ou $[T]$) (en dB)
 - $\lambda_{1N}, \lambda_{2N}, \lambda_{3N}$ Première, seconde et troisième valeur propre normalisée
 - A Anisotropie
 - $Span$ Trace de la matrice $[C]$ ou $[T]$ (en dB)
- Canaux de polarisation
 - χ Angle d'ellipticité du vecteur du champ électrique ($\in [-45^\circ, 45^\circ]$)
 - ψ Angle d'orientation du vecteur du champ électrique ($\in [0^\circ, 180^\circ]$)
 - HH Polarisation linéaire horizontale (T_x et R_x horizontale : $\chi=0^\circ, \psi=0^\circ$)
 - VV Polarisation linéaire verticale (T_x et R_x verticale : $\chi=0^\circ, \psi=90^\circ$)
 - HV Polarisation linéaire croisée (T_x horizontale, R_x verticale)

VH	Polarisation linéaire croisée (T_x verticale, R_x horizontale)	
RR	Polarisation circulaire droite ($T_x = R_x : \chi = 45^\circ, \psi = \text{indéfini}$)	
LL	Polarisation circulaire gauche ($T_x = R_x : \chi = -45^\circ, \psi = \text{indéfini}$)	
σ_{hh}^0	Coefficient de rétrodiffusion HH (amplitude ou dB selon de contexte)	
σ_{vv}^0	Coefficient de rétrodiffusion VV	//
σ_{hv}^0	Coefficient de rétrodiffusion HV	//
σ_{rr}^0	Coefficient de rétrodiffusion RR	//
σ_{ll}^0	Coefficient de rétrodiffusion LL	//
σ_{135}^0	Coefficient de rétrodiffusion linéaire 135° ($T_x = R_x : \chi = 0^\circ, \psi = 135^\circ$)	
σ_{45}^0	Coefficient de rétrodiffusion linéaire 45° ($T_x = R_x : \chi = 0^\circ, \psi = 45^\circ$)	
$\phi_{hh} - \phi_{vv}$	Différence de phase entre les canaux HH et VV	

- **Physionomies végétales**

[H1]	herbacée haute 1
[H2]	herbacée haute 2
[h1]	herbacée moyenne 1
[h2]	herbacée moyenne 2
[A1]	arborées
[A2]	arbustives
[A3]	Arbrisseaux
[M]	muscinale (lichens et mousses (sphaignes))
[D]	dénudées (eau libre et sol)

CHAPITRE 1

1. INTRODUCTION

Le terme «milieux humides» ou «terres humides» est une expression générale utilisée pour caractériser “... *un ensemble de sites formant une zone de transition entre les écosystèmes franchement aquatiques et les écosystèmes purement terrestres. [...] Ces sites englobent les sols minéraux mal drainés ainsi que les sols organiques mal drainés sur lesquels croissent des formations végétales herbacées, arbustives et arborescentes*” (Buteau et al., 1994). Il est commun de classer les milieux humides en trois classes générales : les tourbières, les marais et les marécages (Mitsch et Gosselink, 1993; Tarnocai et Stolbovoy, 2006), auxquelles on peut ajouter les eaux peu profondes (NWWG, 1997).

Étant des zones de transition (écotones) entre milieux secs (*uplands*) et l'eau libre, les milieux humides remplissent plusieurs fonctions écologiques spécifiques d'importance. Ils contribuent notamment à la biodiversité de la faune et de la flore en abritant des espèces, parfois menacées, qui s'y sont adaptées. Les marais et marécages aident à stabiliser les berges et les protéger de l'érosion et servent d'étapes d'arrêt dans la migration des oiseaux. Les tourbières contribuent à la purification des eaux (Mitsch et Gosselink, 1993) et remplissent d'importantes fonctions chimiques dans le cycle hydrologique ce qui leur a valu le surnom de «reins du paysage» (Rundquist et al., 2001). Certaines tourbières contribuent également à la régularisation des écoulements en emmagasinant les eaux de pluies et de fonte (Brooks, 1992; Price, 2001; Holden, 2006). Depuis le début des années 1990 c'est surtout le rôle joué par les tourbières dans les cycles du carbone et du méthane qui a retenu l'attention (Christensen, 1993; Roulet, 2000; Moore, 2001). La question étant de savoir si le dégel des grands complexes tourbeux des milieux arctique et subarctique contribuera au réchauffement climatique ou au contraire en atténuera les effets.

Les milieux humides étaient autrefois considérés comme des terres inutiles (*wastelands*) que l'on devait reconquérir (Rydin et Jeglum, 2006) pour faire place à des occupations du sol plus utiles et on les percevait comme des lieux malsains, voire dangereux. Au cours des derniers siècles, des vastes étendues des milieux humides ont disparu (Turetsky et St-Louis, 2006; Rydin et Jeglum, 2006) et les activités humaines y sont pour beaucoup : conversion en terres

agricoles (mondialement $\approx 125\,000\text{ km}^2$), exploitation de la tourbe pour son pouvoir calorifique et foresterie, que ce soit par l'assèchement des tourbières pour augmenter la production forestière (mondialement $\approx 150\,000\text{ km}^2$) ou par la création de routes disséquant ces milieux fragiles (Turetsky et St-Louis, 2006).

Au Canada les pertes des milieux humides sont majoritairement concentrées dans les régions méridionales. On évalue à environ 250 km^2 les superficies des tourbières asséchées pour l'exploitation forestière et environ 1400 km^2 celles transformées en terres agricoles (Rydin et Jeglum, 2006 p.220). Dans la vallée du Saint-Laurent, en particulier, de nombreux milieux humides ont fait place à l'agriculture, au développement urbain et à l'exploitation de la tourbe (chauffage, horticulture). L'expansion urbaine et de villégiature le long des berges a également contribué à la disparition ou à la dégradation de nombreux marais. Depuis plus de 20 ans, il est reconnu que les grands complexes tourbeux des environnements subarctiques et arctiques sont affectés indirectement par l'activité humaine, notamment, par les pluies acides et les changements climatiques qui affectent le pergélisol (Moore, 2001; Turetsky et St-Louis, 2006; Tarconai et Stolbovoy, 2006).

Aujourd'hui la conservation et la protection des milieux humides commencent à devenir une priorité pour plusieurs états à travers le monde. Ce qui se traduit par des nombreux lois et règlements adoptés au niveau national ainsi que des traités et des conventions au niveau international. Parmi ces dernières, la convention RAMSAR est sans doute la mieux connue. Établie en 1971 et signée par 160 pays, elle fait des milieux humides le seul écosystème dont la conservation a été reconnue à la suite d'une convention internationale. Actuellement, à l'échelle mondiale, ce sont 1650 zones humides pour une superficie totale de 149.6 millions d'hectares qui sont reconnues par cette convention (RAMSAR, 2007a). Au Canada, treize millions d'hectares de milieux humides répartis dans 37 sites sont protégés en vertu de cette convention (RAMSAR, 2007b). Au Québec, 11 952 ha du Lac Saint-Pierre, 2310 ha du lac Saint-François et 2215 ha du marais de Cap-Tourmente sont protégés RAMSAR (RAMSAR, 2007b). Même s'il existe une reconnaissance croissante de l'importance de protéger ces milieux, il n'en demeure pas moins que leur intégrité est encore menacée. L'inventaire et le suivi systématique de ces milieux deviennent une nécessité.

1.1. Inventaire et suivi des milieux humides

Il n'est pas possible actuellement de dresser un inventaire complet de la répartition et de la superficie couverte par les milieux humides et de connaître les modifications survenant dans ces milieux. Concernant les tourbières, l'une des estimations les plus complètes, produite par l'*International Mire Conservation Group* (IMCG), montre qu'elles couvriraient environ 4.16×10^6 km² soit 3% des terres émergées mondialement (Wieder et Vitt 2006; Rydin et Jeglum, 2006). Les tourbières peuvent être retrouvées dans une grande variété de biomes, mais se distribuent majoritairement dans les régions boréales et subarctiques de l'hémisphère nord. À eux seuls le Canada et la Russie, possèdent plus de 65% des tourbières mondiales (Vitt, 2006). Plus de 150 millions d'hectares de terres humides recouvrent les différentes régions biogéoclimatiques du Canada ce qui représente 24% des terres humides du monde (NWWG, 1997). Selon les estimations, au début du 21^{ème} siècle les tourbières occupaient au Québec entre 9% et 12% des milieux terrestres alors qu'au Canada elles occupaient entre 12% à 20% du territoire (Payette et Rochefort, 2001).

Malgré donc les pertes importantes subies par le passé, les milieux humides occupent encore de très grandes superficies qu'il est virtuellement impossible de cartographier par interprétation d'images optiques aériennes de haute résolution soutenue d'enquêtes sur le terrain, comme il se fait habituellement aujourd'hui (Kasischke et Bourgeau-Chavez, 1997; Ozesmi et Bauer, 2002). Ces milieux sont souvent difficiles d'accès et/ou loin des zones habitées ce qui rend les enquêtes sur le terrain et/ou l'acquisition d'images aériennes davantage difficiles. Dans une perspective de protection et de conservation de ces milieux il est non seulement impératif de procéder à leur inventaire, mais également de développer des outils diagnostiques permettant de décrire leur état de santé et de reconnaître et/ou prévoir le changement de leur état. Ce qui a été clairement démontré par des enquêtes auprès des organismes chargés de la cartographie et de la protection des milieux humides. Nous pouvons citer la vaste enquête lancée en 2001 dans le cadre de l'initiative de l'Agence spatiale européenne *Treaty Enforcement Services using Earth Observation* (TESEO), visant l'évaluation du potentiel de l'imagerie satellitale pour l'étude des milieux humides dans le

cadre de la convention RAMSAR (Wessels et *al.*, 2003). De cette enquête il est ressorti que les informations clés portaient sur (Ball et *al.*, 2003; Wessels et *al.*, 2003) :

- ii. L'identification et la description physique des milieux humides;
- iii. Le suivi des changements (selon un cycle de 2 à 5 ans) de la végétation des milieux humides, de l'utilisation du sol dans leur pourtour, ainsi que l'identification des espèces invasives et des pressions environnementales;
- iv. La qualité de l'eau.

Le recours à l'imagerie satellitale devient donc une nécessité. La télédétection par satellite à orbite basse (environ 800 km) comprend actuellement une panoplie de capteurs dont l'imagerie peut satisfaire ces besoins d'inventaire et de suivi des milieux humides à des échelles de perception du territoire variées.

Les images à des résolutions spatiales de quelques dizaines de mètres par la vue synoptique qu'elles offrent du territoire, constituent une alternative réaliste et efficace à l'imagerie aéroportée afin de procéder à de vastes inventaires des milieux humides à intervalles réguliers (Fournier et *al.*, 2007). Cet avantage offert par l'imagerie à des résolutions moyennes est également reconnu dans le cadre du protocole de Kyoto où elle est perçue comme un médium d'information qui permettra de supporter ce protocole (Rosenqvist et *al.*, 2003; 2007). L'arrivée massive de l'imagerie radar dans les années 1990 a mis l'inventaire et surtout le monitoring des ressources naturelles sur des nouvelles bases. Les radars munis de leur propre source de rayonnement, ils sont capables d'opérer jour et nuit. De plus l'atmosphère terrestre est quasi-transparente au rayonnement utilisé dans les micro-ondes (longueurs d'onde d'environ 1 cm à 100 cm). Ainsi, contrairement aux images multispectrales, tout territoire peut être observé durant toute une année sans encombre. Ceci est particulièrement important pour des régions recelant de vastes complexes de milieux humides comme les régions nordiques avec des conditions d'éclairement solaire déficientes pour une longue période, de même que des régions tropicales, fréquemment sous les nuages. Bien qu'elles soient souvent à un stade expérimental, les études visant l'intégration de ce type d'imagerie dans l'inventaire et le suivi des milieux humides sont nombreuses. À titre d'exemple, dans le cadre du projet *Global Forest Mapping* (GRFM/GBFM) initié par l'agence spatiale japonaise (JAXA), deux mosaïques d'images radar du satellite JERS-1 couvrant la presque totalité du Canada et de l'Alaska pour l'hiver 1997 et l'été 1998 ont pu être établies (JAXA-GFMP, 2005). Ces

mosaïques ont été utilisées entre autres pour la cartographie des milieux humides (Moghaddam et *al.*, 2003) pour le territoire complet de l'Alaska (Whitcomb et *al.*, 2007). Le projet Siberia-II (Siberia-II, 2005; Schmullius et *al.*, 2003; Bartsch et *al.*, 2006; 2007) en est un autre exemple. Ici, parmi d'autres données, l'imagerie radar provenant du satellite européen ENVISAT a été utilisée pour une caractérisation tout azimut des milieux humides sibériens. Plus près de nous, le projet ATLAS pour l'inventaire des milieux humides dans la vallée du Saint-Laurent initié par le Service canadien de la faune (Deslandes et *al.*, 2002) ainsi que celui de l'Inventaire Canadien des Terres Humides (ICTH) en sont d'autres exemples. L'ICTH a mis sur pied un prototype pour réaliser l'inventaire national des milieux humides basé sur l'utilisation synergétique de l'imagerie multispectrale de Landsat et radar de RADARSAT-1 à des fins d'inventaire des terres humides canadiennes de plus d'un hectare (Grenier et *al.*, 2007; Fournier et *al.*, 2007).

Les images multispectrales de résolution métrique provenant des satellites, disponibles depuis la fin des années 1990, sont également de plus en plus utilisées pour les inventaires détaillés des milieux humides. Nous pouvons citer l'inventaire des milieux riverains du Saint-Laurent par le Centre Saint-Laurent avec l'imagerie Ikonos de 4 m de résolution spatiale (Létournau et Jean, 2006). L'utilisation restreinte des images radar dans ce type d'inventaires peut s'expliquer par le fait que jusqu'à tout récemment les images à des résolutions métriques (p.ex. RADARSAT-1 en mode fin, résolution spatiale d'une dizaine de mètres) n'offraient qu'un potentiel très limitée pour la cartographie détaillée des milieux humides (une seule fréquence et une seule configuration de polarisation). Grâce à la capacité des micro-ondes de pénétrer plus profondément dans une canopée végétale que le rayonnement solaire et à des phénomènes de rétrodiffusion des ondes spécifiques au radar, ces images permettaient la détection plus aisée des milieux humides arborés riverains inondés suite aux crues printanières. En formant des séries multi-temporelles de ces images, ce qui est très aisé comme nous l'avons mentionné, il était aussi possible de distinguer certaines formations végétales soit par les différences dans leur cycle de croissance soit par leurs textures particulières à un moment précis dans le temps.

Depuis quelques années maintenant la nouvelle génération des images radar est disponible. Les radars des satellites comme ALOS-PALSAR, TerraSAR-X et RADARSAT-2 acquièrent leurs données selon différentes configurations de polarisation offrant ainsi, en principe, un

plus grand potentiel que leurs prédécesseurs pour l'inventaire et le suivi des milieux humides à des échelles fines. C'est justement l'évaluation du potentiel des données radar à polarisation multiple pour l'inventaire et le suivi des milieux humides à ces échelles qui est l'objectif principal de notre recherche.

1.2. Évaluation du potentiel des données radar multipolarisées : problématique

La polarisation est définie par convention comme l'orientation du vecteur électrique d'une onde électromagnétique à un instant précis. Si cette orientation demeure stable dans le temps on parle d'une onde de polarisation linéaire et dans le cas contraire d'une onde de polarisation circulaire (elliptique dans un cas général).

Depuis longtemps la polarisation du rayonnement micro-ondes est reconnue comme un paramètre crucial, au même titre que la fréquence des ondes et l'angle d'incidence du faisceau radar, pour la reconnaissance des objets et la compréhension des leurs caractéristiques (Boerner et *al.*, 1998). Dans un contexte d'inventaire et de suivi des milieux humides, selon des essais effectués surtout avec l'imagerie radar aéroportée et des diffusiomètres micro-ondes, il appert qu'en choisissant judicieusement les trois paramètres de base d'opération d'un radar (fréquence, polarisation, angle d'incidence) nous pouvons :

- i. Obtenir une information précise sur le volume végétal grâce à la pénétration des micro-ondes profondément dans les canopées végétales particulièrement dans les bandes L (longueur d'onde d'environ 25 cm) et P (longueur d'onde d'environ 75 cm). À titre d'exemple dans le cas des peuplements forestiers l'estimation de la biomasse peut aller jusqu'à 100 t/ha (Imhoff, 1995) et même 250 t/ha (Kasischke et *al.*, 1997) selon le type de forêt. Tel que mentionné, cette pénétration favorise aussi la détection des zones inondées sous les canopées (Bourgeau-Chavez et *al.*, 2001), de première importance pour la délimitation exacte des milieux humides;
- ii. Obtenir une information précise sur les caractéristiques géométriques des surfaces visées ou leur contenu en eau (Slaton et *al.*, 1996; Kasischke et *al.*, 1997). L'eau, qu'elle ce soit dans les composantes de la végétation (feuilles, branches, tronc, tiges, brindilles...) ou le sol, influence principalement les propriétés électriques des cibles qui à leur tour modulent le signal rétrodiffusé. Par le choix approprié de la polarisation et de l'angle d'incidence du

faisceau radar on peut maximiser la sensibilité du signal aux variations de ces propriétés et donc aux variations de la teneur en eau. Pour leur part la structure et l'architecture du couvert végétal et la rugosité des sols définissent les caractéristiques géométriques des surfaces visées. Ici aussi par le choix approprié de la polarisation et de l'angle d'incidence du faisceau radar on peut maximiser la sensibilité du signal aux propriétés géométriques des objets tandis que la longueur d'onde fixe la taille des éléments structuraux ou du microrelief détectables par le radar. Dans le cas des milieux humides dû au polymorphisme du couvert végétal et la présence des sols sous-jacents avec souvent un haut taux d'humidité, cette sensibilité aux propriétés électriques et géométriques des surfaces visées peut conduire à une identification exacte des types des milieux humides et, combinés à la capacité de pénétration des micro-ondes, à la compréhension de leur régime hydrique (Kasischke et *al.*, 1997).

Les radars imageurs modernes à bord des satellites émettent d'impulsions d'ondes quasi-monochromatiques (mono-fréquence) cohérentes en polarisation linéaire horizontale (H) et/ou verticale (V) et isolent lors de la réception la composante horizontale et/ou verticale des ondes rétrodiffusées par les surfaces visées. Les radars mis en orbite dans les années 1990 étaient dotés d'antennes (émission et réception du signal) et de circuits électriques associés capables de reproduire l'intensité et la phase du signal rétrodiffusé par élément de résolution en une seule configuration de polarisation parallèle (HH ou VV). Ceci grâce à la mesure de la composante en phase (I) et de la composante en quadrature de phase (Q) du signal électromagnétique complexe. L'intensité servait pour créer des images radar tandis que la phase aux analyses interférométriques. Le premier radar à introduire différentes configurations de polarisation était l'ASAR à bord du satellite ENVISAT. Ici l'antenne était scindée en deux parties chacune pouvant émettre et/ou recevoir en quasi-synchronisme en deux polarisations différentes. Ainsi les mesures en polarisation parallèle-parallèle (HH-VV) ou parallèle-croisée (HH-HV; VV-VH) étaient possibles (polarisation duale). Comme précédemment les intensités servaient à la création des images (deux canaux) tandis que la phase en polarisation parallèle (HH ou VV) aux analyses interférométriques. Les radars mis en orbite récemment ont les mêmes capacités de mesure des radars des générations précédentes (polarisation simple ou polarisation duale) et de plus offrent la possibilité des mesures en polarisation quadruple en quasi-synchronisme (HH-HV-VH-VV). Dans ce dernier mode d'opération grâce à un étalonnage minutieux, l'émission des ondes en polarisation H et V peut se mettre au même

référentiel de phase ce qui mène à la mesure des quatre signaux par élément de surface visée constituant un ensemble cohérent (matrice de diffusion). C'est la base pour pratiquer les principes de la discipline de polarimétrie radar dont le but est la reconstitution complète de l'onde rétrodiffusée durant le moment d'observation indépendamment de la configuration de la polarisation en émission et en réception du signal. C'est ce mode d'opération qui nous a intéressés dans cette recherche.

L'accès à la matrice de diffusion offre plusieurs voies d'analyse et ainsi différentes façons pour évaluer le potentiel des images radars à polarisation multiple. Une des voies possibles est de synthétiser l'intensité du signal par pixel qui aurait dû être mesuré à la même fréquence avec des configurations de polarisation quelconques (linéaires et/ou circulaires). Les images ainsi créées peuvent être considérées comme des canaux différents d'une manière analogue aux canaux d'une image multispectrale. À ces canaux d'intensité, nous pouvons ajouter d'autres canaux comme celui représentant la différence de phase entre les configurations parallèles (HH-VV). Différentes approches de classification/segmentation d'images peuvent être alors appliquées afin de tester le pouvoir des images multipolarisées de reconnaître diverses classes des milieux humides et/ou différentes formations végétales. Une autre voie possible est de soumettre en premier lieu les matrices de diffusion à ce qu'on appelle les «décompositions polarimétriques». Ces décompositions nous donnent accès à une série de paramètres par pixel ou groupe de pixels (anisotropie, entropie, phase polarimétrique, etc.) qui sont en principe intimement liées aux propriétés électriques et géométriques des cibles visées. Elles peuvent ainsi être utilisées comme moyen de discrimination des milieux humides et/ou des leurs formations végétales. C'est cette voie d'analyse qui nous a intéressés le plus dans cette recherche.

Peu importe la voie que l'on emprunte, pour arriver à des résultats concluants il faut dès le départ fixer le type d'information recherchée. Comme le signal radar est influencé surtout par les propriétés géométriques et électriques des objets nous ne pouvons pas espérer reconnaître les espèces végétales qui couvrent la surface au même titre que les signaux provenant du rayonnement solaire réfléchi comme on le fait avec l'imagerie multispectrale. Nous travaillerons plutôt sur la base des physiologies végétales.

1.3. Objectifs et hypothèses

L'objectif de notre recherche est de contribuer à l'inventaire détaillé des milieux humides et de leur régime hydrique en se servant d'informations extraites des décompositions polarimétriques. Pour ce faire, nous avons fixé les objectifs spécifiques suivants :

- i. Analyser les données polarimétriques en relation aux propriétés géométriques des physiologies végétales présentes dans les milieux humides et conclure sur les possibilités de discrimination entre les diverses physiologies végétales;
- ii. Comparer les résultats obtenus avec les paramètres de décomposition polarimétrique à ceux obtenus avec des canaux de polarisation synthétisés par les données polarimétriques afin de conclure sur le gain en information offert par les décompositions comparativement aux données multipolarisées.

Pour mieux circonscrire notre problème, nous avons décidé de limiter nos analyses aux milieux humides représentatifs des régions tempérées froides du Canada incluant toutes les classes générales : tourbières, marais, marécages et eaux peu profondes. La disponibilité de plusieurs données de base pour supporter nos analyses, la diversité des formations végétales et l'accessibilité des lieux nous ont fait opter pour les milieux humides du Lac Saint-Pierre. Les données polarimétriques utilisées proviennent du satellite ALOS-PALSAR (bande L) et du satellite RADARSAT-2 (bande C) pour les années 2006, 2007 et 2009. Les données RADARSAT-2 ont été acquises en séries temporelles couvrant l'ensemble de la saison de croissance de l'année 2009. Cela nous permettra d'évaluer l'apport de la dimension temporelle aux côtés de la dimension polarimétrique pour la caractérisation et la classification des physiologies végétales des milieux humides. Les études effectuées dans le domaine des milieux humides par radar nous laissent entrevoir que l'approche fondée sur des classes de physiologie végétale est mieux adaptée au contenu informationnel de l'imagerie radar. On retrouve par ailleurs quelques études ayant exploité la notion de structure du couvert végétal pour la classification des milieux humides (Noernberg et *al.*, 1999; Parmuchi et *al.*, 2002) et naturels (Dobson et *al.*, 1995a; Pierce et *al.*, 1998) basées sur l'imagerie radar. C'est l'une des hypothèses à valider par notre recherche.

Concernant les méthodes de décomposition polarimétrique, plusieurs en sont proposées dans la littérature. Parmi les plus adaptées à l'étude des surfaces étendues nous émettons

l'hypothèse que la décomposition de Touzi (Touzi, 2007a) offre les paramètres les plus appropriées pour discriminer entre formations végétales et qu'en général les décompositions polarimétriques apportent plus d'information que les images multipolarisées.

1.4. Contribution de la recherche à l'avancement des connaissances

Malgré une vingtaine d'années de recherche dans le domaine démontrant son potentiel, la polarimétrie radar reste sous-utilisée en ce qui concerne la cartographie et le suivi des ressources naturelles et des milieux humides en particulier. En ce sens, notre recherche contribuera à une meilleure maîtrise de cette approche. De plus, bon nombre de recherches actuelles s'intéressent plus au développement des classificateurs qu'à la compréhension de la relation entre les paramètres polarimétriques et le milieu à classifier. Si nos hypothèses étaient vérifiées nous aurons :

- i. Une compréhension approfondie des relations existant entre les paramètres de la décomposition de Touzi et les classes de physiologies végétales en fonction, notamment, des conditions environnementales et de l'évolution saisonnière des physiologies;
- ii. Une amélioration de la discrimination entre milieux secs et humides sans avoir recours à des données auxiliaires;
- iii. Une contribution significative de la polarimétrie radar pour l'amélioration de l'inventaire des milieux humides basé sur le concept des physiologies végétales.

1.5. Structure de la thèse

Le sujet abordé dans cette recherche pose plusieurs questions. Ainsi, nous avons cru bon de la diviser en six parties. Dans la première partie (chapitres 2 et 3) nous faisons un rappel des principes de fonctionnement d'un radar polarimétrique satellital. Nous examinerons également les bases de la polarimétrie radar et les décompositions polarimétriques qui sont la méthode d'extraction de l'information que nous avons privilégiée dans cette recherche. Dans la deuxième (chapitres 4 à 7) partie nous passons en revue la littérature concernant les applications des images et des données polarimétriques dans le cas des milieux humides. Cette partie se conclut avec notre proposition d'un système de classification basé sur les physiologies végétales. Ces deux premières parties nous mènent à mieux préciser notre

protocole expérimental pour atteindre notre objectif et valider nos hypothèses. Ce protocole expérimental est l'objet de la troisième partie de la thèse (chapitres 8 et 9). Les parties quatre à six constituent le cœur de notre expérimentation. La quatrième (chapitres 10 et 11) et la cinquième partie (chapitres 12 à 14) présentent les principaux résultats des analyses concernant la reconnaissance des physiologies végétales à partir de données polarimétriques respectivement d'ALOS-PALSAR de RADARSAT-2. La sixième partie (chapitres 15 et 16) traite de l'hydrologie des tourbières et rassemble à la fois l'analyse des données ALOS-PALSAR et RADARSAT-2. La thèse est complétée avec une discussion des résultats obtenus et nos principales conclusions (chapitre 17).

PARTIE I - LES DONNÉES DES RADARS POLARIMÉTRIQUES ET LEUR ANALYSE

Dans cette partie nous ferons tout d'abord un rappel des principes de fonctionnement d'un radar polarimétrique satellital en mettant l'accent sur ceux à bord des satellites ALOS et RADARSAT-2 utilisés dans cette recherche (chapitre 2). Dans un deuxième temps, nous examinerons en détail les bases de la polarimétrie radar et les décompositions polarimétriques (chapitre 3) qui sont la méthode d'extraction de l'information que nous avons privilégiée dans cette recherche. Une attention particulière sera apportée à la décomposition incohérente de Touzi.

CHAPITRE 2

2. LES RADARS POLARIMÉTRIQUES SATELLITAIUX ALOS-PALSAR ET RADARSAT-2

Comme tout radar contemporain de télédétection, les radars polarimétriques à bord des satellites sont des radars à synthèse d'ouverture (RSO). Le *modus operandi* des RSO pour obtenir des résolutions fines au sol à partir des altitudes orbitales est expliqué dans un grand nombre d'ouvrages (voir par exemple Raney (1998); Cumming et Wong (2005)). Dans ce chapitre, nous ne décrivons que certains principes de base utiles à la compréhension du fonctionnement des deux RSO utilisés dans cette recherche soit ceux d'ALOS et de RADARSAT-2. Le satellite japonais ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) a été lancé le 24 janvier 2006 et a cessé ses opérations le 22 avril 2011. Il comprenait deux capteurs optiques ainsi que le radar PALSAR (*Phased array type L-band synthetic aperture radar*) dont il sera question dans les paragraphes qui suivent. Quant au satellite canadien RADARSAT-2, lancé le 14 décembre 2007 et toujours en opération, il comprend uniquement un RSO.

2.1. Les paramètres d'opération d'un RSO polarimétrique : bref aperçu

L'opération de tout RSO est caractérisée par quatre paramètres de base : la fréquence (ou l'équivalent la longueur d'onde) des ondes émises, la configuration de polarisation (émission/réception), la position du faisceau lors de l'acquisition de données ainsi que la résolution spatiale. Nous décrivons ces paramètres en mettant l'accent sur les différences entre un RSO polarimétrique et les autres RSO.

2.1.1. Fréquences d'émission

Les RSO de télédétection mis en orbite depuis les années 1990 opèrent à une seule fréquence dans les micro-ondes. Les micro-ondes (ou hyperfréquences) couvrent un large spectre de

longueurs d'onde, allant des ondes millimétriques aux ondes centimétriques, divisé en bandes de radiofréquences (Tableau 2.1-1). La plupart des RSO satellitaires émettent en bande C et L. Plus récemment des RSO émettant en bande X ont été aussi mis en orbite. Les deux RSO d'intérêt dans cette recherche opèrent à 5.405 GHz ou 5.6 cm (bande C; RS2) et à 1.27 GHz ou 23.6 cm (bande L; ALOS-PALSAR).

Désignation des bandes	Fréquence	Longueur d'onde
Bande UHF (Note 1)	300–1000 MHz	100
Bande L	1 - 2 GHz	30
Bande S	2 - 4 GHz	15
Bande C	4 - 8 GHz	7.5
Bande X	8 - 12 GHz	3.75
Bande Ku	12 - 18 GHz	2.5
Bande K	18 - 27 GHz	1.67
Bande Ka	27 - 40 GHz	11.1

Note 1 : Dans les Ultra Hautes Fréquences (UHF) la sous-bande 420 MHz-450 MHz (71-75 cm) est aussi appelée bande P

Tableau 2.1-1 : Bandes micro-ondes (déjà utilisées ou couramment utilisées en télédétection)

Source : IEEE Standard Letter Designations for Radar-Frequency Bands (1984)

2.1.2. Diversité des polarisations

La plupart des RSO satellitaires mis en orbite jusqu'au milieu des années 90 émettaient des impulsions micro-ondes avec une polarisation linéaire (horizontale ou verticale) et isolaient la composante horizontale ou verticale de l'onde lors de la réception du signal provenant de la surface terrestre. Ces satellites étaient donc dotés d'une antenne à configuration unique en transmission (Tx) et réception (Rx) soit en polarisation horizontale [HH, ex. Seasat, RADARSAT-1 (bande C), JERS-1 (L)] ou verticale [VV, ex. ERS-1 (C) & ERS-2 (C)]. Plusieurs RSO satellitaires contemporains ont la capacité de fonctionner selon différentes configurations de polarisation en transmission et réception. L'un des premiers fut le satellite Envisat-ASAR (bande C) qui pouvait opérer en polarisation duale. Ce dernier pouvait transmettre en polarisation horizontale ou verticale et recevait ensuite le signal selon ces deux configurations (Tx : H ou V, Rx : H & V). Enfin, certains satellites sont dotés d'un mode d'acquisition en configuration quadruple (ex. TerraSAR-X(X), RADARSAT-2 (C), ALOS-PALSAR (L)) pour lesquels les polarisations horizontale et verticale sont transmises et reçues. C'est cette dernière configuration qui est d'intérêt dans cette recherche.

La Figure 2.1-1 montre à titre d'exemple les différentes façons d'opérer du capteur PALSAR à bord du satellite ALOS selon la configuration de polarisation. À chaque émission d'impulsion, indiquée par une flèche sur cette figure, correspond une ligne de balayage du terrain; balayage qui se base sur la mesure du temps aller-retour des signaux (c.f. §2.1.3). Pour empêcher que des signaux provenant d'une ligne de balayage arrivent au radar après l'émission de la prochaine impulsion (ambiguïtés en portée) il faut ajuster la longueur d'une ligne de balayage (fauchée) en fonction de la fréquence de répétition des impulsions. On comprend que pour obtenir une ligne de balayage en quasi-synchronisme en polarisation quadruple, la fréquence d'émission d'impulsions (PRF) doit être doublée par rapport à une opération en polarisation simple et conséquemment la fauchée doit être la moitié de celle en polarisation simple.

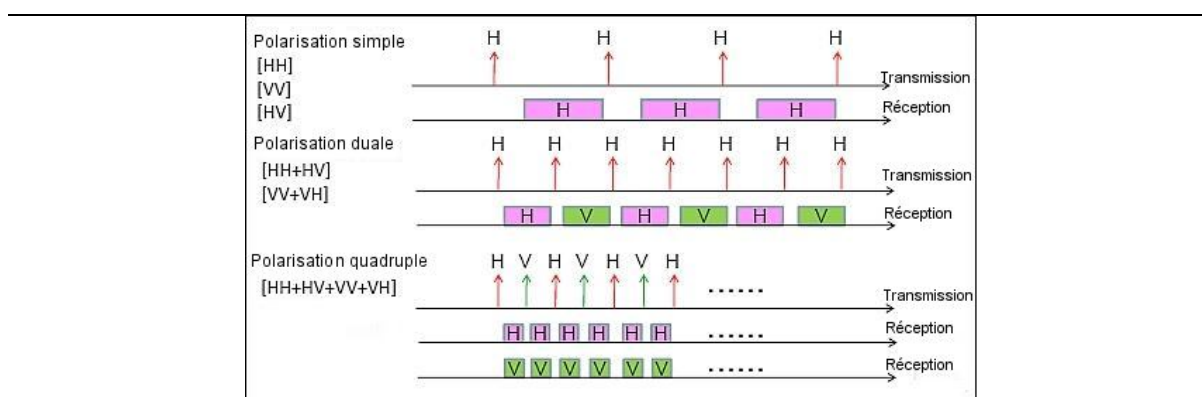


Figure 2.1-1 : Différentes configurations de polarisation du capteur ALOS-PALSAR

Source : adapté de eoPORTAL (2012), Satellite Mission database, Alos-2

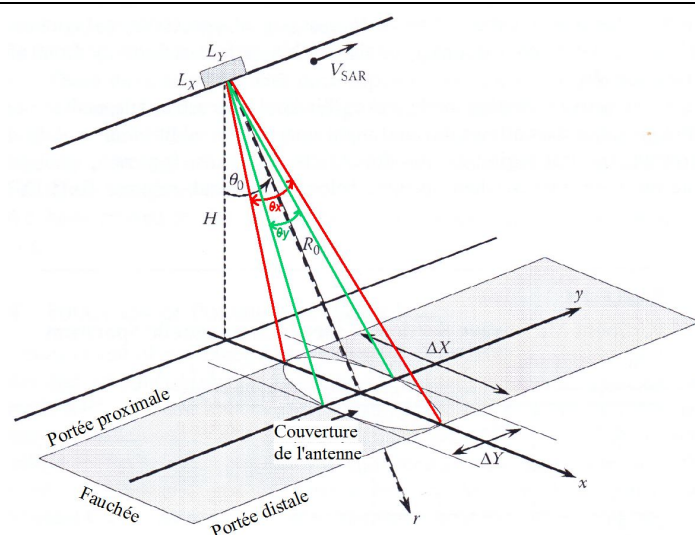
<https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alos-2>

Quelques satellites munis d'un mode d'acquisition en polarisation quadruple seront prochainement mis en orbite [ALOS-2 (L), SAOCOM (L), RADARSAT-3 (C)]. Mais la fauchée limitée de ce dernier soulève actuellement la critique. Il est prévu que les futures générations de capteurs polarimétriques seront équipées d'antennes Tx/Rx entièrement numériques. La technologie du *Digital beamforming* permettra en particulier d'alléger le conflit entre une fine résolution spatiale et la largeur de la fauchée par un plus rapide et meilleur contrôle de l'amplitude et de la phase lors de l'émission du signal. En attendant, des modes d'acquisition alternatifs émergent dont la polarimétrie compacte ou hybride [(ALOS-2 (L), RADARSAT-3 (C)]. Ce mode consiste à émettre une polarisation en mode circulaire (dextrogyre ou lévogyre) pour ensuite recevoir de manière cohérente le signal rétrodiffusé selon deux polarisations linéaires orthogonales. Bien que de cette façon nous puissions, entre autres, diminuer le PRF et donc d'augmenter la longueur de la fauchée par rapport à un RSO à

polarisation quadruple, la polarimétrie compacte n'offre pas les mêmes possibilités d'analyse que la polarisation quadruple. Pour des explications détaillées sur les différentes configurations de polarisation utilisées par les RSO en général et les types de données mesurées voir Charbonneau et *al.* (2010).

2.1.3. Géométrie d'acquisition

Un RSO acquiert ses données sur la surface visée par balayage du terrain. L'émetteur micro-ondes génère des impulsions de courte durée (quelques microsecondes) et de forte puissance (pic à quelques 2 à 5 kW) avec une certaine fréquence de répétition (PRF). À chaque émission d'impulsion, une ligne de balayage est créée. L'antenne du RSO joue le rôle d'un transducteur permettant au rayonnement émis de passer d'une propagation guidée dans une ligne de transmission à une propagation dans l'espace libre tout en demeurant concentré à l'intérieur d'un faisceau et vice-versa. Les caractéristiques géométriques du faisceau (forme et ouverture angulaire) ainsi que la distance d'opération du radar définissent la géométrie d'une ligne de balayage (longueur de la fauchée et largeur). La Figure 2.1-2 présente schématiquement les caractéristiques du faisceau et de la ligne de balayage lors d'une opération typique d'un RSO satellital. Prenant comme exemple RS2 opérant à une portée de 1000 km de la Terre avec son antenne de 15m x 1.5m, nous pouvons constater que la largeur d'une ligne de balayage sera de 4 km environ tandis que sa fauchée sera de l'ordre d'une cinquantaine de kilomètres. Pour ALOS, les différences en taille de l'antenne (8.9 m x 3.1 m) et en longueur d'onde par rapport à RS2, résulteront pour la même portée à des lignes de balayage d'une fauchée de quelques 90 kilomètres et d'une largeur d'une trentaine de kilomètres environ. Comme nous le verrons plus loin le RSO tire avantage de cette largeur en émettant des impulsions à une cadence appropriée pour obtenir des lignes de balayage après traitement qui peuvent être d'une largeur métrique (résolution azimutale). Tel que mentionné, la longueur de la fauchée est finalement définie par le temps disponible pour échantillonner les signaux de retour entre deux émissions d'impulsions successives, fonction du nombre des canaux de polarisation échantillonnés.



Antenne rectangulaire ($L_y \times L_x$) :

- Les ouvertures angulaires du faisceau dans les directions parallèle (direction azimutale) et transversale (direction en portée oblique) à la trajectoire de vol sont respectivement : $\theta_y \approx \frac{\lambda}{L_y}$ et

$$\theta_x \approx \frac{\lambda}{L_x} \quad \text{où } \lambda \text{ est la longueur}$$

d'onde.

- La largeur et la longueur d'une ligne de balayage sont respectivement :

$$\Delta Y \approx R_0 \theta_y \quad \text{et} \quad \Delta X \approx \frac{R_0 \theta_x}{\cos \theta_0}$$

où θ_0 est l'angle de visée du radar et

R_0 correspond à la portée médiale du faisceau.

Figure 2.1-2 : Géométrie d'acquisition des données RSO opérant en mode «strip-map»

Source : adapté de Lee et Pottier (2009)

Les RSO ont des antennes composées la plupart de temps par des alignements de radiateurs élémentaires. En modulant d'une façon appropriée la phase du signal qui alimente chaque radiateur, il est possible de générer des faisceaux radar dirigés selon des angles différents vers la surface terrestre. Tous les RSO modernes ont cette capacité de modifier (électroniquement) la position du faisceau et acquièrent leurs données en différents modes (strip-map, spotlight, ScanSAR, etc.). Les Figures 2.1-3 et 2.1-4 illustrent les différents modes d'acquisition des données par ALOS-PALSAR et RS2. L'acquisition de données polarimétriques se fait dans les deux cas uniquement en mode «strip-map». Dans ce mode le faisceau demeure dans un plan perpendiculaire à la trajectoire de vol et l'angle de visée du faisceau demeure fixe pour une acquisition de données spécifique (Figure 2.1-2). Nous pouvons modifier l'angle de visée d'une acquisition à l'autre par télécommande. Quant à l'orientation du faisceau par rapport au Nord, vu l'orbite héliosynchrone des satellites, la trace au sol de l'orbite est à nos latitudes d'une dizaine de degrés vers l'est (orbite descendante) ou vers l'ouest (orbite ascendante) du méridien central de la scène visée. Il est à noter que certains RSO comme celui de RS2 sont dotés d'une capacité de déplacer leur antenne afin de viser un territoire se trouvant à l'est ou à l'ouest de leur orbite (Figure 2.1-4).

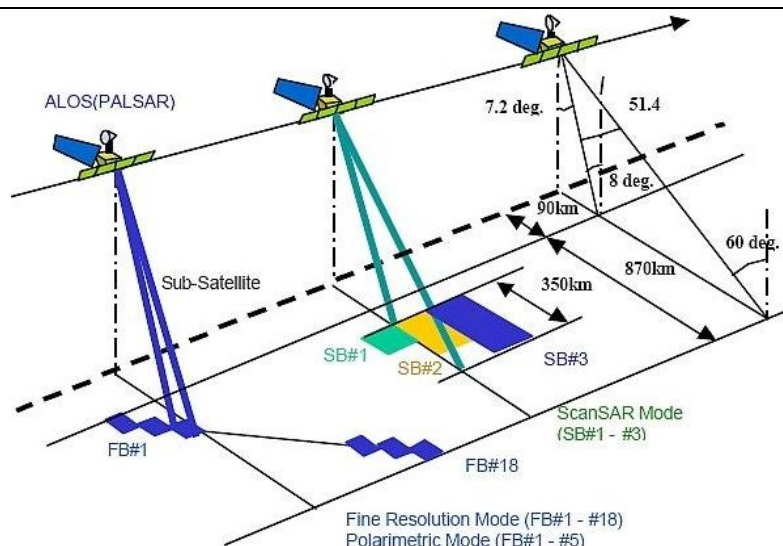


Figure 2.1-3 : Géométrie d'acquisition du RSO PALSAR du satellite ALOS

Source : JAXA-EORC (1997)

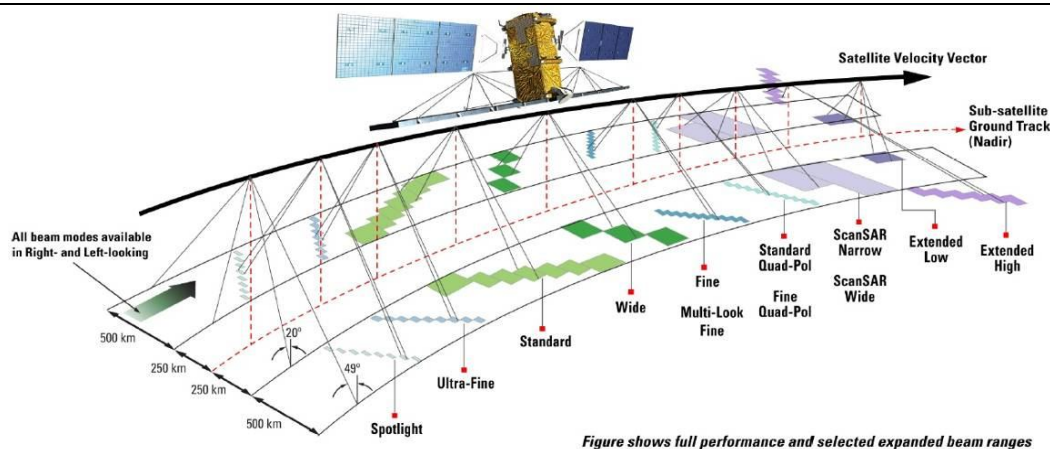


Figure 2.1-4 : Modes d'acquisition du satellite RADARSAT-2

Source : MDA (2009); RADARSAT-2 Product description

Comme nous pouvons le constater par la Figure 2.1-3, ALOS-PALSAR acquiert de données polarimétriques à une seule résolution (d'une trentaine de mètres au sol) selon cinq angles d'incidence (FB#1-FB#5) variant de 8° à 30° . RS2 offre pour sa part une plus grande gamme d'angles d'incidence pour l'acquisition de données polarimétriques (Figure 2.1-4). Ces données sont offertes selon deux résolutions différentes soit d'une trentaine de mètres (mode standard) ou d'une dizaine de mètres au sol (mode fin). Seul le mode fin nous a intéressés dans cette étude. Le Tableau 2.1-2 donne les détails sur les angles d'incidence selon ce mode (FQ).

Beam	Near Inc. Ang.(°)	Farr Inc. Ang.(°)	Near range res. (m)	Far range res. (m)	Beam	Near Inc. Ang.(°)	Far Inc. Ang.(°)	Near range res. (m)	Far range res. (m)
FQ1	18.4	20.4	16.5	14.9	FQ17	36.4	38.0	8.8	8.5
FQ2	19.7	21.7	15.2	14.0	FQ18	37.4	38.9	8.6	8.3
FQ3	20.9	22.9	14.6	13.4	FQ19	38.3	39.8	8.4	8.1
FQ4	22.1	24.1	13.8	12.7	FQ20	39.2	40.7	8.2	8.0
FQ5	23.4	25.3	13.1	12.2	FQ21	40.2	41.6	8.1	7.8
FQ6	24.6	26.4	12.5	11.7	FQ22	41	42.4	7.9	7.7
FQ7	25.7	27.6	12	11.2	FQ23	41.9	43.3	7.8	7.6
FQ8	26.9	28.7	11.5	10.8	FQ24	42.8	44.1	7.7	7.5
FQ9	28.0	29.8	11.1	10.5	FQ25	43.6	44.9	7.5	7.4
FQ10	29.1	30.9	10.7	10.1	FQ26	44.4	45.7	7.4	7.3
FQ11	30.2	32.0	10.3	9.8	FQ27	45.2	46.5	7.3	7.2
FQ12	31.3	33.0	10.0	9.5	FQ28	46.0	47.2	7.2	7.1
FQ13	32.4	34.0	9.7	9.3	FQ29	46.8	48	7.1	7.0
FQ14	33.4	35.1	9.4	9.1	FQ30	47.5	48.7	7.1	6.89
FQ15	34.4	36.0	9.2	8.8	FQ31	48.3	49.4	7.0	6.8
FQ16	35.4	37.0	9.0	8.6					

Tableau 2.1-2 : Principales caractéristiques des faisceaux RADARSAT-2 en mode polarimétrique fin (FQ)

Source : MDA (2009); RADARSAT-2 Product description

Compte tenu de contraintes imposées par la grande fréquence de répétition des impulsions pour les opérations en quadruple polarisation, la fauchée n'est que de 30 km pour ALOS et de 25 km pour RS2. À titre de comparaison, la fauchée peut atteindre quelques 70 km lorsque ALOS opère en mode *strip-map* en polarisation simple ou duale, tandis que pour RS2 en résolution fine et en mode *strip-map*, la fauchée maximale est de 50 km en polarisation simple ou duale.

2.1.4. Résolution

2.1.4.1. Résolution en portée oblique et en portée au sol

Le balayage des objets à l'intérieur de la fauchée est obtenu par le front d'onde même. Le rayonnement se propageant à la vitesse de la lumière atteint dans un premier temps les objets au sol se trouvant à sa portée proximale et successivement dans le temps les objets se situant à des portées plus éloignées jusqu'à la portée distale (Figure 2.1-2). Le temps de réception des signaux rétrodiffusés par les objets après émission, fonction du temps de parcours aller-retour des ondes, sert comme base de localisation des objets dans la direction transversale. Il est évident que la résolution dans la direction de la portée est fonction de la capacité du système de réception de distinguer dans le temps deux signaux provenant des objets rapprochés au sol.

L'intervalle de temps entre deux mesures ne peut être inférieur à la durée de l'impulsion (τ). Émettre une impulsion de très courte durée afin d'améliorer la résolution dans la direction transversale tout en maintenant une forte puissance du signal qui favorisera la réception d'un signal utile, devient pratiquement impossible. Pour contourner ce problème, les RSO émettent une impulsion de longue durée avec modulation linéaire de la fréquence de part et d'autre de la fréquence d'émission f_0 (« *chirp* »). Le même objet au sol (dont la dimension en portée équivaut à la résolution souhaitée) envoie une série de signaux avec des fréquences légèrement différentes. Le RSO est capable de différencier ces signaux et de les préserver. Il s'ensuit un traitement spécial appelé *compression en portée* qui permet de générer à partir des signaux recueillis par élément de résolution «souhaitée» un seul signal qui aurait dû être recueilli si la durée de l'impulsion était beaucoup plus courte (Elachi et van Zyl, 2006). Si la largeur de bande du "chirp" est B (MHz) nous pouvons démontrer que la résolution en portée après compression est :

$$\delta r = \left(\frac{c}{2B} \right) \quad (2.1-1)$$

où c est la vitesse de la lumière et le facteur 2 est pour tenir compte du fait que l'intervalle de temps entre deux mesures correspond au temps aller-retour du signal. La résolution en portée du RSO est donc indépendante de la distance qui le sépare de la surface et elle exprime la différence minimale des portées entre deux objets rapprochés pour qu'ils soient considérés comme des objets séparés au niveau du radar. La distance minimale entre ces deux objets au sol ou résolution en portée au sol (δx) est alors équivalente à :

$$\delta x = \left(\frac{\delta r}{\sin \theta} \right) \quad (2.1-2)$$

où θ est l'angle d'incidence à la portée considérée.

À titre d'exemple, ALOS-PALSAR fonctionnant en mode polarimétrique utilise une largeur de bande de 14 MHz ce qui donne une résolution en portée oblique de l'ordre de 11 m ou une résolution au sol d'une trentaine de mètres à un angle d'incidence de 20° . Pour sa part, RS2 en mode polarimétrique fin utilise une largeur de bande de 30 MHz ce qui donne une résolution en portée oblique la moitié environ de celle de ALOS, soit 5m.

2.1.4.2. *Résolution azimutale*

Dans la direction azimutale, tel que mentionné, la largeur d'une ligne de balayage (ce qui constitue la résolution azimutale) est de plusieurs kilomètres. Le RSO tire avantage de cette grande largeur pour synthétiser une ligne de balayage d'une largeur métrique au prix cependant d'un traitement post-acquisition intensif. Sans rentrer dans les détails techniques de cette opération on peut l'expliquer d'une façon simple comme suit. Compte tenu de leur largeur, deux lignes de balayage successives ont un grand recouvrement. En effet pour une vitesse du satellite de 7km/sec et un PRF de 1500 impulsions par seconde on peut facilement calculer que deux lignes de balayage successives sont distantes d'environ 5 m au sol. Ceci constitue la largeur de ligne de balayage qui sera synthétisée après traitement comme si le radar portait une antenne (ouverture) de plusieurs kilomètres (équivalente à la largeur d'une ligne de balayage). Un objet de cette dimension de 5 m au sol est vu 1500 fois dans autant de lignes de balayages. À chaque fois cependant sa position par rapport au radar est légèrement différente. Ceci cause un léger changement de la fréquence des ondes reçues dû à l'effet Doppler. Le RSO possède la capacité de distinguer ce léger changement et ainsi de «positionner» chaque objet en fonction de sa fréquence Doppler à l'intérieur d'une ligne de balayage le long d'une portée quelconque. En d'autres mots, une matrice de signaux est générée par ligne de balayage. Les lignes de cette matrice correspondent aux différentes portées tandis que les colonnes, aux locus d'égale fréquence Doppler (iso-Doppler). Lors du traitement, le même objet est reconnu selon sa portée et sa position Doppler dans les 1500 lignes de balayage successives et les signaux compressés pour synthétiser l'«image» de l'objet à une ligne de balayage qui correspond à sa position zéro de Doppler (l'objet se trouvait vis-à-vis le radar).

La synthèse d'ouverture nécessite tout d'abord l'émission des signaux cohérents, en d'autres termes, la fréquence de répétition des impulsions et la phase de chaque impulsion sont soigneusement contrôlées. Il en est de même lors de la réception et le traitement post-acquisition des signaux. On peut prouver qu'à limite (RSO pleinement focalisé) la résolution azimutale équivaut à la moitié de la longueur de l'antenne et elle donc indépendante de la portée :

$$\delta y = \frac{L_y}{2} \quad (2.1-3)$$

La composante horizontale ou verticale du signal isolée par le radar lors de la réception peut s'écrire sous une forme simplifiée comme suit :

$$A = A_o \cos p + jA_o \sin p \quad (2.1-4)$$

Où A_o est l'amplitude du signal et p est l'angle de phase. Tous les RSO satellitaires séparent et quantisent (souvent en 4 ou 6 bits) les composantes cosinusoidale (en phase I) et sinusoidale (en quadrature de phase Q) du signal. Pour réaliser cette opération on compare le signal reçu à une paire de signaux de référence générés par l'oscillateur local (LO) qui est responsable de la synchronisation des opérations du capteur. L'un des signaux de référence est en phase avec le LO ($\angle 0^\circ$) alors que le second sera en quadrature par rapport à LO ($\angle 90^\circ$) (Raney, 1998). Le signal radar est alors traité comme un nombre complexe ce qui est nécessaire pour l'addition cohérente de plusieurs échos pour, entre autres, augmenter la résolution en azimuth. Les données radar après compression en portée et en azimuth sont offertes par configuration de polarisation sous forme de deux matrices I et Q selon un format dit «*Single Look Complex*». La géométrie d'origine (portée oblique-Zéro Doppler) est préservée. Nous pouvons ainsi générer des images de magnitude du signal :

$$Magnitude = \sqrt{I^2 + Q^2} \quad (2.1-5)$$

ou de la phase utile dans les opérations d'interférométrie :

$$Phase = \tan^{-1} \left(\frac{Q}{I} \right) \quad (2.1-6)$$

À l'aide de coefficients d'étalonnage approprié, les données sur la magnitude peuvent être converties en coefficients de rétrodiffusion (σ^0). Cette conversion implique au préalable la prise en considération du patron de l'antenne ainsi que de l'angle d'incidence local du faisceau.

2.2. Les mesures d'un RSO

L'objectif premier d'un RSO orienté vers des applications comme la caractérisation des différentes physiologies végétales ou l'estimation des différents paramètres biophysiques du terrain est de retrouver par ses mesures des quantités qui expriment le mieux les propriétés de rétrodiffusion du terrain visé. Dans le cas d'un RSO d'une configuration quelconque de polarisation radar on parle du coefficient de rétrodiffusion.

2.2.1. L'équation radar et coefficient de rétrodiffusion

L'équation radar représente le bilan entre la puissance du signal émis et celle du signal reçu et dépend à la fois des caractéristiques de la cible, de la géométrie de visée, des composantes matérielles du radar et du médium traversé par le rayonnement électromagnétique. Il existe deux types de cibles en télédétection radar : les cibles ponctuelles correspondant à un diffuseur isolé, dont la taille est inférieure à résolution spatiale du capteur, et les cibles étendues (ou distribuées) dont la taille est supérieure à la résolution spatiale du capteur. Dans le cas d'une cible ponctuelle, la puissance reçue au capteur (P_R) correspond à (Lee et Pottier, 2009) :

$$P_R = \frac{P_T G_T(\theta, \phi)}{4\pi r_T^2} \sigma \frac{A_{ER}(\theta, \phi)}{4\pi r_R^2} \quad (2.2-1)$$

La puissance détectée est fonction d'un grand nombre de variables qui peuvent être résumées par la puissance transmise (P_T), le gain de l'antenne (G_T), l'ouverture effective de l'antenne de réception (A_{ER}) ainsi que la distance séparant le RSO et la cible lors que la transmission (r_T) et de la réception du signal (r_R) (éq. (2.1-1)). La puissance reçue dépend également de la géométrie d'acquisition qui est décrite à l'aide des angles sphériques θ et ϕ correspondant respectivement à l'azimut et à l'angle d'élévation (Lee et Pottier, 2009). Le gain de l'antenne représente la capacité de l'antenne de concentrer le rayonnement émis dans une direction quelconque. Elle est exprimée en comparaison à une antenne qui émet le rayonnement avec la même puissance que l'antenne actuelle, mais d'une façon isotrope (le facteur de $P_T/4\pi$ de l'équation 2.2-1). L'ouverture efficace exprime en quelque sorte l'inverse du gain, c'est-à-dire la capacité de l'antenne de restituer la puissance du signal provenant d'une direction quelconque. Dans le cas d'un radar monostatique gain et ouverture efficace sont reliés par la relation : $A_{ER} = \lambda^2 G/4\pi$. La section radar (σ) représente la contribution d'une cible donnée à la puissance reçue et représente la quantité d'intérêt. Une cible ponctuelle sera caractérisée par sa section radar effective (RCS)¹ (Lee et Pottier, 2009) :

¹ Il existe des manuels entiers traitant du sujet. On consulera en particulier Eugene F. Knott (2006). Radar cross section measurements. SciTech publishing. Raleigh, NC, USA. 611 pages.

$$\sigma = 4\pi r^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_I|^2} \quad (2.2-2)$$

où \vec{E}_I est le champ ÉM incident et \vec{E}_s le champ ÉM diffusé (correspondant à la puissance transmise et reçue respectivement). Dans le cas d'une cible étendue, il est utile de la caractériser indépendamment de son étendue en utilisant le coefficient de rétrodiffusion (Lee et Pottier, 2009), il est alors nécessaire d'intégrer la puissance reçue en fonction d'une aire d'illumination (A_L). Le coefficient de rétrodiffusion (σ^o), ou sigma-zéro, représente le ratio entre la moyenne statistique de la densité de puissance diffusée sur la moyenne de la densité de puissance émise sur la surface d'une sphère de rayon r (Lee et Pottier, 2009) soit :

$$\sigma^o = \frac{\langle \sigma \rangle}{A_L} = \frac{4\pi r^2}{A_L} \frac{\langle |\vec{E}_s|^2 \rangle}{|\vec{E}_I|^2} \quad (2.2-3)$$

où \vec{E}_s résulte maintenant de l'addition cohérente de l'ensemble des ondes ÉM provenant des diffuseurs composant la cible étendue (Lee et Pottier, 2009). Sous une forme générale tenant compte de la diversité des polarisations, σ^o est noté par :

$$\sigma_{qp}^o = \frac{\langle \sigma_{qp} \rangle}{A_0} = \frac{4\pi r^2}{A_0} \frac{\langle |\vec{E}_{S_q}|^2 \rangle}{|\vec{E}_{I_p}|^2} \quad (2.2-4)$$

où q et p dénotent respectivement la polarisation reçue et transmise. Notons que le signal transmis et reçu est maintenant représenté par une quantité vectorielle (\vec{E}) préservant la phase de sorte que q et p ne sont pas fixés. De plus, la phase entre les composantes orthogonales sera mesurée et conservée ce qui permettra par la suite la synthèse d'un coefficient de rétrodiffusion pour n'importe quelle combinaison de polarisation ainsi que la possibilité d'appliquer une décomposition du signal polarimétrique (chapitre 3).

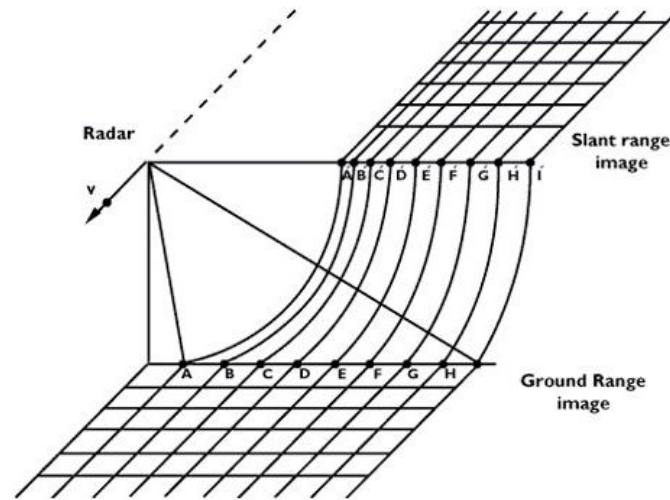
Le coefficient de rétrodiffusion σ^o (σ_{qp}^o) est donc fonction d'un ensemble de paramètres liés d'une part aux caractéristiques du RSO (fréquence, polarisation et géométrie d'acquisition) et de l'autre aux propriétés de la cible (structure géométrique, constante diélectrique,

biomasse...²). En utilisant plusieurs configurations de paramètres relatifs aux RSO (multifréquence, multipolarisation, multi-incidence, etc., voir le chapitre 6) il est possible d'obtenir une image plus juste des propriétés de la cible observée. Il existe cependant d'autres facteurs qui altèrent la relation entre le coefficient de rétrodiffusion mesuré et les propriétés de la cible. La géométrie de visée qui inclue l'effet de la topographie (cf. §2.2.2), le chatoiement (cf. §2.3) et l'étalonnage du RSO (et en particulier des RSOPOL, cf. §2.3) sont des exemples.

2.2.2. Distance oblique vs distance temps (*slant range vs ground range*)

Le fait que les objets sont localisés le long d'une fauchée selon le temps aller-retour des signaux, les données RSO présentent certaines caractéristiques géométriques uniques clairement visibles une fois traitées pour produire des images. Tout d'abord une cellule de résolution au sol est plus longue à une portée proximale qu'à une portée distale même si la résolution en portée oblique demeure partout constante. Une image produite selon les axes portée oblique/zéro de Doppler présentera ainsi une variation d'échelle le long de la fauchée. Par traitement, on rapporte les données en portée au sol/zéro Doppler et après rééchantillonnage on crée des images radar avec un pixel carrée. On parle alors d'un espacement inter-pixels. Ce traitement est nécessaire car la majorité des applications touchant à la géomatique requièrent des distances réelles au sol. Il n'en demeure pas moins que la géométrie d'origine portée oblique/zéro de Doppler représente la vue naturelle et originale du RSO à visée latérale et celle qui offre la plus grande fidélité du signal puisqu'aucune transformation n'a été appliquée (Raney, 1998).

² Voir Dobson et al. (1995a) pour une revue approfondie concernant l'influence des facteurs géométriques, diélectriques, environnementaux et ceux liés à la configuration du RSO ainsi que de leurs interrelations sur le coefficient de rétrodiffusion mesuré.



(A) Distance-temps = Distance oblique

Figure 2.2-1: Distance-temps (*slant-range*) et distance au sol (*ground range*)

Sources : ESA (2000)

2.2.3. Sigma zero (σ^0), Beta zero (β^0) et Gamma zero (γ^0)

L'expression «coefficient de diffusion (de rétrodiffusion)» est une appellation qui devrait être réservée au terme sigma zéro (σ^0) "qui représente la mesure conventionnelle de la puissance des signaux radars réfléchis par un diffuseur étendu " (CCRS, 2007). Le coefficient de rétrodiffusion s'exprime généralement en décibels (dB) qui est une valeur normalisée comparant la puissance observée à celle prévue pour une surface équivalente à 1m^2 (A_L , Figure 2.2-2) et correspond à la distance au sol. La brillance radar (β^0 , ou *beta zéro*) représente la radiométrie naturelle observable d'un radar (Raney et al., 1994), elle exprime la rétrodiffusion par unité de surface en portée oblique et n'exige aucune connaissance de l'angle d'incidence local. Gamma zéro (γ^0) est une mesure de la force de la rétrodiffusion d'une cible distribuée perpendiculairement à l'axe du faisceau radar (A_i). Cette grandeur, également sans dimensions, nécessite une connaissance de la pente locale du terrain pour l'estimation de l'angle d'incidence local (θ_i) ce qui sera généralement obtenu via un MNÉ. À l'opposé, la définition de σ^0 suppose une surface plane.

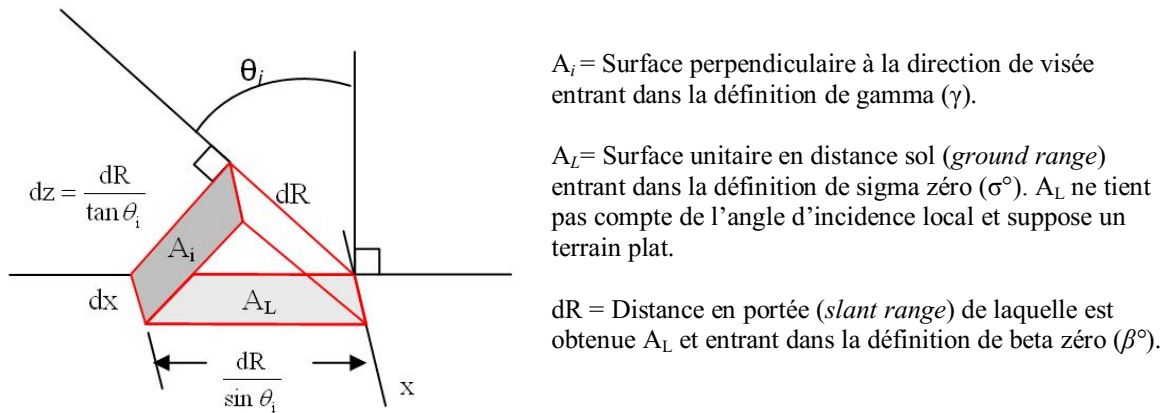


Figure 2.2-2 : Définition de la surface unitaire et de surface incidente pour la définition des paramètres de réflectivité des cibles distribuées

Source : Raney (1998), fig.2-8, p.25 et CCRS (2007)

2.3. Autres facteurs relatifs à l'estimation du coefficient de rétrodiffusion

2.3.1. Raccourcissement et repliement des pentes

Lorsque le terrain est accidenté toujours à cause de l'utilisation du temps pour localiser les objets le long de la fauchée d'autres phénomènes sont présents comme le «raccourcissement des pentes» (*foreshortening*) faisant face au radar ou leur «repliement» (*layover*). Le premier arrive lorsque le front d'onde à une portée donnée atteint en même temps plusieurs objets le long d'un versant. Les échos de tous ces objets arrivent alors en même temps au radar. Le versant apparaît donc raccourci. À la limite tout le versant est «contenu» dans une seule cellule de résolution. Le repliement se manifeste lorsque le sommet du versant est plus rapproché du radar que sa base. Il est aussi observable lorsque des hauts bâtiments ou d'autres structures élevées sont présentes. Ces phénomènes qui peuvent être partiellement corrigés par orthorectification des images créent quand même une perte d'information importante sur le terrain visé. Le relief et les structures élevées produisent également de l'ombre sur les images radars dans la direction opposée au radar. Les ombres radar constituent une autre source de perte de l'information sur les images radar et qui est totale car ces derniers, contrairement aux images optiques, ne peuvent pas mesurer la lumière diffuse. Pour plus de détails sur ces phénomènes et leur représentation graphique voir en autres Raney (1998), CCRS (2008) ainsi que Lee et Pottier (2009).

2.3.2. Le chatoisement et les traitements multi-vues

Le chatoisement est une conséquence du principe d'acquisition cohérente des données radar. En d'autres mots, le chatoisement est la résultante de la sommation cohérente de plusieurs échos radars (Figure 2.3-1) pour obtenir la phase et la magnitude d'une cellule de résolution. Il arrive donc que la sommation aléatoire de plusieurs échos produise une forte rétrodiffusion, dans le cas d'interférences constructives, bien que la cellule de résolution ne contienne pas de structures fortement réfléchissantes. L'inverse peut se produire en présence d'interférences destructives. Le chatoisement est souvent modélisé comme un bruit aléatoire multiplicatif ("chatoisement pleinement développé"). Cela implique que le chatoisement soit indépendant de l'occupation du sol, que les diffuseurs contenus dans une cellule de résolution soient statistiquement indépendants les uns des autres et que leurs phases soient distribuées uniformément dans l'intervalle $[0, 2\pi]$. En réalité, l'ensemble de ces conditions n'est pas toujours respecté si bien que le chatoisement peut s'apparenter à la notion de texture. Dans ce cas, le chatoisement sera dépendant de la classe d'utilisation du sol et peut aider à l'interprétation de la scène.

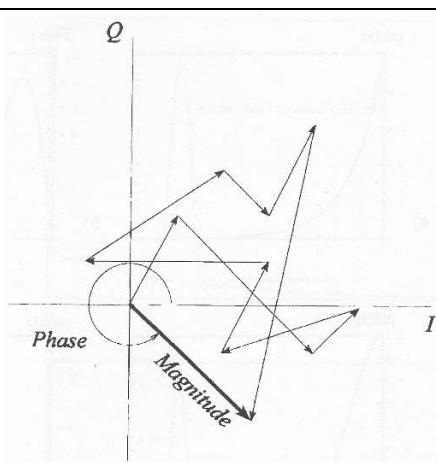


Figure 2.3-1 : Addition cohérente des échos radar menant au chatoisement

Source : Raney (1998)

Il est possible de réduire le chatoisement au détriment cependant de la résolution spatiale des données RSO. Deux processus de base existent soit le traitement multi-vu (*multilooking*) dont il a été question précédemment ou encore l'application d'un filtre de moyenne locale utilisant une fenêtre de traitement dont la taille est spécifiée par l'utilisateur. L'étude et la modélisation de la distribution statistique du chatoisement ainsi que le développement des filtres de chatoisement ont fait l'objet de nombreuses recherches (Lopes et *al.*, 1990;1993, Lee et *al.*, 1994). Un filtre de

chatoisement idéal doit être en mesure de préserver la variabilité spatiale du signal dont les petites structures et la texture de la scène (Touzi, 1999). Le chatoisement affecte toutes les données RSO incluant les données polarimétriques. La façon dont nous avons abordé ce phénomène est présentée dans le chapitre 3.

Souvent pour ramener la résolution en portée et en azimut au même niveau tout en réduisant l'effet du chatoiement les signaux servant à synthétiser l'antenne sont partagés en deux ou plusieurs segments consécutifs. Chaque segment est alors traité indépendamment pour créer autant d'images du territoire visé mais avec une résolution azimutale dégradée. Ces images sont par la suite additionnées (addition non cohérente) pour créer une nouvelle image. On parle alors d'un traitement multi-vues («*multi-look*») en azimut. Un traitement analogue peut se faire avec les données du «chirp» pour un traitement «multi-vues» en portée. Dans le cas de données polarimétriques, cette opération ne peut pas se faire avec les matrices de diffusion. Ainsi, les données sont transformées tout d'abord en une matrice dite de Kennaugh (ou de Stokes) qui possède la propriété de l'additivité (section 3.2).

CHAPITRE 3

3. ANALYSES DES DONNÉES POLARIMÉTRIQUES

Tel que mentionné en introduction, l'objectif principal de notre recherche est d'étudier les relations entre les données polarimétriques et les caractéristiques des physiologies végétales ainsi que l'hydrologie des milieux humides. Les décompositions polarimétriques permettent en principe de découvrir les mécanismes de rétrodiffusion dont la superposition donne naissance aux signaux mesurés par le radar. L'association de ces mécanismes à la structure géométrique et les propriétés diélectriques d'une physiologie végétale en particulier peut donc nous mener à son identification. Dans ce chapitre nous ferons un bref rappel des notions de base de la polarimétrie radar (sections 3.1 à 3.3) ainsi qu'un bref historique des différentes techniques de décomposition polarimétriques développées au cours des trente dernières années (section 3.4). Nous concluons ce chapitre en mettant l'accent sur la décomposition incohérente de Touzi, méthode que nous avons privilégiée dès le début de cette recherche.

3.1. La polarimétrie radar : notions de base

La polarimétrie radar n'est pas concernée par la propagation de l'onde mais seulement par l'état final de sa polarisation lors de la réception. Dans ce qui suit, nous présenterons une synopsis de la théorie sur les descripteurs de l'état de polarisation dans le contexte général d'une onde ÉM (polarimétrie de l'onde) ainsi que dans le contexte particulier des mesures d'un radar polarimétrique (polarimétrie de diffusion).

3.1.1. Polarisation d'une onde monochromatique

Ici il faut faire la distinction entre les ondes monochromatiques planes dont les caractéristiques demeurent constantes dans le temps et les ondes partiellement polarisées. Les ondes émises par le radar ou les ondes rétrodiffusées par certains types de cibles (cibles déterministes) peuvent être considérées comme des ondes monochromatiques planes. Dans le cas des cibles

étendues les ondes rétrodiffusées sont la plupart de temps des ondes partiellement polarisées. Les ondes monochromatiques sont pleinement définies par quatre paramètres : leur amplitude, deux paramètres décrivant leur état de polarisation ainsi qu'un référentiel de phase absolue. Leur représentation par des quantités mesurables par un capteur peut se faire le domaine complexe en utilisant le vecteur de Jones ou dans le domaine réel en utilisant le vecteur de Stokes. Associées à ces représentations nous retrouvons l'ellipse de polarisation ainsi que la sphère de Poincaré. Le champ électrique \vec{E} d'une onde ÉM monochromatique plane est donné par :

$$\vec{E}(z,t) = \begin{cases} E_x = E_{0x} \cos(\omega t - kz - \delta_x) \\ E_y = E_{0y} \cos(\omega t - kz - \delta_y) \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (3.1-1)$$

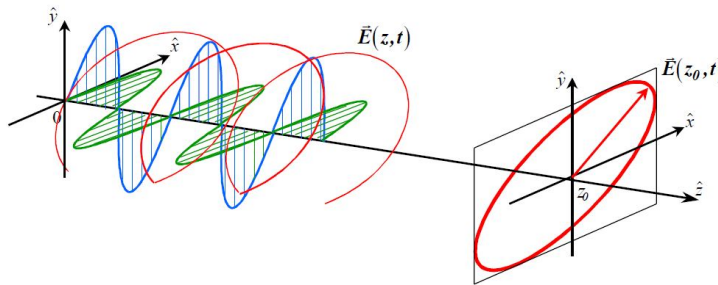


Figure 3.1-1 : Onde électromagnétique et ellipse de polarisation

Source : Lopez-Martinez et al. (2005)

où E_{0x} et E_{0y} représentent les amplitudes des oscillations linéaires monochromatiques des composantes orthogonales du vecteur électrique, k est le nombre d'onde, alors que δ_x et δ_y représentent les phases initiales de ces oscillations selon la direction de propagation z . À une position quelconque dans l'espace z_0 le vecteur du champ électrique décrit dans le temps une ellipse appelée ellipse de polarisation. En effet en éliminant les termes liés à la propagation des ondes (3.1-1) nous obtenons l'équation d'une ellipse :

$$\left(\frac{E_x}{E_{0x}}\right)^2 - 2\frac{E_x E_y}{E_{0x} E_{0y}} \cos(\delta) + \left(\frac{E_y}{E_{0y}}\right)^2 = \sin^2(\delta) \quad (3.1-2)$$

où $\delta = \delta_y - \delta_x$

Un meilleur aperçu du lien entre l'état de polarisation et la structure (géométrie) d'une cible est obtenu en utilisant l'ellipse de polarisation et la sphère de Poincaré. En passant d'une

représentation analytique à une représentation géométrique de l'onde rétrodiffusée et en éliminant le terme de propagation de l'onde ÉM (Raney, 1998) :

$$\left(\frac{E_H}{a_H}\right)^2 + \left(\frac{E_V}{a_V}\right)^2 - 2\frac{E_H}{a_H}\frac{E_V}{a_V}\cos\delta = \sin^2\delta \quad (3.1-3)$$

La présente le déplacement du point $E_h E_v$ qui décrit une ellipse autour de l'axe de propagation du signal. La forme de l'ellipse de polarisation sera déterminée par son orientation (ψ) et son ellipticité (χ) alors que sa taille, correspondant à l'amplitude, est donnée par la longueur de ses semi-axes a et b . L'ellipticité correspond à l'aplatissement de l'ellipse soit (Rayney, 1998):

$$\tan\alpha = \frac{a_V}{a_H} \quad \text{et} \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \quad (3.1-4)$$

$$a^2 + b^2 = a_H^2 + a_V^2 \quad (3.1-5)$$

alors que l'orientation et l'ellipticité sont obtenues par :

$$\sin 2\chi = (\sin 2\alpha) \sin \delta \quad \text{et} \quad -\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4} \quad (3.1-6)$$

$$\tan 2\psi = (\tan 2\alpha) \cos \delta \quad \text{et} \quad 0 \leq \psi \leq \pi \quad (3.1-7)$$

Tous les états possibles de polarisation peuvent être représentés par une association appropriée des deux paramètres angulaires ψ et χ représentables sur la sphère de Poincaré. Cette sphère permet également de représenter les paramètres de Stokes qui furent le premier moyen ayant servi à la description de l'état de polarisation d'une onde au moyen de quantités observables (Boerner, 2004; Raney, 1998).

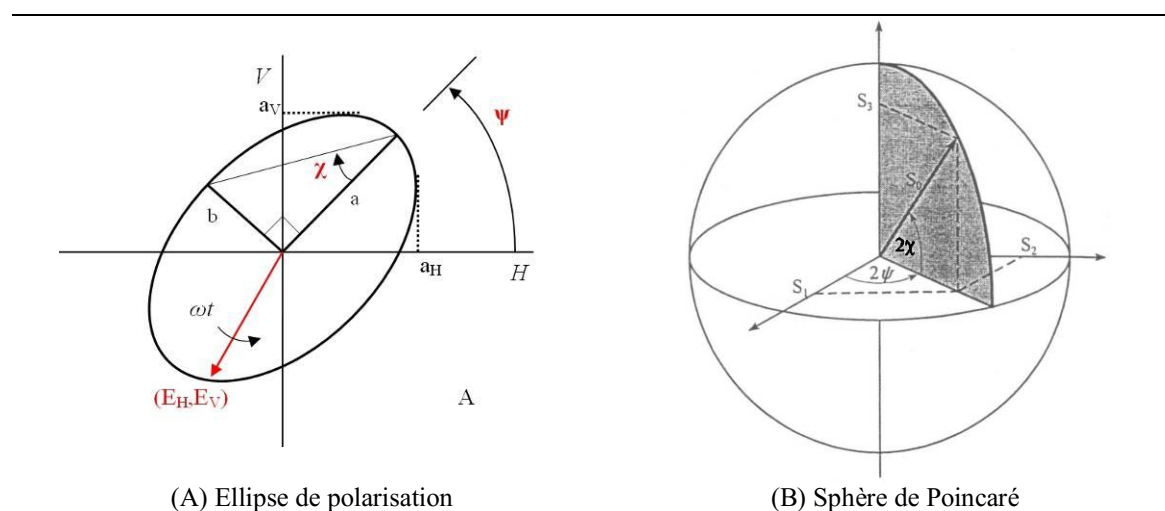


Figure 3.1-2 : Ellipse de polarisation et sphère de Poincaré

Source : Raney (1998), fig.2-74 et 2.75, p.118-119

Les angles d'orientation et d'ellipticité de l'ellipse de polarisation correspondent à :

$$\sin 2\chi = s_3(s_1^2 + s_2^2 + s_3^2)^{-1} \quad \text{et} \quad \tan 2\psi = \frac{s_2}{s_1} \quad (3.1-8)$$

La représentation en puissance de l'onde polarisée en fonction des quatre paramètres de Stokes est la suivante :

$$S_0 = a_H^2 + a_V^2, \quad S_1 = a_H^2 - a_V^2, \quad S_2 = 2a_H a_V \cos \delta, \quad S_3 = 2a_H a_V \sin \delta \quad (3.1-9)$$

L'élément S_0 représente la puissance totale de l'onde. L'élément S_1 représente la différence en énergie entre les deux composantes orthogonales de l'onde. Les éléments S_2 et S_3 représentent conjointement le déphasage entre les deux composantes orthogonales du champ électrique.

Il est maintenant nécessaire de passer d'une représentation géométrique de l'ellipse de polarisation à une description analytique du champ électrique qui permettra de mesurer les propriétés polarimétriques d'une cible donnée. Le champ électrique \vec{E} peut être représenté de d'une façon plus concise par le vecteur de Jones donné par (Pottier et Saillard, 1992) :

$$\vec{E}(0) = \begin{bmatrix} |E_x| e^{j\delta_x} \\ |E_y| e^{j\delta_y} \end{bmatrix} \quad (3.1-10)$$

et \vec{E} correspond au vecteur de Jones.

Un ensemble de deux vecteurs de Jones orthogonaux forment une base de polarisation qui permet d'exprimer n'importe quel état de polarisation d'une onde ÉM. Les propriétés polarimétriques d'une cible (sa structure géométrique par exemple) seront obtenues en comparant l'état du champ électrique réfléchi (\vec{E}^s) par rapport à celui émis (\vec{E}^I) :

$$\vec{E}^s = \frac{e^{-jkr}}{r} [S] \vec{E}^I = \frac{e^{-jkr}}{r} \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \vec{E}^I \quad (3.1-11)$$

où $[S]$ correspond la matrice complexe de rétrodiffusion qui contient toutes les propriétés polarimétriques d'une cible (d'un pixel) donnée. Tout comme le vecteur de Jones, la matrice complexe de diffusion associée à une cible peut-être exprimée en termes absolus ou relatifs selon (Boerner, 2004; Lee et Pottier, 2009) :

$$S = \begin{bmatrix} |S_{11}| e^{j\delta_{11}} & |S_{12}| e^{j\delta_{12}} \\ |S_{21}| e^{j\delta_{21}} & |S_{22}| e^{j\delta_{22}} \end{bmatrix} = e^{j\delta_{11}} \begin{bmatrix} |S_{11}| & |S_{12}| e^{j(\delta_{12} - \delta_{11})} \\ |S_{21}| e^{j(\delta_{21} - \delta_{11})} & |S_{22}| e^{j(\delta_{22} - \delta_{11})} \end{bmatrix} \quad (3.1-12)$$

où $e^{j\delta_{11}}$ correspond à la phase absolue. La matrice $[S]$ relative peut donc être paramétrisée par 7 paramètres indépendants soit 4 amplitudes et trois phases relatives. Dans une configuration monostatique où l'antenne de transmission et de réception sont situés au même endroit, les termes $|S_{12}|$ et $|S_{21}|$ deviennent équivalents, la matrice $[S]$ se réduit alors à cinq paramètres soit trois amplitudes et deux phases relatives. Comme mentionnée, il est possible d'utiliser n'importe quelle base de polarisation orthogonale pour représenter l'état de polarisation d'une cible ce qui sera satisfait seulement si le produit scalaire hermitien des deux vecteurs de Jones est égal à zéro :

$$\langle \vec{E}_1 | \vec{E}_2 \rangle = \vec{E}_1^T \cdot \vec{E}_2^* = 0 \quad (3.1-13)$$

Dans la base linéaire H-V, la matrice complexe $[S]$ relative devient équivalente à (Lee et Pottier, 2009) :

$$[S]_{H-V} = \begin{bmatrix} |S_{HH}| & |S_{HV}| e^{j(\delta_{HV}-\delta_{HH})} \\ |S_{HV}| e^{j(\delta_{HV}-\delta_{HH})} & |S_{VV}| e^{j(\delta_{VV}-\delta_{HH})} \end{bmatrix} \quad (3.1-14)$$

3.1.2. Degré de polarisation et temps de cohérence de la cible

Jusqu'à maintenant, nous n'avons considéré que les ondes entièrement. Pour la majorité des applications radar, les diffuseurs (cibles) se situent dans un environnement dynamique et sont sujets à des variations spatio-temporelles (Boerner, 2004). Lorsqu'une onde monochromatique illumine ces diffuseurs, il en résulte une rétrodiffusion partiellement polarisée de l'onde avec une contribution incohérente des diffuseurs (Boerner, 2004). Le degré de polarisation (P) est donné par :

$$P = \frac{1}{s_0} \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2} \quad (3.1-15)$$

Si l'onde est entièrement dépolarisée, la magnitude des composantes orthogonales est égale et la phase devient aléatoire, on obtient (Boerner, 1999) :

$$s_0^2 = 2|E_n|^2 \quad \text{et} \quad s_1 - s_2 - s_3 = 0 \quad (3.1-16)$$

Dans le cas d'une onde partiellement polarisée, on se situe à l'intérieur de la sphère de Poincaré (Figure 3.1-2-B). Les ondes partiellement polarisées sont définies par cinq paramètres : leur amplitude, deux paramètres décrivant leur état de polarisation, leur degré de

polarisation, ainsi qu'un référentiel de phase absolue. Leur représentation par des quantités mesurables par un capteur peut se faire dans le domaine réel en utilisant le vecteur de Stokes ou dans le domaine complexe en utilisant la matrice de covariance

La contribution incohérente des diffuseurs est étroitement liée au temps d'intégration du signal en azimut (t). Si le temps d'intégration (τ) est court comparativement au temps de cohérence de la cible (τ_c), l'onde se comportera durant l'intervalle t comme une onde monochromatique caractérisée par une vitesse angulaire moyenne $\bar{\omega}$ (rad s⁻¹) (Touzi et al., 2004). Pour un temps d'intégration plus long, les caractéristiques du vecteur de Jones précéderont fluctueront en fonction du temps et l'onde sera considérée comme étant partiellement polarisée. Les paramètres caractérisant l'état de polarisation devront être moyennés en fonction du temps (Touzi et al., 2004).

$$\begin{aligned}\vec{E}_x(z,t) &= a_x(t) \cos(\bar{\omega}t - kz + \delta_x(t)) \\ \vec{E}_y(z,t) &= a_y(t) \cos(\bar{\omega}t - kz + \delta_y(t)) \\ \vec{E}_z(z,t) &= 0\end{aligned}$$

$$\bar{\omega} - \frac{1}{2} \Delta\omega \leq \omega \leq \bar{\omega} + \frac{1}{2} \Delta\omega$$

$$\text{avec } \frac{\Delta\omega}{\bar{\omega}} \ll 1$$

où $\bar{\omega}$ = vitesse angulaire moyenne
(3.1-17)

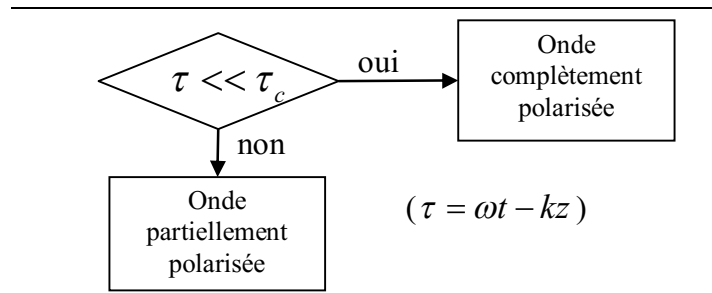


Figure 3.1-3 : Temps de cohérence (τ_c) de la cible

Source : Touzi et al. (2004).

En résumé, si $\delta(t)$ et $(a_x(t)/a_y(t))$; A) demeurent constant alors l'onde est entièrement polarisée; B) varient, alors l'onde est partiellement polarisée ;C) sont aléatoires alors l'onde est complètement dépolarisée et l'intensité est la même selon n'importe quelle orientation perpendiculaire à la direction de propagation z (Figure 3.1-3)

En résumé une onde est entièrement polarisée, le vecteur de Jones et la matrice complexe de rétrodiffusion sont suffisants à sa description. Dans le cas contraire, il sera nécessaire d'utiliser d'autres formes de représentation.

3.2. Représentations d'une onde partiellement polarisée

3.2.1. Matrice de Kennaugh ($[K_4]$) et autres matrices en puissance

Tout comme le vecteur de Jones, le vecteur de Stokes permet de modéliser l'antenne de transmission et de réception. Le vecteur de Stokes est indépendant de la phase absolue et permet donc une représentation non cohérente de l'onde polarisée et ainsi des ondes partiellement polarisées. C'est également une représentation en puissance de cette dernière (Boerner, 2004). On retrouvera dans la littérature le vecteur de Stokes sous de nombreuses notations adaptées au contexte dont l'état de polarisation sur la sphère de Poincaré ((3.2-1, Raney, 1998), sa forme analytique pour une onde monochromatique (3.2-2, Boerner, 2004) ou encore sous sa forme incohérente (3.2-3) obtenue suite à une moyenne spatiale ou temporelle :

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \bar{S}_0 \\ \bar{S}_1 \\ \bar{S}_2 \\ \bar{S}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\chi \cos 2\psi \\ \cos 2\chi \sin 2\psi \\ \sin 2\chi \end{bmatrix} & \approx \begin{bmatrix} |E_H|^2 + |E_V|^2 \\ |E_H|^2 - |E_V|^2 \\ 2|E_H||E_V|\cos\phi_{HV} \\ 2|E_H||E_V|\sin\phi_{HV} \end{bmatrix} & \approx \begin{bmatrix} \langle |E_H|^2 + |E_V|^2 \rangle \\ \langle |E_H|^2 - |E_V|^2 \rangle \\ 2\text{Re}\langle E_H E_V^* \rangle \\ 2\text{Im}\langle E_H E_V^* \rangle \end{bmatrix} \\
 (3.2-1) & & (3.2-2) & (3.2-3)
 \end{aligned}$$

Il est possible d'obtenir la matrice de Kennaugh directement de la matrice complexe de rétrodiffusion $[S_2]$ par une série d'expansions que nous ne présentons pas ici (voir Boerner 2005, section 3). La cible sera représentée par une matrice de Kennaugh ($[K_4]$) qui contiendra, comme la matrice complexe $[S_2]$, l'ensemble des caractéristiques polarimétriques d'une cible donnée. Cette matrice permet une représentation de la magnitude et de la phase relative selon (ici en base H-V) :

$$\begin{aligned}
 [K_4] &= & (3.2-4) \\
 \begin{bmatrix} \frac{1}{2}\langle |S_{hh}|^2 + 2|S_{hv}|^2 + |S_{vv}|^2 \rangle & \frac{1}{2}\langle |S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2 \rangle & \text{Re}\langle (S_{hh} + S_{vv})S_{hv}^* \rangle & -\text{Im}\langle (S_{vv} - S_{hh})S_{hv}^* \rangle \\ \frac{1}{2}\langle |S_{hh}|^2 - |S_{vv}|^2 \rangle & \frac{1}{2}\langle |S_{hh}|^2 - 2|S_{hv}|^2 + |S_{vv}|^2 \rangle & \text{Re}\langle (S_{hh} - S_{vv})S_{hv}^* \rangle & \text{Im}\langle (S_{vv} + S_{hh})S_{hv}^* \rangle \\ \text{Re}\langle (S_{hh} + S_{vv})S_{hv}^* \rangle & \text{Re}\langle (S_{hh} - S_{vv})S_{hv}^* \rangle & \langle |S_{hv}|^2 + \text{Re}\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle \rangle & \text{Im}\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle \\ -\text{Im}\langle (S_{vv} - S_{hh})S_{hv}^* \rangle & \text{Im}\langle (S_{vv} + S_{hh})S_{hv}^* \rangle & \text{Im}\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle & \langle |S_{hv}|^2 - \text{Re}\langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle \rangle \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

La matrice de Kennaugh est aussi construite selon le principe de la réciprocité qui implique l'égalité $S_{HV} = S_{VH}$. Il existe d'autres formes de représentation en puissance de l'onde polarisée dont la matrice de Stokes ($[S_4]$)³ ou la matrice de Mueller ($[M_4]$). Il existe dans la littérature une confusion entre ces matrices qui provient en partie du système de coordonnées (BSA ou FSA⁴) utilisé pour modéliser le système d'antenne Tx/Rx. En résumé, la matrice $[K_4]$ sera utilisée dans le système BSA alors que la matrice $[M_4]$ sera utilisée dans le système FSA. On consultera à ce sujet Guissard (1994), Pottier et Saillard (1992), Luneberg (2002) ainsi que Boerner (1999, §5-3.5). De plus, ces matrices sont fonctionnellement équivalentes puisqu'il est possible de passer de l'une à autre sans perte d'information (voir Cloude (1994), fig.1, p.292).

La graphique de la réponse polarimétrique (van Zyl et al., 1987; Evans et al., 1988), correspond à une projection de la sphère de Poincaré sur un plan. Ce graphique permet d'évaluer la puissance rétrodiffusée ($P_{\psi\chi}$) pour l'ensemble des combinaisons possibles d'angles d'orientation (ψ) et d'ellipticité (χ) en mode co-polaire et ortho-polaire :

$$\{P_{\psi\chi}\} = \{\vec{S}_R^T [K_4] \vec{S}_T\} \text{ pour } 0^\circ \leq \psi \leq 180^\circ \text{ et } -45^\circ \leq \chi \leq 45^\circ \quad (3.2-5)$$

Le graphique de la réponse polarimétrique permet d'identifier visuellement le ou les mécanisme(s) de rétrodiffusion dominants d'une cible par comparaison avec la signature polarimétrique d'une cible canonique (cf. §3.3.1). Le graphique de la signature polarimétrique permet également une estimation de la fraction non polarisée d'une cible via la «hauteur du piédestal» qui est équivalente au degré de polarisation (3.1-15). Les décompositions polarimétriques (cf. §3.4) ont aujourd'hui largement remplacé l'utilisation du graphique de la

³ Considérée parfois à tort comme un synonyme de la matrice de Kennaugh.

⁴ **FSA** pour *Forward Scattering Alignment* ou « alignement dans le sens de l'onde » et **BSA** pour *Back Scatter Alignment* ou « alignement vers la cible ». Il est possible de passer d'un système de coordonnées à l'autre sans perte d'information, la différence n'étant liée qu'à un changement de signe dans les diverses notations du vecteur de Stokes (et pas extension pour certains coefficients des matrices de Stokes, de Kennaugh ou de Mueller). Une conséquence plus importante (évidente) concerne la différence de phase. Considérant que chaque bond d'une onde EM ajoute une différence de phase de 180° entre ses composantes orthogonales, on obtient :

Type de diffuseur	Nombre de bonds	Différence de phase $\Delta\phi$ (modulo 2π)	
		BSA	FSA
Surface (et spéculaire)	1	180°	0°
Dièdre	2	0°	180°
Trièdre	3	180°	0

Au sujet des systèmes de coordonnées on consultera, entre autres, Cloude (2010) §1.4.2 ; Lee et Pottier (2009), § 3.1.3 ; ou encore Cloude (1994), fig.1, p.292.

réponse polarimétrique pour l'interprétation des mécanismes de rétrodiffusion. Mais avant de traiter des décompositions, il est d'abord nécessaire d'introduire les matrices de covariance et de cohérences sur lesquelles ces décompositions sont basées.

3.2.2. Matrices de covariance ($[C_3]$) et de cohérence ($[T_3]$)

La matrice de cohérence $[T_3]$ permet de mesurer la corrélation entre les composantes du champ électrique pendant un intervalle de temps t contrairement à la matrice $[S_2]$. De plus, la matrice de cohérence (ou de covariance) permet de calculer une moyenne d'ensemble $\langle \dots \rangle$ sur plusieurs cellules de résolution (pixels) contiguës pour la réduction du bruit inhérent aux images polarimétriques.

Une meilleure compréhension sur la manière d'extraire l'information physique de la matrice complexe de diffusion a été possible grâce à l'introduction du vecteur cible (\vec{k}) obtenu par la vectorisation ($V(*)$) de la matrice complexe de rétrodiffusion (Lee et *al.* 2009) :

$$\vec{k} = V([S_2]) = \frac{1}{2} Tr([S_2] \Psi) \quad (3.2-6)$$

où Ψ représente une base de projection orthonormée composée d'un ensemble de matrices complexes de taille 2x2 obtenues par le produit interne Hermitien. Deux bases sont couramment employées en polarimétrie radar soit la base lexicographique ($\{\Psi_L\}$) et la base de Pauli ($\{\Psi_P\}$). Ces bases comportent quatre matrices orthogonales pour la vectorisation de la matrice $[S_2]$, ce nombre est cependant réduit à trois pour une configuration radar monostatique car la symétrie de $[S_2]$ est présumée ($S_{hv} = S_{vh}$). La base de Pauli $\{\Psi_P\}$ mène à la construction de la matrice de cohérence $[T_3]$ (Lee et *al.*, 2009). Soit la base de Pauli :

$$\{\Psi_P\} = \left\{ \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.2-7)$$

On obtient de la vectorisation de la matrice $[S]$ le vecteur de Pauli (vecteur cible k) :

$$\vec{k}_t = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{hh} + S_{vv}, S_{hh} - S_{vv}, 2S_{hv}]^T \quad (3.2-8)$$

Et la matrice de cohérence est générée par le produit externe du vecteur cible avec sa conjuguée transposée:

$$[T_3] = \langle \vec{k}_t \cdot \vec{k}_t^{*T} \rangle$$

$$= \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \langle |S_{hh} + S_{vv}|^2 \rangle & \langle (S_{hh} + S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 2\langle (S_{hh} + S_{vv})S_{hv}^* \rangle \\ \langle (S_{hh} - S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & \langle |S_{hh} - S_{vv}|^2 \rangle & 2\langle (S_{hh} - S_{vv})S_{hv}^* \rangle \\ 2\langle S_{hv}(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 2\langle S_{hv}(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 4\langle |S_{hv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3.2-9)$$

où $\langle \dots \rangle$ indique une moyenne d'ensemble spatiale ou temporelle sous l'hypothèse que le médium est homogène (Lee et *al.* 2009). Selon la même procédure, la matrice de covariance $[C_3]$ est obtenue par la vectorisation de la matrice $[S_2]$ par la base lexicographique ($\{\Psi L\}$) :

$$\{\Psi L\} = \left\{ 2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2\sqrt{2} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, 2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \right\} \quad (3.2-10)$$

donnant le vecteur lexicographique :

$$\vec{k}_c = [S_{hh}, \sqrt{2}S_{hv}, S_{vv}]^T \quad (3.2-11)$$

à partir duquel la matrice de covariance $[C_3]$ sera obtenue par :

$$[C_3] = \langle \vec{k}_c \cdot \vec{k}_c^{*T} \rangle = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{hh}S_{hv}^* \rangle & \langle S_{hh}S_{vv}^* \rangle \\ \sqrt{2}\langle S_{hv}S_{hh}^* \rangle & 2\langle |S_{hv}|^2 \rangle & \sqrt{2}\langle S_{hv}S_{vv}^* \rangle \\ \langle S_{vv}S_{hh}^* \rangle & \sqrt{2}\langle S_{vv}S_{hv}^* \rangle & \langle |S_{vv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3.2-12)$$

L'apparition des facteurs 2, $\sqrt{2}$ ou $2\sqrt{2}$ provient de la nécessité de garder la norme des vecteurs indépendante du choix de la base de vectorisation et égale à la puissance totale de la matrice $[S_2]$ (i.e. le *span*) mesurée par sa trace (Lee et Pottier, 2009). Notons que les matrices de covariance et de cohérence contiennent la même information, il est ainsi possible de passer de l'une à l'autre sans pertes d'information au moyen d'une transformation unitaire.

3.3. Notions d'importantes liées à la compréhension des décompositions polarimétriques

L'interprétation des résultats provenant des décompositions polarimétriques, tout comme les réponses polarimétriques, se base en partie par comparaison avec des cibles canoniques. Les

cibles canoniques représentent des structures géométriques simples dont l'interprétation est facile dues à la présence de plan de symétrie dans les matrices utilisées pour les représenter. En retour, la plupart des décompositions polarimétriques ont utilisés des hypothèses basées sur les plans de symétrie pour simplifier l'analyse des cibles distribuées.

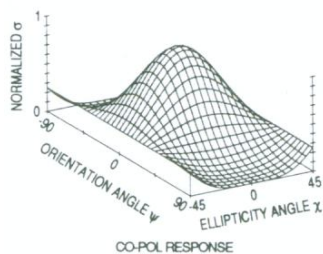
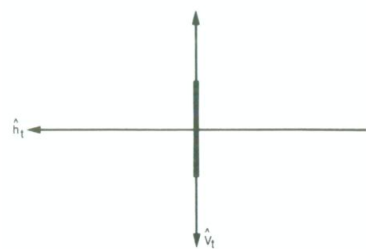
3.3.1. Les cibles canoniques

La sphère et le trièdre possèdent la même matrice de diffusion et par extension la même signature polarimétrique. Elle diffère cependant quant au nombre de bonds du signal rétrodiffusé qui est égal à 1 dans le cas de la sphère et à trois dans le cas du trièdre. Dans les deux cas, le nombre impair de bonds produira une différence de phase de 0° (note 4). Une différence plus fondamentale tient aux plans de symétrie. Pour des raisons évidentes, la sphère possède une symétrie parfaite et qu'importe la rotation que l'on peut y appliquer, la réponse polarimétrique résultante sera toujours la même. Il n'est pas de même pour le trièdre une rotation de ce dernier causera une modification de la matrice complexe de diffusion. Le dièdre implique deux bonds de l'onde incidente avant que cette dernière ne soit rétrodiffusée et une différence de phase de 180° sera obtenue. En comparant les matrices de rétrodiffusion, on remarque que seule la phase permet de distinguer ces deux types de cibles largement utilisées en polarimétrie que ce soit comme élément de base d'un théorème de décomposition ou encore comme cible de référence pour l'étalonnage des capteurs polarimétriques. La rotation du dièdre modifiera également sa matrice de diffusion (Figure 3.3-1-C). Si cette rotation survient uniquement dans le plan orthogonal à la direction selon un angle de visée du radar, selon un angle ϕ , la dépolarisation causée par cette rotation sera déterministe et pourra être annulée puisque les phases relatives entre HH, HV et VV peuvent être estimées par les mesures des signaux.

La notion de rotation est aussi mise en évidence par les différentes signatures polarimétriques d'un dipôle (D à E). Ce type de cible, représentée par un cylindre très mince beaucoup plus long que large, produit une très forte rétrodiffusion dans le canal aligné avec l'axe long et une rétrodiffusion nulle dans la polarisation orthogonale. Le cas d'un dipôle orienté selon un angle ϕ crée une dépolarisation (dans la base H-V) visible par les éléments non nuls hors de la diagonale. L'hélice produit aussi une dépolarisation déterministe du signal avec la particularité de modifier l'orientation de l'ellipse de polarisation. Il n'existe pas de cibles correspondant

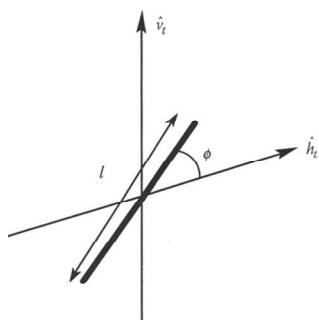
spécifiquement à une hélice mais il est possible de produire artificiellement ce type de rétrodiffusion en associant deux dièdres orientés à 45° l'un par rapport à l'autre. Ce type de rétrodiffusion peut aussi survenir dans un milieu urbain.

Représentation géométrique	Signature polarimétrique copolaire	Matrice complexe de diffusion
		$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
		$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
		$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ <p>Dièdre orienté selon un angle ϕ</p>
		$S = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$



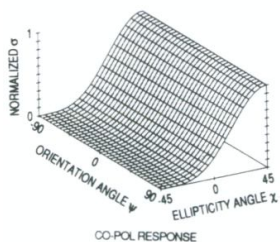
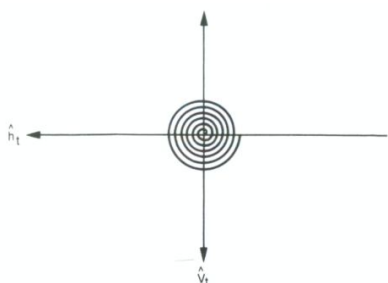
$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(E) Dipôle vertical



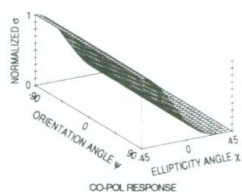
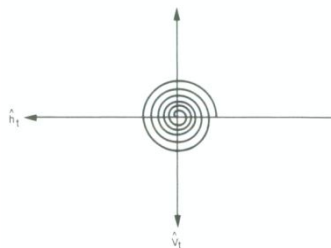
$$S = \begin{bmatrix} \cos^2 \phi & \frac{1}{2} \sin^2 \phi \\ \frac{1}{2} \sin^2 \phi & \sin^2 \phi \end{bmatrix}$$

(F) Dipôle orienté



$$S = \frac{e^{-j2\phi}}{2} \begin{bmatrix} 1 & j \\ j & -1 \end{bmatrix}$$

(G) Hélice gauche



$$S = \frac{e^{-j2\phi}}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & -1 \end{bmatrix}$$

(H) Hélice droite

Figure 3.3-1 : Cibles canoniques et signatures polarimétriques copolarisées associées dans la base H-V

Source (Imagettes) : van Zyl et Ulaby (1990), p.33 à 45.

3.3.2. Les plans de symétrie

Les plans de symétrie sont une notion importante en polarimétrie radar car ils permettent de simplifier la compréhension et l'analyse du signal polarimétrique. Plusieurs algorithmes ont été basés sur des hypothèses liées aux plans de symétrie, notamment pour l'étalonnage des capteurs polarimétriques (van Zyl, 1990; Freeman, 1992; Quegan, 1994), la polarimétrie

compacte (Sourys et *al.*, 2005; Dubois-Fernandez et *al.*, 2008), l'estimation des pentes azimutales (Schuler et *al.*, 2000; Lee et *al.*, 2002, Ainsworth et *al.* (2008) et certaines décompositions polarimétriques (Freeman et Durden, 1998).

Pour un médium donné, la **symétrie de réflexion** survient lorsqu'il y a une contribution équivalente des diffuseurs (Figure 3.3-2, Q et P ou encore selon $P \perp$) de part et d'autre d'un plan parallèle à l'axe de visée (LOS) du RSO (Lee et Pottier, 2009). La symétrie de réflexion égalise donc les coefficients de rétrodiffusion mesurés dans une base de polarisation linéaire et rend nulle la corrélation entre les coefficients copolaires et croisés (Nghiem et *al.*, 1992) (éq. (3.3-1)). La matrice de cohérence se réduit alors à cinq paramètres (éq. (3.3-2) :

$$\langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle = \langle S_{vv} S_{vh}^* \rangle = 0 \quad (3.3-1)$$

$$[T_3] = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh} + S_{vv}|^2 \rangle & \langle (S_{hh} + S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 0 \\ \langle (S_{hh} - S_{vv})(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & \langle |S_{hh} - S_{vv}|^2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 & 4 \langle |S_{hv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3.3-2)$$

La symétrie de réflexion est valide pour la rétrodiffusion volumique et de surface (Nghiem et *al.*, 1992) et plus spécifiquement pour les surfaces d'eau calme ou avec vagues (si elles sont perpendiculaires à l'axe de visée), la forêt dense, la neige, la glace de mer et les surfaces dénudées s'il y a absence de sillons (Sourys et *al.*, 2005).

La **symétrie de rotation** implique que la matrice de cohérence $[T_3]$ demeurera invariante en fonction d'une rotation autour de l'axe de visée du RSO selon un angle (θ dans le plan P_T). La matrice moyennée selon l'orientation $[T_3]\theta$ est obtenue selon la transformation suivante (Lee et Pottier, 2009) :

$$[T_3](\theta) = R_3(\theta)[T_3]R_3(\theta)^{-1} \quad (3.3-3)$$

La matrice R_3 est une matrice de rotation équivalente à :

$$R_3(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \quad (3.3-4)$$

En appliquant la transformation précédente selon un angle θ , la matrice de cohérence prend la forme suivante (Lee et Pottier, 2009) :

$$[T_3] = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh} + S_{vv}|^2 \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle |S_{hh} - S_{vv}|^2 \rangle & 2\langle (S_{hh} - S_{vv})S_{hv}^* \rangle \\ 0 & 2\langle S_{hv}(S_{hh} + S_{vv})^* \rangle & 4\langle |S_{hv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3.3-5)$$

On peut assimiler cette forme de symétrie à la rotation d'un dipôle dans un plan parallèle à la base de polarisation linéaire employée.

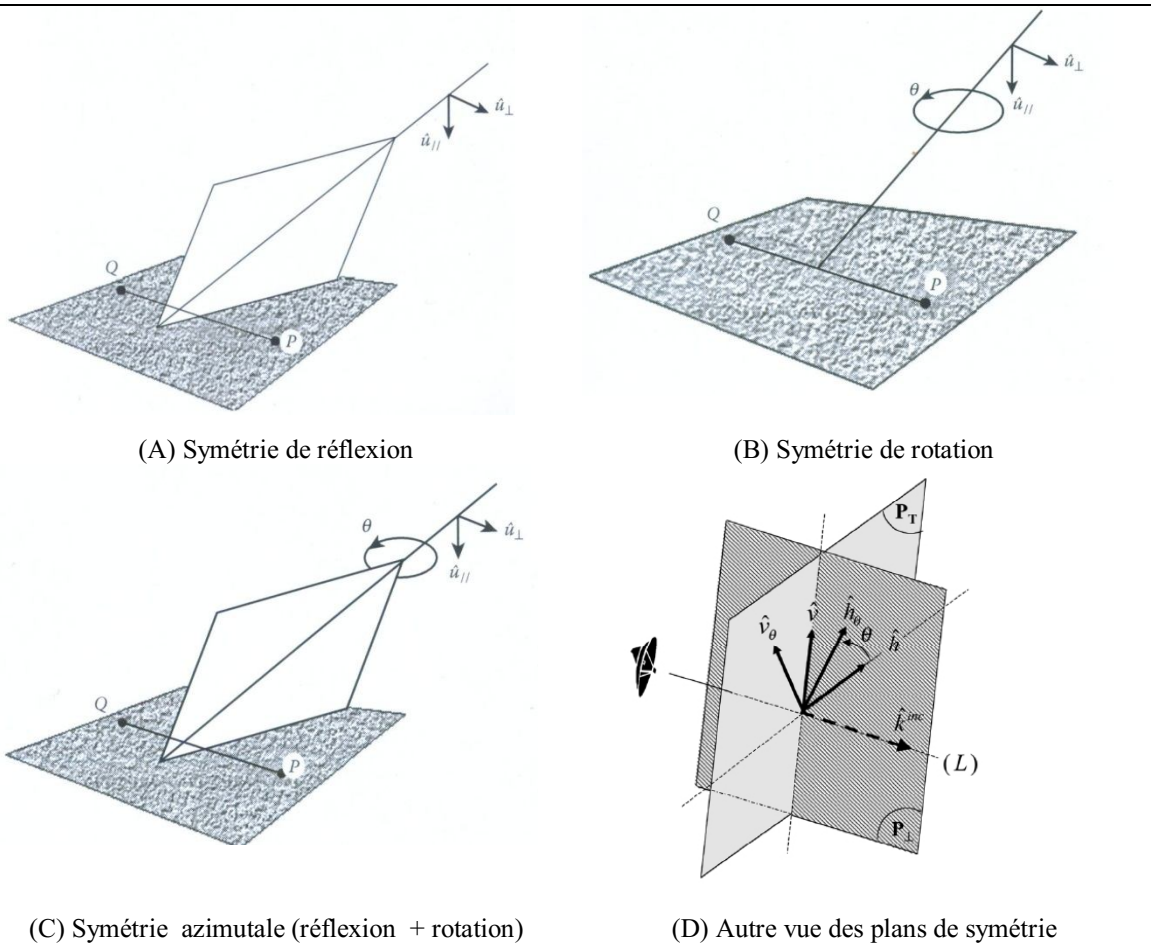


Figure 3.3-2 : Les plans de symétrie de l'onde rétrodiffusée

Sources : A-B et C) Lee et Pottier, fig 3.9, 3.10 et 3.11, p. 69-71, D) Sourys (2005), fig.1, p.2

La **symétrie azimutale** survient lorsqu'une cible se caractérise tout autant par une symétrie de réflexion que par une symétrie de rotation (Lee et Pottier, 2009), la matrice de cohérence se réduit alors à trois paramètres :

$$[T_3] = \begin{bmatrix} \langle |S_{hh} + S_{vv}|^2 \rangle & 0 & 0 \\ 0 & \langle |S_{hh} - S_{vv}|^2 \rangle & 0 \\ 0 & 0 & 4\langle |S_{hv}|^2 \rangle \end{bmatrix} \quad (3.3-6)$$

La symétrie centrale (*central symmetry*) introduite par Nghiem et *al.* (1992) est une extension de la symétrie azimutale pour laquelle la symétrie azimutale demeure valide quel que soit l'angle d'observation (symétrie 3D).

3.3.3. La calibration des capteurs polarimétriques

Il existe plusieurs architectures de base permettant d'implémenter un radar polarimétrique (voir par exemple van Zyl et *al.*, 1987; Zebker et van Zyl., 1991; Touzi et *al.*, 2005), dont les différences majeures résident (sans s'y limiter) dans la configuration de la réception du signal et l'isolation des différentes composantes matérielles (c.-à-d. le hardware). Ainsi la calibration d'un RSOPOL est plus complexe que celle d'un RSO à polarisation unique car il ne s'agit pas seulement de s'assurer que la valeur de σ^0 (en dB) est stable dans le temps pour une cible donnée (Figure 3.3-3).

Qu'importe la qualité de conception du capteur radar, il y aura inévitablement une corruption des éléments de la matrice de diffusion causée par les imperfections des composantes matérielles causant, par exemple, un **cross-talk** entre les canaux, un déséquilibre (imbalance) en amplitude ou en phase dans les systèmes de réception et de transmission (Cloude, 2010, p.350). La calibration est le processus visant à réduire l'influence de ces imperfections sur la matrice de diffusion $[S_2]$ et est d'une importance particulière en polarimétrie radar. Un débalancement des canaux mènera par exemple à une interprétation erronée du ou des mécanismes de rétrodiffusion pour une cellule de résolution donnée. Il existe plusieurs techniques permettant de calibrer une image polarimétrique (Figure 3.3-3) et une méthodologie efficace de calibration sera généralement basée sur quelques une d'entre elles.

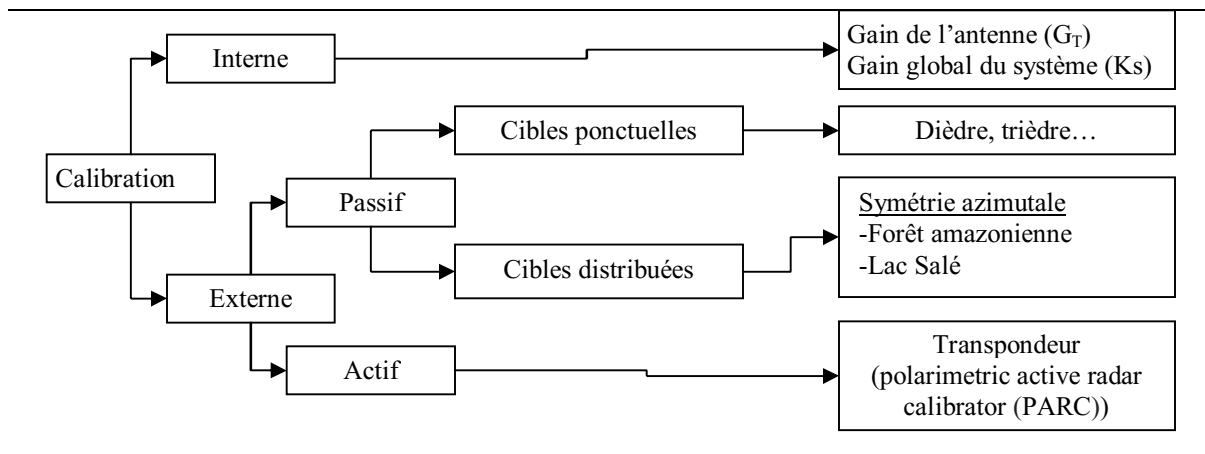


Figure 3.3-3 : Différents types de calibration applicable aux capteurs RSO et RSOPOL

L'ensemble de ces techniques est résumé dans Freeman (1992). La calibration interne se fait en majorité lors de la conception du système et repose sur une étude rigoureuse de la directivité du diagramme de rayonnement de l'antenne (*antenna pattern*) et de la capacité des composantes matérielles à transmettre et à recevoir le signal sans introduire de bruit. La calibration passive se base sur l'utilisation de cibles ponctuelles déployée au sol donc la section radar normalisée (SRN) est connue avec précision. Ensuite la SRN de cette cible mesurée par le radar est comparée à la SRN théorique (pour un pixel ou un petit groupe de pixels) et les différences seront compensées pour l'ensemble de l'image. L'ensemble du processus de calibration (la compensation des erreurs) se résume par le modèle suivant couramment utilisé pour la calibration des radars polarimétriques modernes (Freeman, 1992) :

$$M = \sqrt{K_s} e^{j\phi_s} \begin{pmatrix} 1 & \delta_1 \\ \delta_2 & f_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_{hh} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{vv} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & \delta_4 \\ \delta_3 & f_2 \end{pmatrix} + \sqrt{K_n} \begin{pmatrix} n_{hh} & n_{vh} \\ n_{hv} & n_{vv} \end{pmatrix} \quad (3.3-1)$$

$$\equiv \sqrt{K_s} e^{j\phi_s} [R]^T [S] [T] + \sqrt{K_n} N \quad (3.3-2)$$

où δ_1 et δ_2 représentent le cross-talk (impuretés de polarisation) en HV et VH à la réception (et δ_3 et δ_4 à la transmission); f_1 représente le déséquilibre (amplitude et phase) entre les canaux H et V à la réception (et f_2 à la transmission); K_s est un terme qui représente le gain global du système radar (devrait être =1 pour un radar calibré); K_n est un terme qui représente le bruit du système; n_{xy} le bruit des éléments de la matrice de diffusion et finalement ϕ_s la phase absolue. La calibration polarimétrique se concentre surtout sur la correction du cross-talk, du déséquilibre des canaux et du bruit des éléments de la matrice de diffusion. Ainsi, la calibration de la phase absolue est ignorée, $K_s=1$ et K_n est absorbé dans le bruit des éléments de la matrice de diffusion (Freeman, 1992). Le problème posé par la calibration consiste donc

à calculer la matrice de diffusion S à partir de la matrice $[M]$ qui a été mesurée par une estimation des matrices $[R]$ et $[T]$ qui représentent les caractéristiques polarimétriques à la réception et à l'émission. Idéalement, pour un capteur polarimétrique parfait, $[R]$ et $[T]$ seront représentés par une matrice identité. Une fois $[R]$ et $[T]$ estimées, elles peuvent être inversées et appliquées à l'équation (3.3-2) pour obtenir une estimation de $[S]$:

$$[\hat{S}] = [\hat{R}^T]^{-1} [M] [\hat{T}^T]^{-1} = [S] + [\hat{R}^T]^{-1} [N] [\hat{T}^T]^{-1} \quad (3.3-3)$$

où $\hat{}$ indique une estimation ($[\hat{R}] = [R]$ et $[\hat{T}] = [T]$).

La calibration requiert donc la solution du modèle précédent et repose sur un ensemble d'équations à plusieurs inconnues (les f et δ). Trois stratégies sont possibles pour résoudre ce problème (Freeman, 1992): 1) l'utilisation de cibles ponctuelles donc la matrice de diffusion est connue; 2) le recours à des hypothèses concernant les propriétés générales de la rétrodiffusion mesurée et 3) le recours à des hypothèses concernant les paramètres du système radar. L'utilisation des cibles ponctuelles peut s'avérer efficace si plusieurs d'entre elles sont déployées simultanément sur le terrain (dipôle, trièdre, dièdre...). Cette solution n'est cependant pas pratique et peut devenir complexe lorsqu'on l'on tient compte des erreurs potentielles introduites par un mauvais alignement de ces cibles par rapport à la ligne de visée du radar. Une stratégie de calibration reposera en fait sur une combinaison d'éléments tirés des trois stratégies précédentes (Freeman, 1992). Dans le contexte des radars polarimétriques, van Zyl (1990) proposa un modèle basé sur une série d'hypothèses concernant la rétrodiffusion et les paramètres du système afin de simplifier la calibration dont :

$$\delta_1 = \delta_3, \quad \delta_2 = \delta_4, \quad f_1 = f_2 \quad (3.3-4)$$

sous l'hypothèse, entre autres, de la réciprocité du signal. Une autre hypothèse émise par van Zyl (1992) est que la plupart des cibles naturelles (distribuées) présentent une symétrie azimutale (voir §5) ce qui implique une décorrélation complète des polarisations linéaires et ortholinéaires :

$$\langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle = 0, \quad \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle = 0 \quad (3.3-5)$$

L'hypothèse de la symétrie azimutale est importante pour la calibration à long terme (en continu) des capteurs polarimétriques montrée sur un satellite. Diverses cibles distribuées

possédant une symétrie azimutale sont utilisées dont des secteurs de la forêt amazonienne ou encore de désert correspondant à d'anciens lits de lac dont la surface est très plane.

Il a été démontré que la calibration de van Zyl (1990) [et généralisée dans Freeman et *al.*, (1992), Quegan, (1994)] basée sur les cibles naturelles à symétrie azimutale produit une estimation biaisée du cross-talk lorsque les polarisations orthopolaires sont beaucoup plus faibles que les polarisations linéaires. Ainsi, si l'antenne Tx/Rx est mal isolée (mauvais rapport SNR), la calibration des images polarimétriques peut devenir très difficile. Il existe aujourd'hui des techniques améliorées de calibration pour les modes polarimétriques de RS2 et ALOS, ces techniques ne supposent plus, en autres, la réciprocité du signal tout en corrigeant l'effet de la rotation de Faraday qui affecte la phase en bande L (Freeman, 2004; Touzi et Shimada, 2009; Touzi et *al.*, 2010).

3.4. Les décompositions polarimétriques

3.4.1. Décompositions cohérentes vs décompositions incohérentes

Le but d'une décomposition cohérente consiste à exprimer la matrice complexe de diffusion $[S_2]$ mesurée par le radar comme une combinaison de matrices $[S_2]_i$ correspondant à des objets simples (Lopez-Martinez et *al.*, 2005), également appelés cibles canoniques.

$$[S_2] = \sum_{i=1}^k c_i [S_2]_i \quad (3.4-1)$$

L'indice c_i correspond au poids (pondération) de l'objet dans la combinaison de cibles (au nombre de k) menant à la matrice $[S_2]$ mesurée. Afin de simplifier la compréhension de $[S_2]$, il est souhaitable que les matrices $[S_2]_i$ soient indépendantes les unes des autres pour éviter qu'un mécanisme de rétrodiffusion particulier ne soit présent dans plus d'une d'entre elles. Pour éviter cette situation, des conditions strictes d'orthogonalités entre les matrices $[S_2]_i$ sont la plupart du temps imposées (Lopez-Martinez et *al.*, 2005). Évidemment, si une cible est cohérente (très polarisée), le nombre de matrices $[S_2]_i$ nécessaires pour obtenir une description adéquate de $[S_2]$ sera faible, typiquement égal à $k=1$. Par analogie, il est donc

possible de définir une décomposition polarimétrique comme une forme de classification non supervisée des images polarimétriques.

Pour les cibles distribuées, une représentation du second ordre est nécessaire et les matrices de cohérence $[T_3]$ et de covariance $[C_3]$ sont utilisées à cette fin (§4.4.5). Les décompositions incohérentes du signal polarimétrique reposent sur le même principe que celui présenté à l'équation 5.1-1. Les décompositions incohérentes représentent ces matrices comme une combinaison de descripteurs du second ordre ($[T_3]_i, [C_3]_i$) correspondant à des objets plus simples pour en faciliter l'interprétation (Lopez-Martinez et *al.*, 2005).

$$\langle [C_3] \rangle = \sum_{i=1}^k p_i [C_3]_i \quad (3.4-2) \quad \langle [T_3] \rangle = \sum_{i=1}^k p_i [T_3]_i \quad (3.4-3)$$

où la contribution de chaque descripteur à $\langle [T_3] \rangle$ ou $\langle [C_3] \rangle$ est pondéré par un coefficient p_i . Tout comme pour les décompositions cohérentes, il est préférable que les composantes $[T_3]_i$ ou $[C_3]_i$ soient indépendantes et, dans un sens plus strict, mutuellement orthogonales (Lopez-Martinez et *al.*, 2005). Les bases permettant de décomposer $\langle [T_3] \rangle$ ou $\langle [C_3] \rangle$ ne sont pas uniques et plusieurs théorèmes de décomposition sont possibles. Les bases utilisées peuvent être classées selon si elles sont d'origine mathématique (analyses en vecteurs propres) ou physique (c'est-à-dire basé sur un modèle de rétrodiffusion).

3.4.2. Historique

Plusieurs théorèmes de décomposition du signal polarimétrique ont été proposés au cours des quarante dernières années. La Figure 3.4-1 en présente un aperçu. Outre les publications originales de leurs auteurs indiqués sur cette figure, plusieurs de ces décompositions sont revues dans les ouvrages suivants : Cloude et Pottier (1996), Unal et Ligthart (1998), Boerner (1999), Touzi et *al.* (2004); Lopez-Martinez et *al.* (2005) ainsi que Lee et Pottier (2009).

La première décomposition largement reconnue fut développée en 1970 par J.R Huynen basé à la fois sur le concept de la "fourchette de polarisation" (voir Boerner 1998, p.281) et des recherches de Kennaugh. La première décomposition de Huynen consistait à diagonaliser la

matrice de Sinclair⁵ par une série de rotations utilisant une série de bases orthogonales similaires à celles présentées à la section 4.4.4. Cette décomposition cohérente de la matrice de Sinclair permettait d'interpréter une cible selon 6 paramètres $(m, \psi, \tau_m, \nu, \gamma, \zeta)$, chacun exprimant une caractéristique de cette dernière soit : 1) m , section radar maximale de la cible; 2) ψ , l'angle d'orientation de la cible autour de l'axe de visée du RSO ($-90^\circ \leq \psi \leq 90^\circ$); 3) τ_m , l'angle d'hélicité correspondant à la symétrie de la cible ($-45^\circ \leq \tau_m \leq 45^\circ$); 4) ν , angle de rebond pair-impair de l'onde ($45^\circ \leq \nu \leq 45^\circ$, $\nu=0$ pour un bond unique et $\nu = \pm 45^\circ$ pour un double-bond); 5) γ , l'angle caractéristique de la cible (*polarizability angle*), c'est-à-dire la sensibilité de la cible à un changement de la polarisation ($\gamma=0$ pour une cible linéaire tel un dipôle à $\gamma=\pi/4$ pour une sphère ou une surface plane); 6) ζ , la phase absolue de la cible [Lee et Pottier (2009), p.91 ainsi que Boerner (1998) p.287].

Huynen (1970) étendit cette décomposition aux cibles distribuées par le développement d'une décomposition incohérente basée sur la matrice de Kennaugh $[K_4]$. Cette dernière divisait le signal d'une cible en deux parties : une partie représentant le type de diffusion de la cible (associée à une cible canonique cohérente) et une partie résiduelle appelée *N-target* (d'où la mention de dichotomie). Le *N-target* peut être envisagé comme étant la portion dépolarisée du signal (équivalente au piédestal de la signature polarimétrique) ou encore comme étant la partie non symétrique de la cible qui ne varie pas en fonction d'une rotation de la cible selon un angle ψ autour de l'axe de visée du radar (LOS).

Krogager (1990), pour sa part, proposa une décomposition cohérente reposant sur une factorisation de la matrice $[S_2]$ en base circulaire. Cette décomposition interprète la rétrodiffusion d'une cible comme la combinaison de la rétrodiffusion d'une sphère, d'un diplan (dièdre) et d'une hélice (Lee et Pottier, 2009) à l'aide de 5 paramètres indépendants plus une phase. La volonté de donner une interprétation physique aux différents paramètres liés à des propriétés mesurables des cibles s'est faite au détriment de leur orthogonalité. Cette décomposition n'est donc pas invariante à la base de polarisation utilisée.

⁵ Équivalente à la matrice complexe de diffusion mais exprimée dans le système de coordonnées FSA. Voir la section 4.4.4.

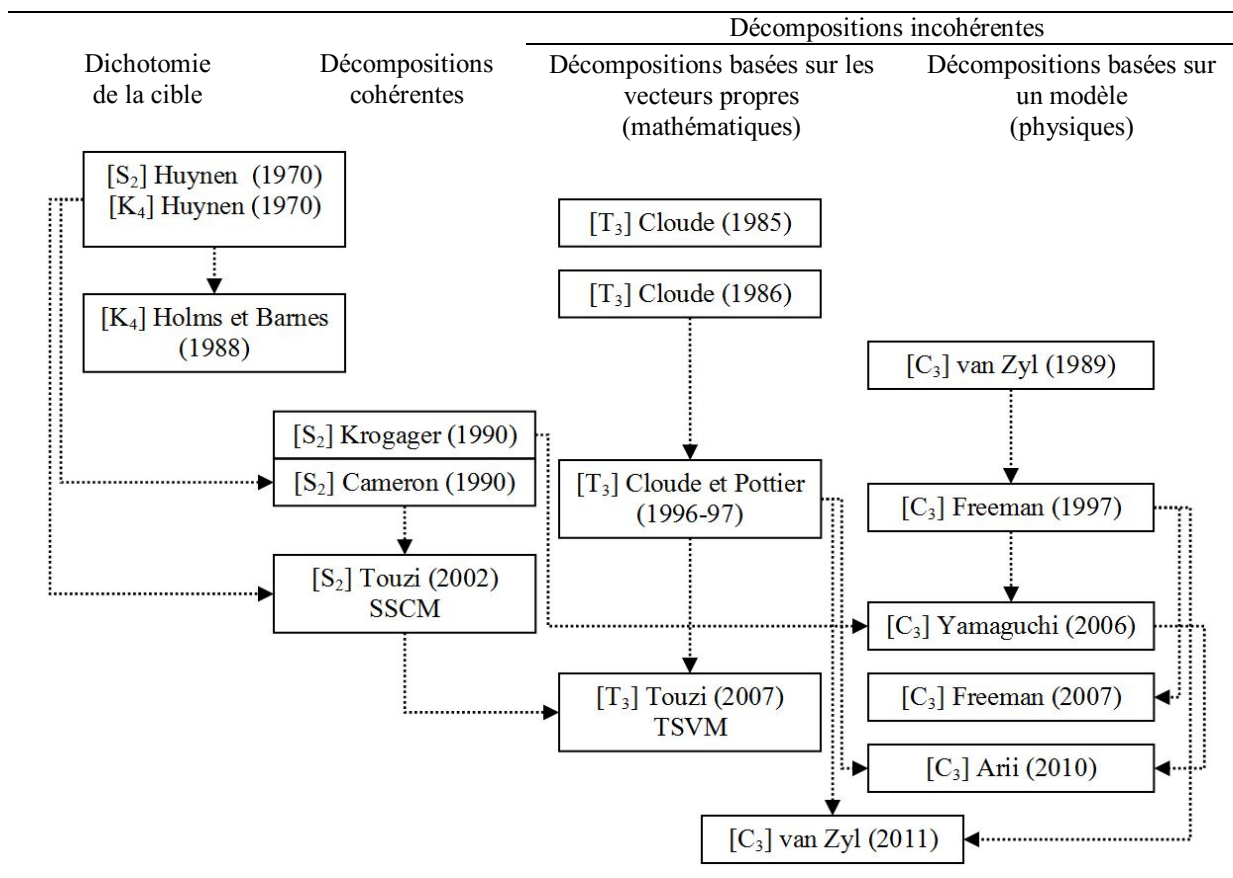


Figure 3.4-1 : Historique des principales décompositions du signal polarimétrique

Cameron *et al.* (1996) proposèrent également une décomposition cohérente de la matrice $[S_2]$, utilisant la base de Pauli, en trois parties soit : 1) une composante symétrique maximale (S_{sym}^{max}), 2) une composante symétrique minimale (S_{sym}^{min}) et 3) une composante non réciproque (S_{nr} impliquant que $S_{hv} \neq S_{vh}$). Une cible symétrique dans cette décomposition est définie comme une cible ayant un axe de symétrie dans un plan orthogonal à la direction de visée du capteur (LOS). Une matrice $[S_2]$ correspondra à une cible symétrique seulement si elle est diagonalisable par une transformation correspondant à une rotation rigide autour du LOS. Le degré de symétrie d'une cible est évalué par l'hélicité (τ) (Cameron *et al.* 1996, éq. 41 et 46). Lorsque $\tau = 0^\circ$ la cible sera considérée comme étant parfaitement symétrique alors que $\tau = \pm 45$ indique une cible non symétrique correspondant à une hélice gauche (+) ou droite (-). Pour identifier la nature de la composante S_{sym}^{max} , Cameron utilisa une métrique de distance $d(z_1, z_2)$ comparant la matrice $[S_2]$ de la composante $S_{sym}^{max}(z_1)$ à une série de matrices $[S_2](z_2)$ de référence correspondant chacune à une cible canonique. La cible canonique

minimisant la distance $d(z_1, z_2)$ étant ensuite attribuée à la cible sous examen (dièdre, dièdre étroit, dipôle, cylindre, trièdre ou quart d'onde).

La SSCM (*Symmetric Scattering Characterization Method*) proposée par Touzi et Charbonneau (2002), se voulait à la fois une extension et une amélioration de la décomposition de Cameron (Cameron et al., 1996) réutilisant le concept de symétrie (τ_m) introduit par Huynen. Parmi les principales critiques émises à l'endroit de la décomposition de Cameron on notait (Touzi et Charbonneau, 2002; Touzi et al., 2004) : 1) une caractérisation grossière du type de rétrodiffusion symétrique (S_{sym}^{\max}) introduite par la métrique $d(z_1, z_2)$ correspondant à une description discrète de la cible alors qu'une représentation continue est possible et souhaitable; 2) l'absence de test permettant de déterminer si une cible donnée est cohérente ou non. En d'autres mots, s'il est toujours possible d'identifier une cible canonique dominante pour un pixel donné ($c_i[S_2]_i$), il est nécessaire d'évaluer si cette dernière est réellement représentative de $[S_2]$. Pour combler ces lacunes, la SSCM intégra un test de cohérence et remplaça la catégorisation discrète de S_{sym}^{\max} par une représentation en continu. Cette représentation en haute résolution de S_{sym}^{\max} utilise une paire de coordonnées (ψ_c, χ_c) correspondant respectivement à longitude et à la latitude de S_{sym}^{\max} sur la sphère de Poincaré qui est exprimée dans la base trièdre-dièdre (Figure 3.4-2).

Au milieu des années 80, Cloude (Cloude, 1986) fonda les bases d'une décomposition mathématique de la matrice de cohérence apparentée à une analyse en composantes principales. Ce type de décomposition est basé sur l'analyse des vecteurs et valeurs propres de la matrice $\langle [T_3] \rangle$ (moyennée et hermitienne) qui peut être physiquement interprétée comme la somme de trois matrices ($\langle [T_3]_i \rangle$, $i=1,2,3$) non corrélées représentant chacune un vecteur unitaire (voir équations 3 et 4 de Cloude et Pottier, 1997) contenant les caractéristiques de la cible. Si seulement une des valeurs propres est non nulle (λ_i , $i=1,2,3$), la matrice correspond à une cible pure (déterministe). Si les trois valeurs propres de la matrice $\langle [T_3] \rangle$ sont égales ($\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$), la cible est composée de trois mécanismes de diffusion orthogonaux d'égale amplitude et correspond alors à une cible aléatoire n'ayant pas de structure particulière.

Chaque vecteur cible issu de la décomposition comporte 6 paramètres [$\vec{e}_{Ci} = (\alpha_i, \gamma_i, \beta_i, \delta_i, \phi_i, \lambda_i), i=1,2,3$] correspondant pour la plupart aux angles de rotations appliqués pour diagonaliser $\langle [T_3] \rangle$. Cette décomposition fut cristallisée dans Cloude et Pottier (1997) et l'information contenue dans les 18 paramètres fut résumée à deux paramètres $\bar{\alpha}_c$ et $\bar{\beta}_c$, représentant respectivement le type de rétrodiffusion global et l'angle d'orientation global de la cible. Cloude et Pottier (1997) introduisirent également l'entropie (H), correspondant à la somme du logarithme des valeurs propres normalisées (par le *span*), pour évaluer le degré de polarisation de $\bar{\alpha}_c$ formant le très répandu graphique *alpha-entropie*.

L'une des critiques émises à l'endroit des décompositions mathématiques concerne l'interprétation des paramètres obtenus qui parfois peut s'avérer difficile car éloigné des propriétés physiques réelles de la cible sous examen. Les décompositions basées sur un modèle tentent de combler cette lacune. L'un des premiers modèles physiques fut présenté par van Zyl (1989). Dans ce modèle, chaque pixel d'une matrice moyennée (Mueller ou Covariance) était classifié selon s'il appartenait à la classe de bond impair, pair ou volumique (diffus). Ce modèle développé pour les terrains naturels reposait sur l'hypothèse de la symétrie de réflexion (équation 5.3-1) pour simplifier l'analyse. Le modèle de van Zyl comportait également une classe "non classifiée" pour les cas présentant une rétrodiffusion complexe et jusqu'à 34% d'une scène pouvait ne pas être classifiée (voir van Zyl (1989), tab.III, p.43). La décomposition de Freeman et Durden (1998) est une extension du modèle de van Zyl (1989) adapté spécifiquement aux milieux forestiers. Cependant, cette décomposition estime la contribution de chaque classe de diffusion plutôt que d'attribuer une classe à un pixel donné. Cette décomposition a utilisé le modèle de diffusion de Bragg du premier ordre pour tenir compte de la contribution d'une surface moyennement rugueuse alors que la canopée est représentée comme un nuage de dipôles orientés aléatoirement. Les auteurs utilisèrent également une série d'hypothèses pour parvenir à résoudre leur modèle et estimer la contribution relative de chaque pixel. Outre la symétrie de réflexion, la composante volumique était directement estimée par $\langle 2|S_{HH}|^2 \rangle$ et soustraite à la matrice de covariance avant l'estimation des autres composantes. C'est donc dire que ni la composante de surface, ni la composante double-bond ne peuvent contribuer à la composante volumique et du coup l'effet de la rétrodiffusion multiple (voir Figure 3.5-1-E) est ignoré.

Considérer que σ_{hv}^0 n'est que le résultat d'une rétrodiffusion volumique aléatoire et dépolarisée est une limitation sévère de ce modèle même si l'on limite son applicabilité aux milieux forestiers. Yamaguchi et *al.* (2005; 2006) introduisirent une quatrième composante permettant de tenir compte des situations où il n'y a pas de symétrie de réflexion ($\langle S_{hh} S_{hv}^* \rangle \neq 0, \langle S_{hv} S_{vv}^* \rangle \neq 0$), par exemple pour les terrains avec une forte topographie, les sols très rugueux⁶ ou encore pour les structures géométriques complexes généralement présentes dans les milieux urbains. Cette quatrième composante, inspirée de l'hélice de Krogager (Krogager, 1990) est estimée et soustraite à la matrice de covariance avant l'estimation de la composante volumique. Les auteurs proposèrent également une redéfinition de la composante volumique basée sur le ratio $10 \log \left(\frac{\langle |S_{vv}^2| \rangle}{\langle |S_{vv}^2| \rangle} \right)$. Cela permettait d'adapter la paramétrisation de la matrice de covariance selon l'orientation préférentielle des dipôles d'une canopée. Pour un ratio inférieur à -2dB, une matrice correspondant à un nuage de dipôles majoritairement horizontaux était utilisée et une matrice de dipôles verticaux lorsque le ratio est supérieur à 2dB. Entre les deux, une matrice de covariance correspondant à un nuage de dipôles orientés aléatoirement est utilisée. Ariei et *al.* (2010) proposa également une redéfinition de la composante volumique basée sur une analyse en composantes principales. Le modèle volumique adaptatif généralisé proposé par les auteurs décrit le volume à l'aide de deux paramètres soit l'angle d'orientation moyen (d'un nuage de dipôles) et le degré d'organisation de la canopée (organisée à aléatoire). Cela offre une représentation plus détaillée de la canopée que celle de la décomposition de Yamaguchi. De plus, une meilleure représentation de la composante volumique implique en retour une meilleure estimation de la contribution des composantes de surface et double-bond.

Le modèle de Freeman (Freeman et Durden, 1998) se résume en quatre équations et cinq inconnues ($\alpha, \beta, f_v, f_d, f_s$) nécessitant le recours à l'hypothèse de la symétrie de réflexion pour simplifier et permettre la résolution du système d'équations. Une fois le terme volumique soustrait de la matrice $\langle [C_3] \rangle$, les auteurs utilisent la phase de la composante copolaire restante pour déterminer si le signal est dominé par une rétrodiffusion de surface ou double bond. Si la

⁶ Le modèle de Bragg ne permet pas de tenir compte de la polarisation croisée produite par un sol très rugueux (Ballester-Berman et Lopez-Sanchez, 2010) et ajoutera cette contribution à la rétrodiffusion volumique de la canopée.

phase est plus près de zéro que de π , la rétrodiffusion de surface domine et dans tel cas le terme α est établi à -1 et les équations résolues en fonction de β . Dans le cas contraire, si la rétrodiffusion double bond domine, β est établi à 1 et les équations résolues en fonction de α . Il résulte de ce procédé et après la soustraction du terme volumique que la décomposition de Freeman (comme celle de Yamaguchi) peut produire une puissance négative pour certaines combinaisons de polarisation ce qui est physiquement impossible (van Zyl et al., 2011). Pour combler cette lacune, van Zyl et al. (2011) proposèrent d'intégrer une décomposition en valeurs propres non négatives⁷ au modèle de Freeman pour calculer la contribution de la composante volumique et ensuite les termes α et β sans avoir à attribuer artificiellement la magnitude de l'un d'entre eux à 1. Cette approche plus générique peut également être appliquée à la décomposition de Yamaguchi.

3.4.3. La décomposition incohérente de Touzi basé sur le modèle du TSVM

La décomposition de Touzi (Touzi, 2007;), comme la décomposition incohérente des cibles de Cloude et Pottier (1997), est basée sur la décomposition incohérente des caractéristiques de la matrice de cohérence $\langle [T_3] \rangle$. La décomposition de Touzi s'inspire de la décomposition cohérente de Kennaugh-Huynen (Touzi et al., 2007) pour obtenir une décomposition invariante du signal diffusé par les cibles étendues. Pour une cible réciproque, la décomposition caractéristique semi-définie et hermitienne de la matrice $\langle [T_3] \rangle$ d'une cible permet la représentation de cette dernière par une somme incohérente de trois matrices de cohérence $\langle [T_3]_i \rangle$ représentant trois différents diffuseurs pondérés par leur valeur propre λ_i respective :

$$[T_3] = \sum_{i=1,3} \lambda_i [T_3]_i \quad (3.4-1)$$

Chaque diffuseur unique i ($i=1,3$) est représenté par une matrice de cohérence de rang 1 $[T]_i$ et par les trois valeurs propres positives réelles normalisées correspondantes $\lambda_i / (\lambda_{1N} + \lambda_{2N} + \lambda_{3N})$ sont une mesure de l'énergie relative contenue dans le vecteur propre i . Par opposition à la décomposition Cloude-Pottier qui caractérise le type de diffusion de cible

⁷ *Nonnegative eigenvalue decomposition (NNED)* et appenrentée à la décomposition de Cloude et Pottier (1997).

par le biais d'une entité réelle, α , la décomposition de Touzi utilise une entité complexe, de type diffusion symétrique, pour la caractérisation sans ambiguïté de la diffusion de cible en milieu humide (Touzi et *al.*, 2007). Chaque diffuseur cohérent peut-être représenté par un modèle cohérent et invariant de diffusion :

$$\vec{e}_T^{SV} = m \left| \vec{e}_T \right|_m \cdot \exp(j\Phi_s) \cdot \vec{V} \quad (3.4-2)$$

avec

$$\vec{V} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_s \cos 2\tau_m \\ -j \cos \alpha_s \sin 2\psi \sin 2\tau_m + \cos 2\psi \sin \alpha_s e^{j\Phi_{\alpha s}} \\ -j \cos \alpha_s \cos 2\psi \sin 2\tau_m + \sin 2\psi \sin \alpha_s e^{j\Phi_{\alpha s}} \end{bmatrix} \quad (3.4-3)$$

Pour les applications que ne relèvent pas de l'interférométrie, la phase absolue de la cible Φ_s peut être ignorée et le diffuseur cohérent est alors singulièrement caractérisé par 5 paramètres indépendants : α_s , $\Phi_{\alpha s}$, ψ , τ_m et m . Les paramètres α_s , $\Phi_{\alpha s}$ représentent les coordonnées polaires du type symétrique de diffusion (Figure 3.4-2), ψ l'angle d'orientation de la cible (Figure 3.4-3), τ_m son hélicité (degré de symétrie) et m l'amplitude maximale normalisée. Chaque vecteur propre cohérent i , qui correspond à un mécanisme de diffusion unique, est présenté en termes de paramètres invariants de diffusion de la cible :

$$ICTD_i = (\lambda_i, m_i, \psi_i, \tau_{mi}, \alpha_{si}, \Phi_{\alpha si}) \quad 3.4-4$$

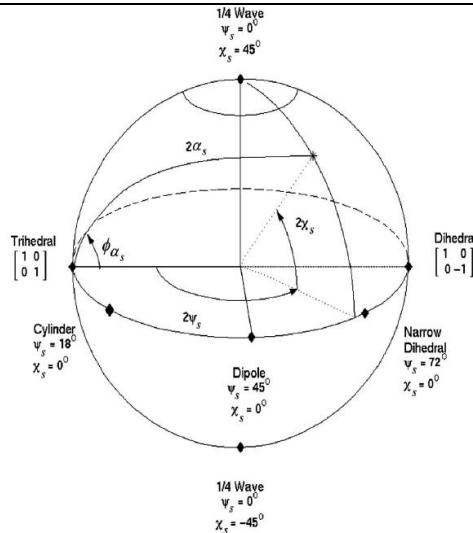
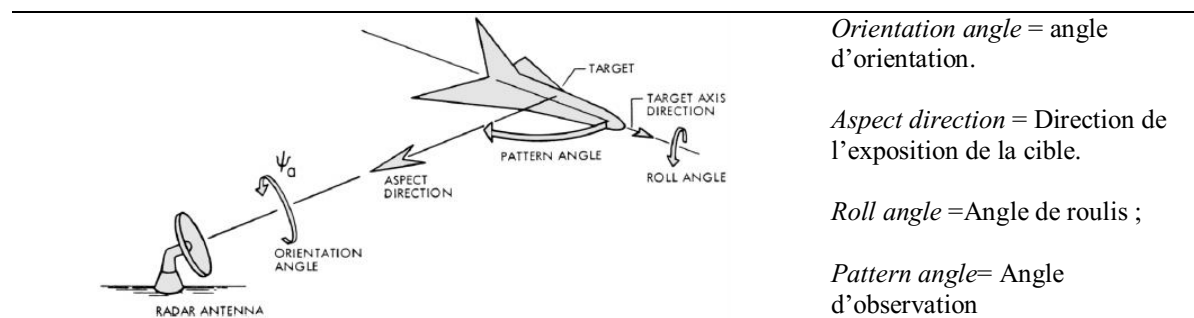


Figure 3.4-2 : Sphère de Poincaré de la décomposition de Touzi.

Source : Touzi (2007), fig.1, p.76.

Contrairement à la décomposition de Cloude et Pottier, la décomposition de Touzi ne procède pas à une moyenne pondérée de ses paramètres ce qui permet une analyse détaillée des

caractéristiques polarimétriques de chaque cible. Une schématisation complète de la décomposition de Touzi a été publiée dans Touzi et *al.* (2009).



Orientation angle = angle d'orientation.

Aspect direction = Direction de l'exposition de la cible.

Roll angle = Angle de roulis ;

Pattern angle = Angle d'observation

Figure 3.4-3 : Angle d'orientation et de roulis de la cible

Source : Touzi et *al.* (2004), fig 3, p.392 (d'après Huynen 1970). Traduction des termes anglais tirés de Potier et Saillard (1992), fig.18, p.328.

Une description des paramètres de la décomposition de Touzi est offerte au Tableau 3.4-1 ainsi qu'une comparaison avec les paramètres de la décomposition de Cloude et Pottier (1997). Une analogie avec les canaux de polarisation est également présente et n'est fournie qu'à titre comparatif, il ne s'agit évidemment pas d'équivalence. Les décompositions polarimétriques à base mathématique mettent l'emphase sur la structure des cibles au détriment de la puissance rétrodiffusée. Pour récupérer sans redondance cette importante source d'information il est possible d'utiliser le *span* en complément des paramètres ou encore la version originale (non normalisée) des valeurs propres.

Mentionnons aussi que les décompositions polarimétriques sont affectées par le chatoiement qui peut introduire un biais dans l'estimation des paramètres comme les cohérences, les valeurs propres et les vecteurs propres (Lopez-Martinez et *al.*, 2005; Touzi, 2007b). Cependant, les décompositions incohérentes du signal polarimétrique que nous utiliserons dans cette étude utilisent une fenêtre de traitement ce qui a pour effet de mitiger l'effet du chatoiement. Le problème consiste alors à estimer quelle est la taille minimale de la fenêtre pouvant être utilisée lors de la décomposition. Il est recommandé dans Touzi (2007b) d'utiliser un minimum de 60 échantillons indépendants (fenêtre de 7x7 à 9x9) dans le cas d'une fenêtre de taille fixe. Une autre solution consiste à utiliser une fenêtre de traitement de taille variable qui s'adaptera aux conditions de cohérence locales.

Touzi (2007)	Cloude et Pottier, (1997)	Canaux de polarisation (puissance)	Description [domaine]
α_{sg}	$\bar{\alpha}_c$	$ \sigma_{hh}^o / \sigma_{vv}^o $	* Magnitude du type global de rétrodiffusion symétrique. * $\alpha_{sg} = \bar{\alpha}_c$ si $\tau_m = 0$ * $\alpha_{sg} \in [0, 90]$
$\alpha_{s1}, \alpha_{s2}, \alpha_{s3}$	--	$ \sigma_{hh}^o / \sigma_{vv}^o $	* Magnitude du type dominant (α_{s1}), du second (α_{s2}) et du troisième (α_{s3}) type de rétrodiffusion symétrique $\alpha_{si} \in [0, 90]$
$\Phi_{\alpha s1}, \Phi_{\alpha s2}, \Phi_{\alpha s3}$	--	--	* Phase du type symétrique de rétrodiffusion. * $\Phi_{\alpha s}$ liée de manière linéaire à $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ lorsque $\psi = 0$. * Indique la magnitude relative entre les composantes HH et VV (ou dièdre-trièdre) permettant de distinguer les surfaces de Bragg de la rétrodiffusion multiple. * $\Phi_{\alpha i} \in [-90, 90]$
τ_1, τ_2, τ_3	--	$\sigma_{rr}^o / \sigma_{ll}^o$	* Hélicité, utilisé pour évaluer la symétrie de la cible, une cible est symétrique si $\tau_m = 0$. * $\tau_i \in [-45, 45]$
ψ_1, ψ_2, ψ_3 ---	$\bar{\beta}_c$	$\sigma_{135}^o / \sigma_{45}^o$	* Angle d'orientation (angle d'orientation appliqué pour soustraire l'effet de l'angle d'orientation sur la diffusion d'une cible), donne une mesure intrinsèque de l'angle d'orientation de la cible (<i>target tilt angle</i>). * $\beta = 2\psi$ si $\tau_m = 0$ * $\psi_i \in [-45, 45]$
m_1, m_2, m_3 --	--	--	* Amplitudes maximales normalisées de la cible. * $m_i \in [0, 1]$
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ $\lambda_{1N}, \lambda_{2N}, \lambda_{3N}$	-- --	-- --	* Valeurs propres * Valeurs propres normalisées (par le span) * $\lambda_i \in [0, 1]$ et $\lambda_{1N} + \lambda_{2N} + \lambda_{3N} = 1$

Tableau 3.4-1 : Résumé des paramètres de la décomposition *TSVM* de Touzi (Touzi, 2007) et comparaison (analogie) avec les paramètres de la décomposition de Cloude et les canaux de polarisation

3.5. Superposition horizontale et verticale des mécanismes de rétrodiffusion et leur interprétation via les paramètres de la décomposition de Touzi

Comme mentionnée, la rétrodiffusion d'une cible distribuée n'est que rarement pure. La superposition verticale des mécanismes de rétrodiffusion est directement liée à la capacité de

l'onde incidente à pénétrer le médium sous examen, donc à la longueur d'onde, et à l'humidité de la couche supérieure. La superposition horizontale des mécanismes de rétrodiffusion est liée à la résolution spatiale du capteur et, en règle générale, plus la résolution spatiale est grossière, plus ce type de superposition sera fréquent.

La Figure 3.5-1 présente une section de forêt et la grande diversité des mécanismes de rétrodiffusion typique de cet environnement. En supposant que cette figure corresponde à quelques pixels, on retrouverait une superposition de plusieurs mécanismes de rétrodiffusion soit une : **A**) rétrodiffusion directe de surface provenant du sol (sphère); **B**) rétrodiffusion volumique provenant du feuillage des arbres, arbustes et de la litière végétale si présente (collection de dipôles orientés aléatoirement, hélice); **C**) rétrodiffusion directe de surface provenant des tiges, branches principales, des troncs (Sphère, dipôle horizontal ou vertical); **D**) rétrodiffusion double-bond provenant de l'interaction entre les troncs et les autres composantes (dièdre) et ; **E**) Rétrodiffusion multiples provenant de l'interaction du signal incident avec plusieurs composantes (trièdre et autres cibles canoniques).

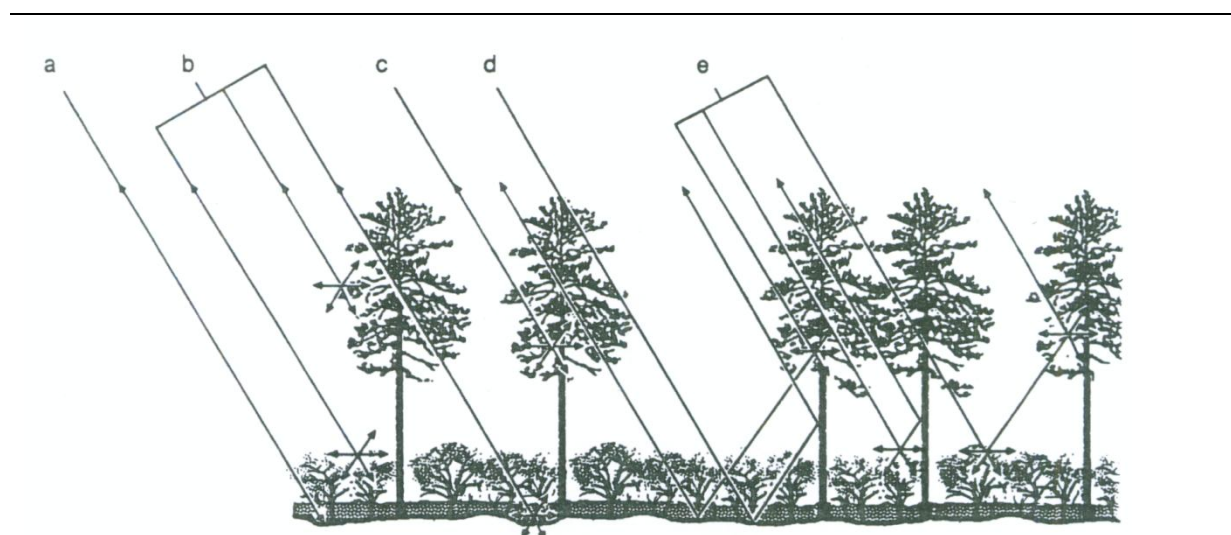


Figure 3.5-1 : Superposition horizontale et verticale des mécanismes de rétrodiffusion

Source : Simonett et al. (1987)

Le défi en télédétection radar consiste donc à savoir comment distinguer les divers effets géométriques et diélectriques pour extraire de l'information utile de la rétrodiffusion totale (Dobson et al., 1995a) tout en limitant l'influence des effets environnementaux. Une partie appréciable des connaissances de la relation signal cible en fonction de la géométrie

d'acquisition ont été obtenues via la modélisation du signal. Le grand nombre de paramètres/mesures qu'il est nécessaire de collecter pour les utiliser correctement ne permet pas leur inversion et demeure donc peu pratique dans un contexte opérationnel. Les décompositions polarimétriques ne requièrent pas d'information a priori sur la scène à analyser contrairement à un modèle de rétrodiffusion. La capacité d'une décomposition à bien analyser les mécanismes de rétrodiffusion présente sur une image polarimétrique dépendra de sa sophistication ainsi que des hypothèses utilisées pour simplifier le problème posé par la superposition des mécanismes de rétrodiffusion.

Dans le cas d'un signal très pur ($\lambda_{1N} \approx 0.9$), la majorité de l'information sera contenue dans les paramètres de la première composante de Touzi. Pour ce cas, le type de rétrodiffusion symétrique dominant (α_{s1}) aura tendance à se centrer sur l'une des trois valeurs suivantes : $\alpha_{s1}=0^\circ$ (rétrodiffusion de surface ou trièdre); $\alpha_{s1}=45^\circ$ (rétrodiffusion dipolaire); $\alpha_{s1}=90^\circ$ (rétrodiffusion double-bond). Pour ces mécanismes de rétrodiffusion très dominant (assimilable à une cible canonique), la valeur attendue de la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ sera centrée sur 0° . Lorsque deux mécanismes de rétrodiffusion se superposent (par exemple 3.5-5, B et E), α_{s1} se situera entre 0° et 45° ou entre 45° et 90° indiquant respectivement une rétrodiffusion de surface anisotropiques ou rétrodiffusion double bond anisotropique (Cloude, 2010). La contribution de chacun de ces mécanismes sera évaluée par leur valeur propre normalisée respective (λ_{1N} et λ_{2N}). Imaginons un cas simple au printemps où un peuplement de feuillus sans feuilles se résumerait par la contribution d'une rétrodiffusion double-bond (tronc + surface) et à une rétrodiffusion de surface (sphère) en provenance d'un sol saturé et peu rugueux. Si la composante du sol domine alors α_{s1} se situera entre 0° et 45° , la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ sera typiquement dans les valeurs négatives. Au contraire si la composante double-bond domine (tronc larges, substrat inondé... alors α_{s1} sera entre 45° et 90° avec une phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ typiquement positive. Bien que le comportement de $\Phi_{\alpha_{s1}}$ puisse être prédit par α_{s1} , il n'en demeure pas moins qu'elle contient une information indépendante de ce dernier.

Nous avons ignoré jusqu'ici l'effet de la biomasse foliaire (rétrodiffusion volumique) qui dépolarise fortement le signal polarimétrique au même titre que la rétrodiffusion multiple

(Figure 3.5-1, cas B et E). À mesure que la dépolarisation du signal augmente, λ_{3N} gagnera en importance au détriment de λ_{1N} et λ_{2N} jusqu'au cas limite d'un signal entièrement dépolarisé pour lequel $\lambda_{1N} = \lambda_{2N} = \lambda_{3N}$ (et dans lequel une analyse polarimétrique se révélera inutile. La Figure 3.5-1 présente une vision naturelle des mécanismes de rétrodiffusion dominants qui seront plus ou moins correctement identifiés par une décomposition polarimétrique. Il est facile d'oublier que le mécanisme identifié ne sera pas fonction que de sa forme géométrique mais également de la configuration du capteur avec en prédominance la longueur d'onde (cf. §2.1.1)

Les facteurs liés à la **configuration du capteur** et à la **géométrie d'acquisition** sont également très influents sur le coefficient de rétrodiffusion. Pour qu'un élément de la structure d'une physiologie végétale influence fortement le coefficient de rétrodiffusion, il faut que sa taille soit similaire à la longueur d'onde (λ) utilisée par le capteur (Figure 3.5-2). Pour une physiologie arborée, les courtes longueurs d'onde (X et C) seront surtout sensibles à la biomasse foliaire qui sera en retour "invisible" pour les plus grandes longueurs d'onde (L et P). Ces dernières seront surtout sensibles aux principales branches et au tronc. En isolant le mécanisme C de la Figure 3.5-1 qui (hypothétiquement) ne considère que la contribution dominante d'un arbre isolé.

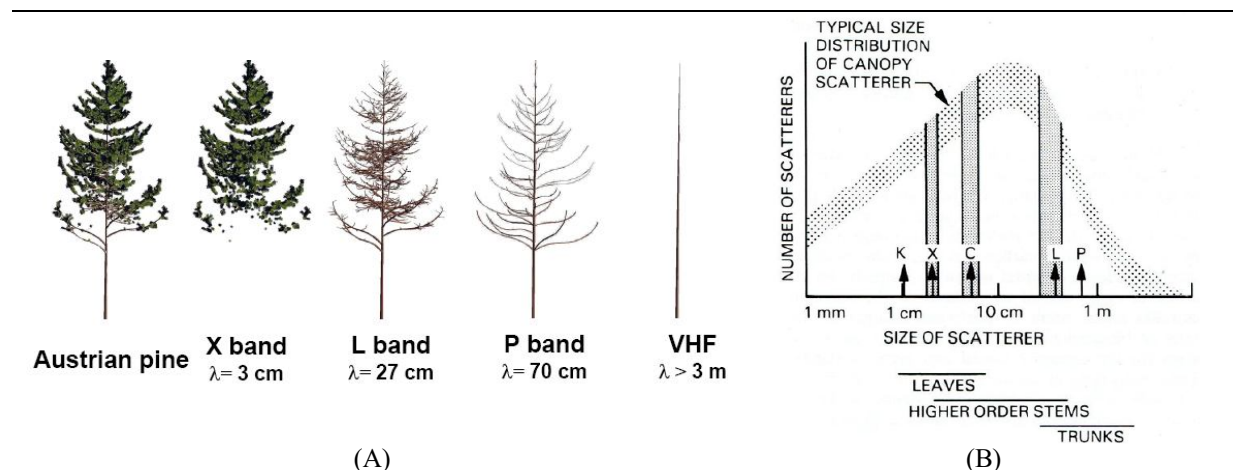


Figure 3.5-2 : Effet de la fréquence sur les diffuseurs qui influenceront le coefficient de rétrodiffusion

Sources : (A) Le Toan (2005), (B) Carver, (1988)

Pour la bande X, l'arbre sera perçu comme un volume, autant σ_{hh}^0 que σ_{vv}^0 saturerons. La valeur résultante de α_{s1} tendra vers 0° ($\sigma_{hh}^0 \approx \sigma_{vv}^0$). Avec une augmentation de la longueur d'onde et selon la structure de l'arbre, une polarisation du signal apparaîtra ($\sigma_{hh}^0 > \sigma_{vv}^0$ ou $\sigma_{vv}^0 > \sigma_{hh}^0$) entraînant à la hausse α_{s1} . Finalement en bande P, l'arbre pourra être perçu comme un large dipôle entraînant une interaction sol/tronc ($\sigma_{hh}^0 \gg \sigma_{vv}^0$) puisque le signal atteindra facilement le sol.

	X	L	C
α_{s1}	Tendant vers 0°	Tendant vers 90°	Tendant vers 90°
α_{sg}	Tendant vers 45°	Tendant vers 45°	Vers 90°
λ_{1N}	≈ 0.40	≈ 0.70	≈ 0.9
λ_{3N}	≈ 0.30	≈ 0.10	négligeable
σ^0	$\sigma_{hh}^0 > \sigma_{hv}^0$	$\sigma_{hh}^0 \gg \sigma_{hv}^0$	$\sigma_{hh}^0 \gg \gg \sigma_{hv}^0$

Note : accompagnement de la Figure 3.5-2-A

Tableau 3.5-1 : Interprétation des mécanismes de rétrodiffusion en fonction de la fréquence

L'exemple précédent a ignoré la superposition horizontale des mécanismes de rétrodiffusion qui est directement liée à la résolution spatiale du capteur. Les paramètres ψ et τ permettent d'aborder cette complexité. En théorie, l'angle d'orientation ψ représente l'angle d'orientation d'une structure par rapport au LOS menant à une interprétation juste du mécanisme de rétrodiffusion (identifié par α_s). En d'autres mots, un dipôle doit être interprété comme étant un dipôle quelque soit son orientation. Dans la même lignée, τ est assimilable à l'orientation d'un dièdre par rapport au LOS (Figure 3.3-1-C) et doit être interprété comme tel qu'importe son orientation. Une cible canonique (dipôle, dièdre) dont l'orientation n'est pas parfaitement alignée par rapport au LOS créera un bris de symétrie (azimutale ou de rotation) qui entraînera une forte dépolarisation du signal (une augmentation de λ_{3N} et λ_3) souvent interprété comme une plus forte biomasse (rétrodiffusion volumique) ce qui entraînera également à la hausse σ_{hv}^0 .

Il est actuellement difficile de déterminer ce à quoi les paramètres (ψ et τ) correspondent vraiment hors d'un cadre théorique et pour des cibles distribuées. Quelques pistes

d'interprétation ont été offertes dans Touzi et *al.*, (2009) voulant que τ (τ_1 , τ_2 ou $|\tau_1|$ et $|\tau_2|$) serait lié à l'hétérogénéité de la portion supérieure de la canopée (pour une fréquence donnée) selon la présence ou non de feuilles. Pour une physionomie donnée, nous avons vu que le résultat de la décomposition de Touzi dépendra de la fréquence utilisée, mais il faut également considérer les **conditions environnementales** (gel, vent, rosée, pluie, niveau d'eau...). Pour ne prendre qu'un exemple, nous ne considérerons que le niveau d'eau qui est particulièrement influent sur la caractérisation des physionomies végétales des milieux humides même si cette dernière n'a pas changé (Figure 3.5-3).

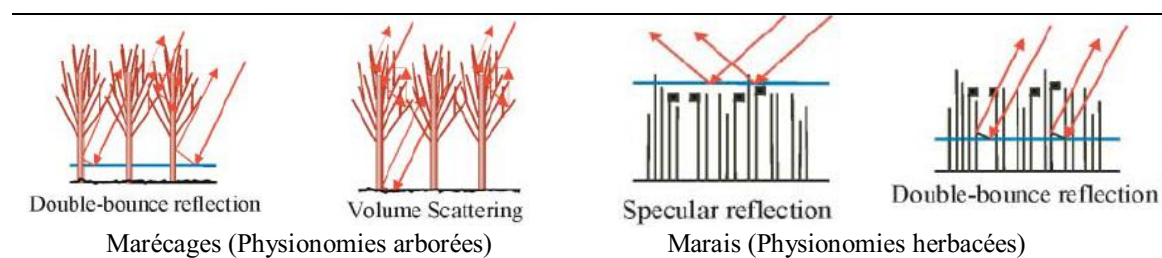


Figure 3.5-3 : Effet d'une modification des conditions environnementales sur le type de rétrodiffusion dominant d'une physionomie végétale : exemple du niveau d'eau

Source : Parmuchi *et al.* (2002)

Nous avons présenté ici une interprétation simplifiée des mécanismes de rétrodiffusion telle que vue par certains paramètres de la décomposition de Touzi. Si le comportement (valeurs) attendu (es) des paramètres est raisonnablement bien compris en fonction des caractéristiques d'une physionomie végétale, plusieurs questions restent en suspens dont :

- i. Quels types de relations existe-t-il entre les paramètres des différentes composantes ?
 - α_{s1} vs α_{s2} vs α_{s3} , $\Phi_{\alpha s1}$ vs $\Phi_{\alpha s2}$ vs $\Phi_{\alpha s3}$, etc....) ou encore entre les différents paramètres; : α_{s1} vs $\Phi_{\alpha s1}$, α_{s1} vs τ_1 , α_{s1} vs λ_1 , etc. ;
 - s'agit-il de relations mathématiques (propriétés de la décomposition) ou physiques (liés à une caractéristique d'une physionomie végétale ?

Quel est le réel avantage offert par les paramètres polarimétriques par rapport aux canaux de polarisation HH, HV et VV pour la compréhension des caractéristiques des physionomies végétales, en particulier lorsqu'il y a superposition des mécanismes de rétrodiffusion ?

PARTIE II : CARACTÉRISATION DES MILIEUX HUMIDES PAR POLARIMÉTRIE RADAR : PROBLÉMATIQUE

Dans cette partie, nous passerons en revue la littérature concernant les milieux humides. Nous débuterons par une définition générale des grands types de milieux humides (chapitre 4). Les principaux systèmes de taxinomie (classification) seront ensuite passés en revue (chapitre 5) de même que les études ayant utilisé les images radars pour la caractérisation et la classification des milieux humides (chapitre 6). Nous conclurons cette partie avec notre proposition d'un système de classification basé sur les physiologies végétales (chapitre 7).

CHAPITRE 4

4. LES MILIEUX HUMIDES, UN APERÇU GÉNÉRAL

Tel que mentionné en introduction, il est commun de classifier les terres humides en quatre classes générales : les tourbières, les marais et les marécages et les eaux peu profondes. Leurs principaux traits distinctifs sont revus brièvement dans ce chapitre.

4.1. Les tourbières

Une tourbière se développe sur un substrat généralement mal drainé où la production de matière organique excède le taux de décomposition (Payette, 2001a; Wieder et *al.*, 2006) menant à l'accumulation d'une couche de matière non décomposée appelée tourbe (*peat*). L'épaisseur minimale de tourbe pour qu'un milieu humide soit considéré comme une tourbière ne fait pas l'unanimité. Selon Payette (2001a) une épaisseur minimale de 30 à 40 cm caractérise une tourbière. Au Canada, une épaisseur de 40 cm a été adoptée par le groupe de travail national sur les terres humides (NWWG, 1997) qui a produit le système canadien de classification des terres humides du Canada (voir plus loin). Cette norme prévaut également en Russie alors que 30 cm est la norme du côté européen (Vasander et Kettunen, 2006) et de certains organismes de conservation dont l'*International Mire Conservation Group* (Rydin et Jeglum, 2006). Il est à noter que dans la littérature anglaise on emploie les termes «*peatland*» et «*mire*» pour désigner ce que l'on appelle en français une «tourbière». Bien que ces deux termes soient souvent considérés comme des synonymes (Martini et *al.*, 2006), le terme «*mire*» fait appel à un concept plus général qui permet de tenir compte des tourbières dont l'accumulation de tourbe n'est pas suffisante pour qu'elles puissent être considérées comme telles (Rydin et Jeglum, 2006).

Il est courant de distinguer deux types généraux des tourbières : les bogs et les fens. Les bogs se composent surtout de sols minéraux ou organiques minces. Les eaux de pluie parviennent sur la surface bombée du bog et s'écoulent très lentement vers la périphérie. Les couches supérieures de tourbe sont généralement acides (pH<4,0) et contiennent peu d'éléments minéraux. La végétation est par conséquent pauvre et souvent dominée par les éricacées,

quelques cypéracées et l'épinette noire. Le substrat de tourbe est formé principalement de sphaignes ombrotrophes (acidiphiles) et peut atteindre 6 mètres mais ne dépasse pas en général 4m d'épaisseur (Buteau et *al.*, 1994). Les fens, pour leur part, sont des tourbières alimentées par des eaux de précipitation et des eaux qui se sont enrichies au contact des sols minéraux environnants (eaux minérotrophes). Les fluctuations de la nappe phréatique et des eaux de surface caractérisent les fens (NWWG, 1997). Le fen se caractérise par une topographie concave mais il peut aussi couvrir de pentes légères (Rydin et Jeglum, 2006). La circulation de surface peut se faire par l'entremise de chenaux, de mares et d'autres plans d'eau libre, qui forment des modelés de surface particuliers (NWWG, 1997). Le couvert végétal est dominé par des herbacées et des mousses brunes, généralement autres que les sphaignes, et plusieurs bryophytes, cypéracées et arbustes, tel le *Myrica gale*, ainsi que quelques arbres, notamment le thuya et le mélèze qui sont étroitement associés aux fens (Vitt, 1994; Buteau et *al.*, 1994). L'épaisseur de la tourbe dans les fens varie de quelques centimètres à près de 4m, mais ne dépasse généralement pas 2 mètres (Buteau et *al.*, 1994).

La classification des tourbières en des subdivisions pratiques a été tentée à l'aide d'une vaste gamme de critères comme la floristique, la physiologie de la végétation, la morphologie, l'hydrologie, la stratigraphie et la chimie ainsi que les caractéristiques de la tourbe (Moore, 1995; Martini et *al.*, 2006). Cette diversité des critères fait en sorte qu'il n'existe pas de subdivision et de nomenclature uniformes à travers le monde (Moore, 1995). Selon certains une classification basée sur l'origine de la tourbière et le rôle joué par l'eau dans la formation de la tourbe est la plus appropriée (p. ex. Pôle-relais Tourbières, 2007). Ainsi, une tourbière sera (Pôle-relais Tourbières, 2007) :

- i. **Topogène** si elle est située dans une dépression topographique et si sa source d'eau provient du ruissellement ou d'une nappe phréatique. C'est une tourbière ayant une nappe phréatique pratiquement plane, située dans un bassin soit sans exutoire, ou un seul exutoire ou avec des sources et des exutoires (Rydin et Jeglum, 2006) et où les eaux souterraines sont stagnantes (Vitt, 1994);
- ii. **Limnogène** si elle est issue de l'atterrissement progressif d'une pièce d'eau à partir de radeaux végétaux flottants. Ces tourbières se situent donc à la bordure des lacs, ou des rivières et sont inondées périodiquement par ces derniers (Rydin et Jeglum, 2006);

- iii. **Soligène** si elle naît à la faveur d'un écoulement lent et continu le long d'une faible pente (sources, suintements) et où l'écoulement directionnel de l'eau se fait dans la tourbe où à sa surface;
- iv. **Fluviogène** si elle provient de l'inondation périodique d'une vallée par un cours d'eau ou une nappe alluviale;
- v. **Ombrogène** si elle naît là où les précipitations sont abondantes et où elles constituent la seule source hydrique responsable de la turbification.

Ainsi les bogs peuvent se développer à partir d'un système limnogène ou soligène lorsque le système à un endroit donné arrive à se soustraire de l'influence des eaux d'inondations ou de surface (Rydin et Jeglum, 2006). Le système ombrogène (ombrotrophique) est étroitement lié aux bogs (Vitt, 1994 ; Moore, 1995). Les fens pour leur part se déclinent en trois types : topogènes s'ils sont largement influencés par des eaux stagnantes souterraines ; soligènes s'ils sont influencés par les eaux de surfaces et limnogènes s'ils sont influencés par les lacs et étangs associés (Vitt, 1994).

4.2. Les marécages

Les principales particularités des marécages sont la dominance d'une végétation de grands arbres qui couvrent en général 30% du tapis végétal ainsi que l'influence des eaux souterraines minérotrophes (NWWG, 1997). Les marécages “ *sont soumis à des inondations saisonnières ou sont caractérisés par une nappe phréatique élevée et une circulation d'eau enrichie en minéraux dissous (Buteau et al., 1994)*”. Au cours de la saison estivale, la nappe phréatique s'abaissera d'au moins 20 cm sous la surface, ce qui permettra la croissance des racines des arbres, arbustes et autres plantes ligneuses dans la partie aérée ou partiellement aérée du substratum (NWWG, 1997). Les marécages croissent sur des substrats minéraux ou organiques ou encore un mélange des deux (Buteau et al., 1994; Rydin et Jeglum, 2006)”. *Les marécages sur la tourbe se sont développés par un processus de remplissage de bassin ou par paludification des sols minéraux précédents, plus secs. Dans le processus de remplissage de bassin, l'écosystème précédent était un marais ou un fen, alors que, dans la paludification, le marécage s'est développé dans une forêt de zone sèche sur un sol minéral (NWWG, 1997).* De plus, “ *les marécages ne sont pas aussi humides que les marais, les fens ou les bogs*

ouverts, mais ils sont comparables aux bogs boisés. Les marécages boisés plus secs se fondent aux forêts sur les sols minéraux des zones sèches, et les marécages les plus humides, comme les marécages à grands arbustes, se fondent aux fens boisés plus humides, avec un couvert forestier moins dense. Les marécages à grands arbustes se fondent aussi aux marais plus humides” (NWWG 1997).

4.3. Les marais

Les marais se caractérisent par la présence d'eau stagnante ou de l'eau qui circule lentement avec une végétation submergée, à feuilles flottantes ou émergentes (Rydin et Jeglum, 2006). Les marais sont inondés en permanence, selon la saison ou périodiquement en fonction du cycle des marées. Ces habitats sont souvent arrangés en zones ou en bandes le long des lacs, rivières, ruisseaux, bassins, étang et autres étendues d'eau (Rydin et Jeglum, 2006). Les marais se distinguent également selon la salinité de l'eau qui contrôlera la répartition des espèces végétales en présence. Selon ce critère, on distingue les marais salés, saumâtres et d'eau douce. Il n'y a pas pour la plupart de ces habitats d'accumulations notables de tourbe et les plantes vasculaires y poussant tirent leurs nutriments du substrat minéral sous-jacent (Rydin et Jeglum 2006). Les principaux groupes physiologiques des marais sont les marais ouverts (*open water marsh*), les marais émergents et les prairies humides (Rydin et Jeglum, 2006).

4.4. Les eaux peu profondes

Les milieux humides des eaux peu profondes sont caractérisés par la présence permanente d'eau stagnante ou courante. Le couvert végétal, lorsqu'il est présent, est formé d'espèces flottantes ou submergées. La limite inférieure des eaux peu profondes est fixée par la profondeur maximale atteinte par la végétation vasculaire et qui est fonction des propriétés de l'eau comme sa couleur et sa transparence (Buteau et *al.*, 1994). La limite supérieure des eaux peu profondes est fixée aux basses eaux estivales dans le système riverain et aux basses marées de vive-eau dans le système marégraphique (Buteau et *al.*, 1994).

CHAPITRE 5

5. INVENTAIRE ET CARTOGRAPHIE DES MILIEUX HUMIDES

5.1. Continuum et gradients biogéochimiques

Tout inventaire des milieux biophysiques est fondé sur un système de taxinomie dont les catégories dépendent de l'échelle de perception du territoire et du point de vue que l'on adopte (écologique, biologique, etc.). Or, il est difficile de trouver une «classification naturelle» des milieux humides, *il ne peut y avoir de définition unique et écologiquement correcte puisque les milieux humides sont très diversifiés et que la limite entre les écosystèmes aquatiques, semi-aquatiques et terrestres repose le long d'un continuum (Buteau et al., 1994)''*.

À titre d'exemple, la Figure 5.1-1 présente une classification des milieux humides en fonction de la disponibilité en nutriments. Les boisés, les mousses brunes et les sphaignes sont représentatifs des marécages, des fens et des bogs mais la superposition de ces espèces montre bien le concept de continuum entre ces classes. Les marécages et les marais accumulent de la matière organique mais contrairement aux tourbières, le taux de décomposition est très élevé et attribuable aux plus grandes fluctuations des niveaux d'eau (Vitt, 1994). Les fortes fluctuations du niveau d'eau expliquent également une plus grande disponibilité en nutriments entraînant du coup une production végétale plus élevée (Vitt, 1994). Les fortes fluctuations du niveau de l'eau limitent également le développement des bryophytes (sphaignes et mousses). Les milieux minérotrophiques, associés aux fens, se distinguent en pauvres ou riches en fonction du pH qui caractérise leur milieu⁸ (Rydin et Jeglum, 2006). Ainsi, selon le pH, on retrouve, les fens pauvres (pH de 4 à 5.5), les fens intermédiaires et modérément riches (5 à 7) et les fens très riches (6.8 à 8). Les bogs quant à eux se caractérisent par un pH qui varie de 3.5 à 4.2.

⁸ Le niveau trophique, qui fait référence à la teneur du milieu en éléments nutritifs dissous, notamment en azote et phosphore, permet de distinguer les tourbières oligotrophes pauvres en éléments minéraux, des tourbières eutrophes fortement minéralisées, les tourbières intermédiaires étant qualifiées de mésotrophes (Pôles relais tourbières, 2007)

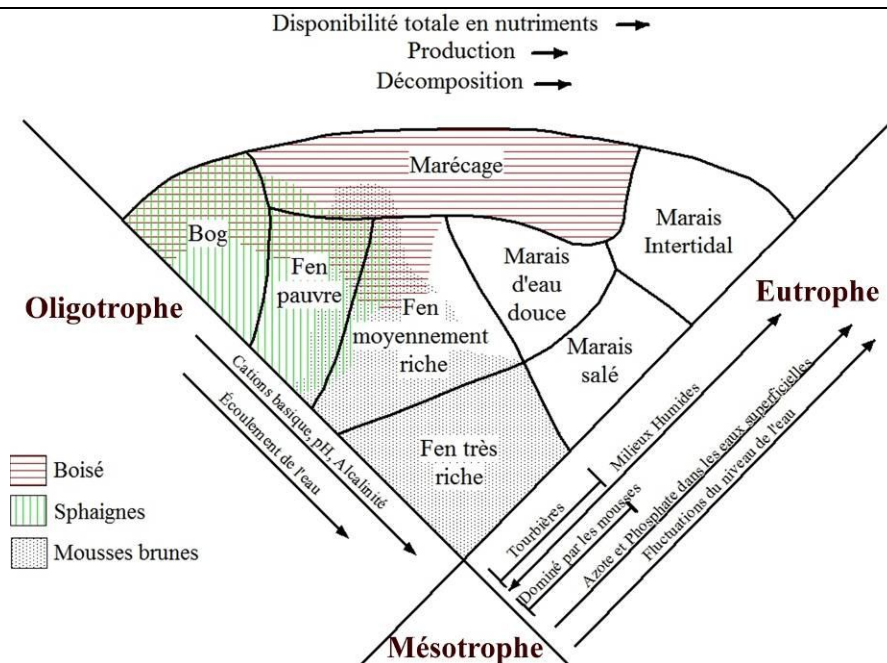


Figure 5.1-1 : Relation entre les types généraux de milieux humides du Canada en fonction des principaux gradients biogéochimiques

Source : Adapté de Vitt (1994), fig.1 p.9

Il en résulte que plusieurs systèmes de taxinomie sont en vigueur et utilisés pour l'inventaire des milieux humides à travers le monde. Au Canada le groupe de travail national sur les terres humides (NWWG, 1997) a développé le Système Canadien de Classification des Terres Humides (SCCTH) qui reconnaît cinq classes générales de terres humides (bogs, fens, marais, marécages, eaux peu profondes) réparties en 49 formes et 72 sous-formes. Quelques provinces comme la Colombie-Britannique (MacKenzie et Moran, 2004) et le Québec (Buteau et *al.*, 1994) ont aussi développé leur propre système de classification. Dans ce qui suit, nous décrirons avec plus de détail le *National Wetland Inventory* (NWI) américain, le système de classification du Canada (SCCTH) et celui du Québec (SCMHQ), le système de Jeglum et *al.* (1974). Cette description est essentielle à la compréhension de notre point de vue sur l'utilisation optimale des données des radars pour la cartographie des milieux humides.

5.2. National Wetland Inventory (NWI)

Le *National Wetland Inventory* (NWI) géré par le *United States Fish and Wildlife Service* (USFWS) propose un effort de standardisation de la cartographie des milieux humides aux

échelles du 1:24 000 ou 1:63 360 et disponible en ligne⁹. Ce système de classification hiérarchique développé par Cowardin et *al.*, (1979) reconnaît cinq types de milieux humides (appelés systèmes) soit le système : (1) marin, (2) estuarien, (3) riverain, (4) lacustre et (5) palustre. Chacun de ces systèmes est divisé en sous-système (de maré, subtidal, intertidal) à l'exception du système palustre qui ne comporte aucun sous-système. Ce système est largement utilisé aux États-Unis mais est d'une utilité limitée au Canada puisqu'il a été principalement développé pour les milieux-humides non tourbeux (Davidson et *al.*, 1999). Si le *National Wetland Inventory* était appliqué au territoire canadien, environ 96% des milieux humides canadiens appartiendraient au système palustre (Davidson et *al.*, 1999). Mentionnons cependant que ce système de classification a été adapté au contexte canadien, notamment dans le Système de Classification des Milieux Humides du Québec (SCMHQ) présenté en détail à la section 5.4.

5.3. Le Système Canadien de Classification des Terres Humides (SCCTH) et l'Inventaire Canadien des terres humides (ICTH)

À l'instar du NWI, il n'existe pas au Canada un système de classification des milieux humides dont l'utilisation est largement répandue. Le Groupe de travail national sur les terres humides (GTNTH) a cependant proposé il y a quelques années le Système Canadien de Classification des Terres Humides (SCCTH) comme cadre national pour la cartographie de ces derniers. Le SCCTH "*comprend trois niveaux hiérarchiques : (1) classe, (2) forme et (3) type*" (NWWG, 2007, p.2). Cinq classes sont distinguées sur la base de l'origine génétique générale des milieux humides soit les eaux peu profondes, les marais, les marécages, les bogs et les fens. Ensuite, "*les formes de terres humides sont des subdivisions de chaque classe de terre humide à partir de la morphologie de la surface, du modelé, du type d'eau et des particularités morphologiques du sol minéral sous-jacent*". (NWWG, 2007, p.2). Finalement, "*les types de terres humides sont des subdivisions des formes et des sous-formes à partir des particularités physiologiques des collectivités végétales*" (NWWG, 2007, p.2). L'association entre une forme (niveau 2) et une physiologie (niveau 3) donnera un type de milieu humide et le SCCTH en reconnaît plus de 70.

⁹ <http://www.fws.gov/wetlands/Wetlands-Mapper.html>

Le passage entre la classe et la forme se fait comme mentionné à l'aide de plusieurs critères mais le "type d'eau" (origine de l'eau, c.-à-d. le système hydrologique) occupe une place prépondérante (Figure 5.3-1). Par exemples, les bogs se retrouvent exclusivement dans le système ombrogène même si certaines formes et sous-formes peuvent se retrouver en bordure d'un lac ou d'une rivière (bogs ripariens). Le système minérogène, plus diversifié, se subdivise en deux sous-systèmes. Le sous-système terrigène regroupe les milieux humides qui sont principalement connectés sur le plan hydrologique au système d'écoulement souterrain local ou régional ou à l'eau de surface. Les sous-systèmes hydrologiques lithogènes sont connectés sur le plan hydrologique à la masse d'eau de marée ou à la masse d'eau riparienne sans marée. Le régime riparien se divise à nouveau en formes riveraines (bordant une rivière) ou lacustres (bordant un lac). Les formes et sous-formes de fens se répartissent principalement dans le sous-système terrigène (appelé topogène en Europe) mais on en retrouve également dans les formes riveraines lacustres du régime riparien (Figure 5.3-1) en compagnie des marais et marécages.

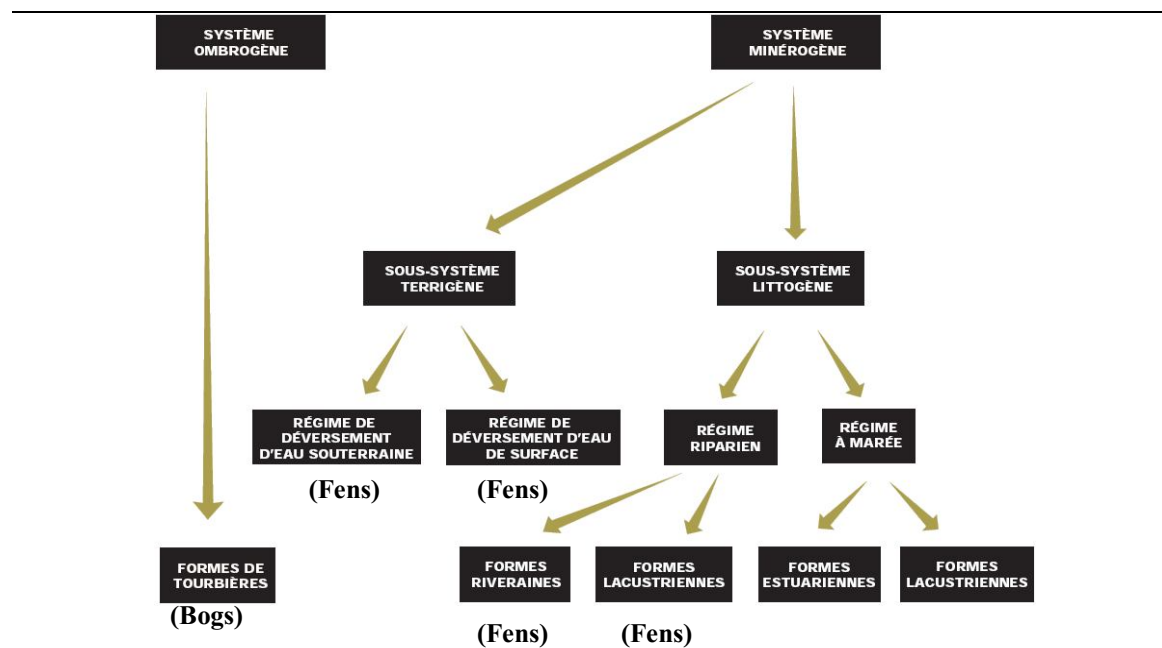


Figure 5.3-1 : Systèmes hydrologiques et développement de terres humide au Canada

Source : Adapté du NWWG (1997), fig.2, p.7 (Commentaires entre parenthèses l'auteur)

Bien que le SCCTH soit hiérarchique, l'identification d'un type de milieux humides repose sur l'évaluation simultanée d'un ensemble de facteurs dont la plupart ne sont pas mesurables à partir des données satellitales. Nous retiendrons que le dernier niveau du SCCTH est basé sur

l'identification des physionomies végétales et qu'une telle classification est utile pour les personnes qui ne sont pas des spécialistes de la flore (Rydin et Jeglum 2006, p.7)

L'Inventaire Canadien des Terres Humides (ICTH) (Fournier et *al.*, 2007) se veut, à l'instar du NWI, un cadre national de cartographie des milieux humides dont les données sont publiées en ligne¹⁰ à mesure de leur disponibilité. Contrairement au SCCTH, la télédétection est une composante essentielle à la réalisation de L'ICTH ce qui explique en partie que les classes cartographiées se limitent aux 5 classes générales que sont les bogs, les fens, les marais, les marécages et les eux peu profondes. Contrairement à une idée répandue, même si ces classes sont générales et occupent le premier niveau de la hiérarchie, elles ne garantissent pas un haut taux de succès lors de la classification.

5.4. Le Système de Classification des Milieux Humides du Québec (SCMHQ)

Le SCMHQ insiste beaucoup plus que le SCCTH sur la morphologie de la terre humide («telle que vue d'en haut») et par la prépondérance accordée aux biotopes¹¹ dans la caractérisation et la classification des types de tourbières. Ce système est une classification hiérarchique utilisant sept niveaux de perception (Figure 5.4-1) répartissant les terres humides en deux groupes de systèmes selon l'origine de l'eau : les systèmes marégraphique et riverain d'une part et les systèmes d'écoulement et de précipitation de l'autre part. Le système marégraphique comprend les marais d'eau douce, saumâtre ou salée, de même que les eaux peu profondes. Le système riverain englobe les sites dont l'apport en eau provient d'un plan d'eau situé à proximité et dans ce système le rôle des courants devient comparable à celui de l'exposition (aux marées) chez le système marégraphique (Buteau et *al.*, 1994).

Les marais et les marécages se répartissent dans la classification du SCHMQ en fonction de l'origine de l'eau selon qu'elle provienne d'un système (1) marégraphique, (2) riverain (3) d'un système d'écoulement et de précipitations (où ils côtoient bog et fen). *“Le système marégraphique regroupe les milieux humides alimentés par les eaux de marée. Une*

¹⁰ <http://maps.ducks.ca/cwi/>

¹¹ Espace d'étendue limitée, défini par ses constituants inorganiques et par ses conditions climatiques, où vivent des espèces végétales ou animales formant une ou plusieurs biocénoses et où les conditions d'habitat sont relativement stables (c-a-d- uniformes). Source : TERMIUM Plus[®], Bureau de la traduction, Travaux publics et Services gouvernementaux du Canada.

dynamique apparentés à celle du système riverain le caractérise, même si les inondations s’effectuent sur une base journalière (marée quotidienne), mensuelle (marée de vive eau), annuelle (marée d’équinoxe) ou ponctuelle (marée de tempête) ” (Buteau et al., 1994).

Niveau (Échelle / Aire minimale a)	Commentaires
1) Système (250K à 400K / 400ha)	Identifie le régime d’alimentation en eau : système marégraphique, riverain, d’écoulement ou de précipitation.
2) Habitat (50K / 40ha)	Les habitats associés au <u>système d’écoulement</u> sont rattachés à la dynamique des bas versants qui les bordent. Les zones les plus riches, sur sol minéral mal drainé ou sol organique mince, sont associées aux marécages alors que les zones centrales correspondent aux fens. Les habitats associés au <u>système de précipitation</u> sont influencés par le soulèvement de la partie centrale des tourbières suite à l’accumulation de tourbe et aux mouvements de masses engendrés par ce processus d’accumulation. Les habitats associés aux <u>systèmes marégraphique</u> et <u>riverain</u> se distinguent à partir d’une segmentation horizontale du rivage, fortement influencée par la dynamique littorale (par exemple : haut marais, bas, marais, vasière...).
3) Forme (20K / 4ha)	Fait appel à la dynamique de la circulation de l’eau en milieu tourbeux (hydrodynamique) et au climat régional. Par exemple, Fen ou bog à mares, fen ou bog avec pergélisol.
4) Sous-forme (20K / 4ha)	Décrit la morphologie des tourbières en fonction d’un arrangement (patron) spatial particulier de biotopes (et possiblement imbriqué à travers différentes physionomies). Fait également appel au climat local (fen à pergélisol, fen à polygone...).
5) Biotope (5K à 20K / 0.25 à 4ha)	Fait appel à une description de la microtopographie. Par exemple, platière, talus, escarpement, buttes, tapis...
6) Physionomie (5K à 20K / 0.25 à 4ha)	Forme de la végétation : dénudé, sphaigne, mousse, herbacé, arbustif, arboré (et mixité des physionomies). La classe physionomique est déterminée à partir de l’étage de végétation le plus élevé et dont le recouvrement dépasse 30%.
7) Groupe végétal (5K à 20K / 0.25 à 4ha)	Identification des espèces végétales et des associations végétales.

Tableau 5.4-1 : Niveaux de perception et échelles cartographiques du Système de Classification des Milieux Humides du Québec (SCMHQ)

Source : Adapté de Buteau et al. (1994), tab.1, p.9

Le système marégraphique se retrouve tout autant en eau douce, saumâtre que salée contrairement au système riverain qui n’est présent qu’en eau douce. *Le système riverain englobe les sites dont l’apport en eau provient d’un plan d’eau situé à proximité. Tout au cours de la saison de croissance, les eaux de crue se retirent graduellement et conditionnent l’établissement d’une succession de groupements végétaux parallèles au plan d’eau. À chacune de ces communautés correspond une position topographique, des temps d’inondation et une position de la nappe phréatique” (Buteau et al., 1994).* Les marais s’observent surtout à l’intérieur du système marégraphique. Les communautés végétales inondées quotidiennement

forment le bas marais alors que l'ensemble des autres formations composent le haut marais. Dans le système riverain, le marais riverain se limite généralement à une mince bande de végétation comprise entre les eaux peu profondes et le marécage. Cette bande est le plus souvent dominée par *Phalaris arundinacea*, *Calamagrostis canadensis* ou *Lythrum salicaria* (voir la Partie III pour une description des marais du lac Saint-Pierre).

Les marécages du système riverain croissent essentiellement sur un substrat minéral mais peuvent aussi se développer sur des sols organiques (Figure 5.4-1) et occupent les plaines inondables. La nappe phréatique qui est élevée au moment des inondations printanières s'abaisse graduellement au cours de la saison de croissance pour atteindre une position inférieure à 50 cm lors de la période d'été (Buteau et *al.*, 1994). Les marécages occupent dans le système marégraphique (Figure 5.4-2) la partie supérieure de ce dernier et se développent surtout en physionomies arbustives (arbustaie) si l'eau est salée et en physionomie arbustive et/ou arborée si les eaux sont saumâtres ou douces. Les marécages du système marégraphique sont souvent en contact avec d'autres arbustaies appartenant au système d'écoulement. Les marécages du système d'écoulement (Figure 5.4-3) occupent les bas versants et s'observent sur des sols organiques ou minéraux mal drainés. La tourbe, d'une profondeur dépassant souvent 50 cm d'épaisseur, est formée de fragments de végétation arborescente, arbustive et herbacée. Les marécages du système de précipitations sont apparentés à ceux du système d'écoulement mais ils sont toutefois plus pauvres en nutriments.

Eau de rive (système riverain)						
Formes	Eau douce (sol minéral)			Eau douce (sol organique)		
	Marais		Marécage	Marais		Marécage
Sous-formes	Bas-marais	Haut-marais	Marécage	Bas-marais	Haut-marais	Marécage
Bio- tope	-Platière -Butte -Dépression	Platière -Butte -Dépression	Platière -Butte -Dépression	-Platière -Butte -Dépression	Platière -Butte -Dépression	Platière -Butte -Dépression
Phys.	-Herbacé	-Herbacé	-Arbustif -Arboré	-Herbacé	-Herbacé	-Arbustif -Arboré

Figure 5.4-1 : Système riverain du SCHMQ

Source : Buteau et *al.*, (1994), p.18 (extraits).

Formes	Eau douce ou saumâtre de marée			Eau salée de marée		
	Marais		Marécage	Marais		Marécage
Sous-formes	Bas-marais	Haut-marais	marécages	Bas-marais	Haut-marais	Marécage
Bio- tope	-Platière -Plateau -Chenal d'écoulement -Dépression -Marelle -Radeau -Bloc glacié -Butte gélifracée	-Platière -Plateau -Chenal d'écoulement -Dépression -Marelle -Radeau -Bloc glacié -Butte gélifracée	-Platière -Butte -Dépression	-Platière -Plateau -Chenal d'écoulement -Dépression -Marelle -Radeau -Bloc glacié -Butte gélifracée	-Platière -Plateau -Chenal d'écoulement -Dépression -Marelle -Radeau -Bloc glacié -Butte gélifracée	-Platière -Butte -Dépression
Phys.	-Dénudée (estran)	-Herbacé	-Arbustif -Arboré	-Dénudée (estran) -Herbacé	-Herbacé	-Arbustif

Note : (1) Marée d'équinoxe ou de tempête, (2) Haute marée de hautes eaux, (3) Basse marée de hautes eaux, (4) Hautes eaux printanières, (5) Basses eaux estivales.

Figure 5.4-2 : Système marégraphique du SCMHQ

Source : Buteau et *al.*, (1994), p.18 (extraits).

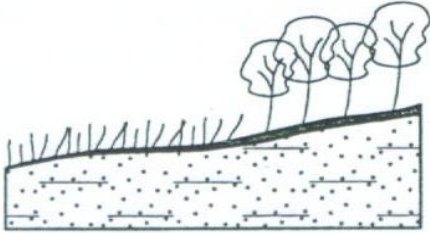
Eau d'écoulement et/ou eau de précipitations		
formes	marais de ruissellement	marécage de ruissellement
sous-formes	marais de ruissellement (prairie humide)	marécage de ruissellement
		
Bio- tope	-Platière -Butte -Dépression	Platière -Butte -Dépression
Phys.	-Herbacée	-Arbustif -Arboré

Figure 5.4-3 : Système d'écoulement ou de précipitations du SCMHQ

Source : Buteau et *al.* (1994) p.18 (extraits).

La majorité des tourbières se classent dans les systèmes d'écoulement et de précipitation. Les formes et sous-formes de bogs se regroupent dans le système de précipitation (Figure 5.4-4) alors que les fens se répartissent dans le système d'écoulement (Figure 5.4-5). Les eaux parviennent aux fens par l'intermédiaire de petits ruisseaux, elles se dissipent à l'intérieur du fen dans le dépôt organique sous-jacent, elles s'écoulent le long d'une pente faible mais régulière pour former à nouveau de petits ruisseaux dans la partie inférieure de l'habitat (Buteau et *al.*, 1994).

Contrairement aux marais et marécages, les bogs et les fens se déclinent en plusieurs sous-formes, souvent appelées «morphologies», créées par un agencement particulier de biotopes et de physionomies (Figure 5.4-4 et Figure 5.4-5).

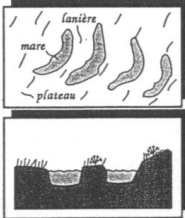
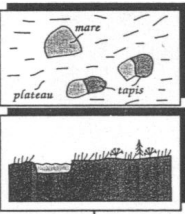
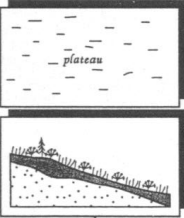
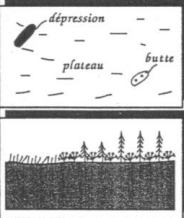
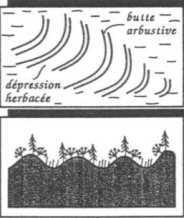
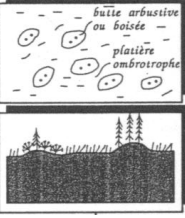
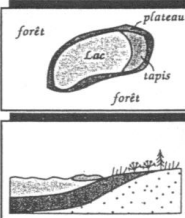
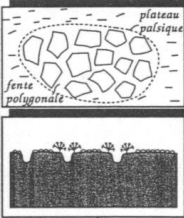
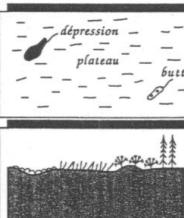
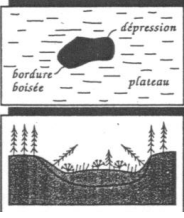
	Bog structuré	Bog à mares	Bog incliné	Bog uniforme	Bog ridé
					
Bio- tope	Lanière, mare, plateau	mare, plateau, tapis, platière	plateau	butte, dépression, plateau	butte, dépression
Phys.	lich, musc, Arbustif, herb.flottant.	lich, musc, arbustif, herb.flottant.	lich, musc, arbustif	lich, musc, herbacé, arbustif, arboré	musc, herbacé, arbustif
	Bog tacheté	Bog riverain	Bog à plateau palsique	Bog à pergélisol	Bog effondré
					
Bio- tope	butte, platière	plateau, tapis	plateau palsique, fente polygonale	plateau, butte, dépression	plateau, dépression, bord. de dépression
Phy	herbacé, arbustif, arboré	musc, herbacé, arbustif, arboré	lich, musc, herbacée, arbustif	lich, musc, herbacé, arbustif, arboré	musc, herbacé, arbustif, arboré.

Figure 5.4-4 : Représentation des sous-formes des bogs en milieu boréal et subarctique selon leurs morphologies, leurs biotopes et leurs physiologies

Source : Buteau et al., (1994), p.22 (extraits)

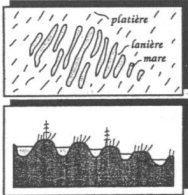
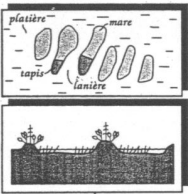
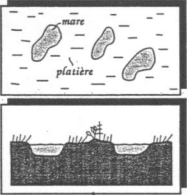
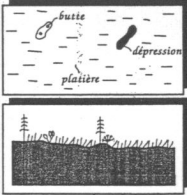
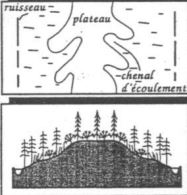
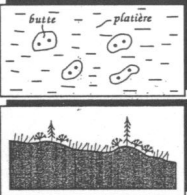
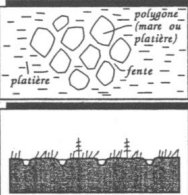
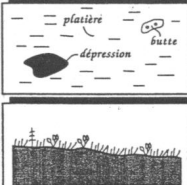
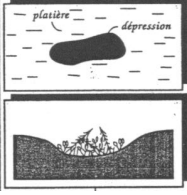
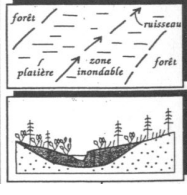
	Fen structuré	Fen mal structuré	Fens à Mares	Fen Uniforme	Fen Penné
					
Bio-tope	Lanière, mare	Lanière, mare, tapis	mare, platière	platière, butte, dépression	chenal d'écoulement, plateau
Phys.	herbacé, arbustif, herb. flottant.	musc, herbacé, arbustif, herb. flottant	herbacé, arbustif, herb. flottant	musc, herbacé, arbustif, boisé	arbustif, arboré
	Fen tacheté	Fen à polygones	Fen à pergélisol	Fen effondré	Fen riverain
					
Bio-tope	butte, platière	platière, polygone, fente polygonale	platière, butte, dépression	dépression, platière	plateau, tapis
Phy	herbacé, arbustif, arboré	lich, herbacé, arbustif	musc, herbacé, arbustif	musc, herbacé, arbustif	musc, herbacé, arbustif, arboré

Figure 5.4-5 : Représentation des sous-formes des fens en milieu boréal et subarctique selon leurs morphologies, leurs biotopes et leurs physionomies

Source : Buteau et al., (1994), p.22 (extraits)

5.5. La classification des milieux humides de Jeglum

Dans un rapport publié en 1974 pour le compte du service canadien des forêts, Jeglum et ses collaborateurs furent, du moins à notre connaissance, parmi les premiers à tenter une classification hiérarchique des milieux humides incluant la notion de la physionomie végétale. Cette notion sera à la base de notre proposition d'un système de taxinomie adapté à l'imagerie radar comme nous le verrons au chapitre 7. Le système de classification développé à l'origine pour la province de l'Ontario comprenait cinq niveaux de classification soit :

- i. La formation qui correspond aux cinq classes générales de milieux humides : bog, fen, marais, marécages et les eaux peu profondes. Ces classes sont distinguées par de nombreux facteurs dont les gradients biogéochimiques (voir la Figure 5.1-1);
- ii. La sous-formation qui dans la classification de Jeglum ne s'applique qu'aux bogs et aux fens et qui distingue les formations ouvertes des formations boisées. Les bogs (ou fens)

correspondant aux sous-formations ouvertes sont ceux pour lesquels les arbres de plus de 135cm constituent moins de 10% de l'aire observée.

- iii. Le groupe physiologique qui est un affinement de la sous-formation par un regroupement des espèces végétales partageant une physiologie similaire;
- iv. Le type dominant qui correspond à l'espèce végétale dominante de la strate supérieure.
- v. Le type de site qui tient compte de l'espèce végétale dominante de la strate inférieure.

Les travaux de Jeglum et al. (1974) ont surtout porté sur les niveaux 2 et 3 qui sont énumérés au Tableau 5.5-1 suivant.

M	Marais (<i>marsh</i>)	S	Marécages (<i>Swamp</i>)
M1	Marais profond (<i>deep marsh</i>)	S1	Marécages arbustifs (<i>Thicket swamp</i>)
M2	Marais peu profond (<i>shallow marsh</i>)	S2	Marécages dom. feuillus (<i>Hardwood swamp</i>)
M3	Prairie humide (<i>meadow</i>)	S3	Marécages dom. conifères (<i>Conifer swamp</i>)
B	Bog ouvert (<i>open bog</i>)	F	Fen ouvert (<i>open fen</i>)
B1	Bog à sphaignes (<i>Sphagnum bog</i>)	F1	Fen à graminées (<i>graminoid fen</i>)
B2	Bog à graminées (<i>Graminoid bog</i>)	F2	Fen à arbrisseaux (<i>low shrub fen</i>)
B3	Bog à arbrisseaux (<i>Low shrub bog</i>)	TF	Fen arboré (<i>treed fen</i>)
TB	Bog arboré (<i>Treed bog</i>)	TF1	Fen arboré avec graminées (<i>graminoid-rich treed fen</i>)
TB1	Bog arboré avec graminées (<i>Graminoid-rich treed bog</i>)	TF2	Fen arboré avec sphaignes (<i>sphagnum-rich treed fen</i>)
TB2	Bog arboré avec arbrisseaux (<i>Shrub-rich treed bog</i>)		

Tableau 5.5-1 : Classes physiologiques de la classification de Jeglum

Source : adapté de Jeglum et al., (1974)

5.6. Conclusion

Le SCMHQ sera utilisé comme cadre de référence dans cette thèse. Il a l'avantage de présenter l'ensemble des classes et sous-classes de milieux humides sous la forme d'une hiérarchie claire tout en se basant, en partie, sur des critères observables avec les données polarimétriques (morphologie et physiologie végétales). Bien que les physiologies végétales occupent l'avant dernier niveau de perception du SCMHQ, elles sont néanmoins cruciales car elles constituent le point d'arrimage entre les données polarimétriques et un système taxinomique généralisable à l'ensemble du territoire canadien et développé par des spécialistes des milieux humides. La notion de physiologie végétale sera approfondie au chapitre 7.

CHAPITRE 6

6. APPORT DES DONNÉES RADAR À L'INVENTAIRE ET LA CARTOGRAPHIE DES MILIEUX HUMIDES : REVUE DE LITTÉRATURE

6.1. Introduction

Les études en polarimétrie radar et généralement en imagerie radar portant sur les milieux humides ne sont pas nombreuses. Le Tableau 6.1-1 donne une liste non exhaustive de ces études en le classant selon la méthodologie de base employée pour la délimitation et la classification des milieux humides. Dans la catégorie « Multi-sources » (Tableau 6.1-1-A) nous retrouvons des études effectuées avec des images RSO mono-fréquence et mono-polarisation provenant des satellites mis en orbite dans les années 1990. Le potentiel informatif de ces images, somme toute limité pour l'inventaire et la cartographie des occupations des sols, est mis en valeur en analysant ces images en combinaison avec des images optiques et parfois avec des données sur le relief topographique. Les catégories suivantes « Texture », « Multitemporel » et « Multiangulaire » (Tableau 6.1-1, B à D) incluent des études effectuées principalement avec le même type d'images que dans la catégorie précédente sauf qu'ici l'on utilise comme approche pour rehausser le potentiel informatif de ces images soit leurs caractéristiques texturales soit leur sensibilité aux variations phénologiques de la végétation et/ou du niveau d'eau, ou encore leur sensibilité aux variations de la rugosité et de l'humidité des surfaces selon l'angle d'incidence. Les deux catégories suivantes « Multifréquence » et « Multipolarisation » (Tableau 6.1-1 E et F) comprennent des études effectuées avec des images aéroportées et satellitaires à différentes fréquences et en polarisation duale ou même quadruple (ex. ENVISAT, SIR-C). L'accent est mis soit sur les différences des images radar selon la longueur d'onde (capacité de pénétration, rugosité, etc.) et/ou la polarisation (exploitation de la relation entre mécanismes de rétrodiffusion et intensité du signal radar par configuration de polarisation). Parfois ces études font un usage limité des paramètres polarimétriques, tel la différence de phase entre canaux de polarisation parallèle, ou des canaux de polarisation synthétisée par des données polarimétriques (ex. polarisations circulaires). Finalement la dernière catégorie « Polarimétrie » (Tableau 6.1-1-G) comprend les

études effectuées avec des données polarimétriques provenant des RSO aéroportés ou satellitaires publiés jusqu'au moment de la rédaction de cette thèse. Plusieurs d'entre elles font appel aux différentes décompositions polarimétriques, le sujet principal de notre recherche.

Dans les sections qui suivent nous donnerons tout d'abord un bref aperçu d'études basées principalement sur des images radar et nous compléterons ce chapitre avec une présentation plus détaillée des études effectuées avec les données polarimétriques.

Auteur (s), Stratégies	Type d'image radar	M.H, (superficie)	Commentaires
A) Multi-sources			
<u>Töyrä et al. (2001)</u> Mtpl, Minc	RS1[C-HH], S1, S2, S7	Mr, Mrg, Msec (4000km ²)	Classification supervisée de la végétation inondée utilisant la complémentarité radar/optique (Landsat).
<u>Li et Chen (2005)</u> Mtpl	RS1[C-HH], S5	Tb, Mr, Mrg. (300km ²)	Classification des types de M.H par objet basés sur un arbre décisionnel intégrant images radar (printemps et automne), optiques et MNA.
<u>Grenier et al. (2007)</u>	RS1[C-HH], S7 Québec	Tb, Mr, Mrg. (5000km ²)	Classification orientée objet (e-cognition), contribution de l'imagerie radar sous forme d'images de texture (cooccurrence)
<u>Bwangoy et al. (2010)</u>	JERS1 [L-HH] Congo	Mrg, Phm, Msec (456 750 km ²)	Utilisation d'image radar, optique et d'un MNA pour la cartographie des milieux humides utilisant un arbre hiérarchique de classification.
B) Texture			
<u>Arzandeh et Wang (2002)</u>	RS1 [C-HH],F1 Ontario	Mrg, Mrs, Msec (625km ²)	Étude de la paramétrisation des algorithmes GLCM pour l'amélioration des classifications d'images radar
<u>Arzandeh et Wang (2003)</u> Msrc	RS1 [C-HH],F1 Ontario	Mrg (200km ²)	Suivi de la distribution spatiale du Phragmite avec indice de texture et synergie entre imagerie radar et optique
<u>Demers (2005)</u> Minc	RS1, S1 et S7 [C]	Tb. (2025km ²)	Classif. MLC des types morphologiques de tourbière à l'aide des canaux de texture (GLCM).
<u>Racine et al. (2005)</u> Mtpl	RS1, F4 (C-HH) Québec	Tb. (2025km ²)	Classif. MLC des types morphologiques de tourbière basé sur des canaux de texture (GLCM), hydrologie des tourbières.
C) Multitemporel			
<u>Ramsey (1995)</u> Mtpl+, Msour	ERS1 (C-VV) Floride	Mrs (200km ²)	Variabilité de la densité de végétation, de l'humidité et présence de bassin d'eau stagnante rend difficile la délimitation du périmètre d'inondation. Nécessaire de calibrer les résultats avec des données terrain.
<u>Morrissey et al. (1996)</u> Mtpl+, mod	ERS1 (C-VV) Alaska	Tb, Msec (ND)	Observation et modélisation de σ°_{VV} pour expliquer la différence entre M.H et milieux secs en tenant compte du gel/dégel, des températures et des précipitations.
<u>Kasichke et B-Chavez (1997)</u> Mtpl, mod	ERS1 (C-VV) Floride	Mrg, Mrs (100km ²)	Modélisation et observation de l'effet du niveau d'eau sur la rétrodiffusion de la végétation émergente (arborée et herbacée)
<u>Parmuchi et al. (2002)</u> Mtpl+, Minc	RS1, S1 et S6 [C-HH] Argentine	Mrg, Mrs, Msec (3600km ²)	Comparaison d'une classif. Non supervisée (Isodata) et d'un arbre décisionnel (seuils) pour la cartographie des marais et marécages.
<u>Saich et al. (2001)</u>	ERS1 [C-VV]		Série temporelle d'images conditions sèches et

Mtpl+, Mfre, Msrc	JERS1 [L-HH] Vietnam		humides pour délimitation des M.H et estimation du volume d'eau avec MNA.
<u>Kasischke et al. (2003)</u> Mtpl+, Mod	ERS2 [C-VV], Floride	Mrg, Mrs, Phm (2500km ²)	Étude de sensibilité entre σ_{vv}^0 et paramètre biophysique : biomasse, niveau d'eau, etc.
<u>Hess et al. (2003)</u> Mtpl	JERS1 [L-HH] Brésil /Colombie	Mrg, Mrs, Msec (1 746 781km ²)	Cartographie du périmètre d'inondation basé sur images d'hivers vs été, segmentation par objets + classif. Non supervisé des objets.
<u>Moreau et Le Toan (2003)</u> Mtpl+	ERS1 [C-VV] Bolivie	Mrg, Phm (10km ²)	Étude la relation temporelle entre C-VV et diverses variables (ABG sèche et humide) basé sur des régressions logarithmiques
<u>Bartsch et al. (2007)</u> Mtpl+	Envisat [C-VV] ScanSAR	Tb, msec (Nat)	Seuillage d'une série d'images pour conditions de gel, dégel/fonte et sec pour séparation entre tourbière, forêt (sec) et eau.
<u>Grigs et al. (2005)</u> Mtpl+, Mod	ERS2[C-VV] Argentine	Mrg (200km ²)	Modélisation de la rétrodiffusion (hauteur, densité, biomasse) des marais à Jongs.
<u>Whitcomb et al.(2007)</u> Mtl, Msrc	JeRS1 (L-HH) Alaska	Mrg, Mrs, Tb (Nat)	Utilisation d'une mosaïque d'hiver et d'été + données auxiliaires pour cartographie des M.H basés sur un arbre hiérarchique de classification (<i>Random forest</i>)
<u>Martinez et LeToan (2007)</u> Mtl+	JERS1 (L-HH)	Mrg, Mrs (19 000km ²)	Analyse de la dynamique annuelle d'inondation d'un bassin versant et cartographie du périmètre d'inondation.
<u>Lang et al. (2008a)</u> Mtpl+, Mpol	ERS2 [C-VV] Envisat [C-HH]	Mrg. Msec (100km ²)	ACP d'une série temporelle pour identifier les tendances temporelles dominantes de l'inondation de l'humidité des sols.
<u>Lang et al., (2008b)</u> Mtpl+, Msrc	ASAR [C-VV et C-HH], ERS [C- VV] Virginie	Mrg, Msc (100km ²)	Cartographie leaf-off / leaf-On des marécages, analyse en composantes principales et arbre hiérarchique de classif.
<u>Kasischke et al. (2009)</u> Mtpl+	ERS2 [C] Alaska	Tb (2km ²)	Relation entre σ_{vv}^0 et paramètres biophysiques (teneur en eau volumétrique de la tourbe et niveau d'eau sous la surface).
<u>Clark et al. (2009)</u> Mtpl+	ERS1&2 (C-VV) Alberta	Tb (1030km ²)	Cartographie de la probabilité des "zones hydrologiques sensibles" à l'échelle d'un bassin versant basé utilisant un classificateur flou pour établir deux classes : saturé et on saturé.
<u>Silva et al. (2010)</u> Mtpl+, Msrc	RS1, S2 [C], Brésil	Mrs, Mrg, VF (900km ²)	Classif, hiérarchique à 3 niveaux et cartographie de la productivité (gm ⁻² an ⁻¹) des macrophytes herbacés aquatiques.
D) Multiangulaire			
<u>Kandus et al. (2001)</u> Minc, Mtpl	RS1, S1, S4 et S6 (C-HH) Argentine	Mrg, Mrs, Msec (1000km ²)	Étude de l'influence du niveau d'eau et de l'angle d'incidence sur la rétrodiffusion de divers types de M.H.
<u>Bernier et al. (2003)</u> Minc, Mtpl, Tex	RS1[C-HH], S1 et S7 Quebec	Tb	Analyse de séparabilité des classes, classif.MLC et par réseau de neurones des types de tourbières.
<u>Sokol et Pultz (2004)</u> Minc, Mtpl, Mpol	RS1(C-HH), S1, S5, S7, F1. ERS2 (C-VV)	Tb (fen vs bog) (Labrador)	L'angle d'incidence à un effet sur la rétrodiffusion des fens et des bogs mais ne permet pas de les discriminer.
<u>Li et al. (2007)</u> Minc, Msrc	RS1[C] Ontario	Tb, Mrs, Mrg. Msec (60km ²)	Étude de la séparabilité des classes et classif. supervisée MLC : radar, optique (Landsat) et radar + optique.
<u>Lang et al. (2008b)</u> Minc, Mtpl, mod	RS1 [C-HH] S1 à S7 Virginie	Mrg (140km ²)	Étude de la signature angulaire de différents types de marécages en conditions inondé/non inondé et leaf-off/leaf-on
E) Multifréquence			
<u>Pope et al. (1994)</u>	Airsar [C-L-P]	Mrs, Mrg,	Développement d'indices biophysiques basés sur des

Mfre, [S ₂]	Belize	Msec (90km ²)	rappports de bandes et de polarisation pour la caractérisation de la biomasse et de la structures des milieux humides tropicaux.
<u>Pope et al. (1997)</u> Mfre, [S ₂], Mtpl	SIR-C [C et L] Mexique	Mrg (1950km ²)	Étude de sensibilité d'indices biophysiques et détection des cycles d'inondation pour divers types de marais.
<u>Augusteijn et Warrender (1998)</u> Mfre, Mpol, Msrc	Airsar [C-L-P] Maryland	Tb, Msec (20.8km ²)	Classif. forêt vs M.H boisés et de différentes classes d'humidité dans les M.H boisés à l'aide d'un réseau de neurones. Comparaison de plusieurs combinaisons de polarisations, fréquence et bande spectrales (Landsat).
<u>Novo et al. (2002)</u> Mfre	RS1, S6 [C-HH]. JERS1 [L-HH] Brésil	Mrs, Mrg, VF (??km ²)	Classif. type de macrophytes. Bande C est plus sensible à la structure des plantes et la bande L plus sensible à la biomasse aérienne.
<u>Ranson et Sun (1997)</u> Mfre, Mpol	SIR-C, Airsar Maine	Tb (bog et Fen), Msec 100km ²	Étude de sensibilité et régression (densité, biomasse) et classif, supervisée des type de forêts incluant des classes de tourbières.
<u>Bourgeau-Chavez et al. (2001)</u> Mfre, Mpol, Mtpl	SIR-C, RS1, JERS1, ERS1 Virginie	Mr, Mrg, Msec (700km ²)	Évaluer le potentiel de l'approche multifréquence (C et L) et multipolarisation (HH, HV et VV) pour cartographie des M.H et comparaison classif. MLC vs arbre hiérarchique.
F) Multipolarisation			
<u>Noerberg et al. (1999)</u> Mpol	Convair-580 [C] Brésil	Mrg, Mrs, Msec (100km ²)	Comparaisons entre indices biophysique de Pope et al (1994) et HH, HV et VV (dB) pour diverses physiologies végétales des M.H
<u>Baghdadi et al. (2001)</u> Mpol, Mtpl	Convair-580 [C] Ontario	Tb, Mrs, Mrg. (60km ²)	Classification par arbre hiérarchique (seuillage) des canaux HH, HV et VV. Comparaison 3 dates (juin, juillet, octobre).
<u>Townsend (2002)</u> Mpol, Mod	RS1 (C-HH), ERS1 (C-VV) Caroline du Nord	Mrg (1000km ²)	Déterminer les attributs structuraux d'une forêt qui contribuent à la capacité ou à l'incapacité de la bande C-VV à détecter le périmètre d'inondation (par rapport à C-HH).
<u>Grings et al. (2005)</u> Mpol, mod, Mtpl+	ERS2 (C-VV), RS1 (C-HH), Envisat (C-HH- VV), Argentine	Mrg (????)	Modélisation par RTF de l'évolution temporelle des marais à Jongs. Variables modélisées : densité et hauteur des tiges, coefficient de rétrodiffusion HH et VV
G) Polarimétrie			
<u>Hess et al. (1995)</u> [S ₂], Mfre	SIR-C (C-L) Brésil	Mr, Mrg. Msec (1200km ²)	Étude de sensibilité et délimitation du périmètre d'inondation utilisant un arbre décisionnel (avril, octobre et avril+octobre).
<u>Proisy et al. (2000)</u> [S ₂], Mpol, Mfre, Mod	Airsar [C-L-P] Guyane	Mrg	Étude de sensibilité et modélisation de la rétrodiffusion des mangroves : densité, hauteur, DBH, biomasse totale, aire basale.
<u>Horritt et al. (2003)</u> [S ₂], Mfre	E-SAR [C-L] Angleterre	Mrg (16km ²)	Cartographie de la végétation émergente reposant sur l'amplitude et phase HH-VV pour une meilleure estimation de la position du rivage.
<u>Touzi (2007a) ; Touzi et al. (2007)</u> [S ₂]	Convair-580 [C] Ontario	Tb, Mr, Mrg, Msec. (60km ²)	Caractérisation des types de M.H basé sur la décomposition de Touzi. Introduction de la phase $\Phi_{\alpha s1}$ pour meilleure discrimination Fen vs Bog.
<u>Touzi et al. (2009)</u> [S ₂]	Convair-580 [C] Ontario	Tb, Mrs, Mrg. (60km ²)	Caractérisation des types de milieu humide basé sur la décomposition de Touzi. Fen vs Bog
<u>Takada et al. (2009)</u> Mtpl+, Mpol, Msrc	Alos-Palsar, FBS, FBD et PLR [L] Japon	Tb (25km ²)	Étude de sensibilité : régressions multiples entre canaux de polarisation, indices de végétation et paramètres biophysiques.
<u>Touzi et Gosselin (2010)</u> [S ₂], Mtpl	Alos-Palsar-PLR [L]. Québec	Tb (15km ²)	Utilisation de la phase polarimétrique ($\Phi_{\alpha s1}$) pour la détection du niveau d'eau sous la surface de tourbe.

			Fen vs Bog.
Brisco et al. (2011) [S ₂]	Convair-580 [C] Manitoba	Mrs (<0.25 à plusieurs ha)	Séparabilité des classes (divergence transformée) et classification après décomposition de Freeman-Durden, Pauli, Cloude-Potier
Maréchal et al. (2011) [S ₂], Mtpl+	RS2, FQ23 Bretagne, France	Mrs (4 km ²)	Variabilité temporelle des aires inondées (distinction des aires saturées d'eau des eaux libres); Différentes décompositions afin d'établir le descripteur polarimétrique le plus sensible aux fluctuations des aires inondées
Gosselin et al. (2011) [S ₂], Mtpl+	RS2, FQ15 [C] Québec	Mrs, Mrg, Msec (625km ²)	Classification par arbre hiérarchique des physionomies végétales des M.H basé sur les paramètres de la décomposition de Touzi.
Abréviations utilisées			
Stratégies [S ₂] = polarimétrie radar; Mpol =mutipolarisation; Mfre =multifréquence; Mtpl =Multitemporel (quelques images); Mtpl+ =Multitemporel (série temporelle); Mres =Multirésolution; Minc = Multi-incidence; Msrc = Multi-source (images optiques, lidar, MNÉ, données auxiliaires, nécessaires pour atteindre les objectifs de l'étude et non pas seulement pour des fins de comparaison); Tex = Texture; Obj = Classification orientée objet; Mod = modélisation de la rétrodiffusion.		Autres abréviations M.H = Milieux humides; MNA = Modèle numérique d'élévation; DBH = Diamètre des troncs à hauteur de poitrine; NAT = Cartographie à l'échelle provinciale ou nationale; ACP = analyse en composantes principales ABG = Biomasse aérienne totale; GLCM = Texture par co-occurrence des niveaux de gris	
Types de milieux humides Tb =Tourbière (Fen ou Bog); Mrs = Marais (hauts et bas marais); Mrg = Marécages (incluant les mangroves); VF = Végétation flottante; Phm =prairie humide; Msec = Milieux secs (l'article teint compte explicitement de la confusion entre milieux secs et humides)		Notes : (1) La superficie couverte par les études est la plupart du temps estimé à partir des classifications ou images présentées dans l'article. (2) Pour que la polarimétrie radar soit identifiée comme principale stratégie ([S ₂]), il faut au minimum que la différence de phase HH-VV ait été utilisée et préférablement une décomposition ou une stratégie d'optimisation quelconque de l'information polarimétrique.	

Tableau 6.1-1 : Études portant sur les milieux humides faisant appel aux données radar

6.2. Études avec l'imagerie radar

Plusieurs études et revues de littérature publiées au cours des 20 dernières années font état des connaissances sur l'utilité de l'imagerie radar (multi-fréquences et multi-polarisations) dans différents domaines d'inventaire et de cartographie des ressources terrestres dont les milieux humides (Kasischke et al., 1997; Schmullius et Evans, 1997). Le Tableau 6.1-1 extrait de l'étude de Schmullius et Evans (1997) résume bien le potentiel de l'imagerie radar en plusieurs fréquences et selon les configurations typiques de polarisation parallèle et croisée dans les applications reliées aux milieux humides. Ce tableau démontre qu'il n'y a pas une fréquence et une polarisation en particulier qui peut répondre à l'ensemble de besoins dans ce domaine. Ainsi la multi-polarisation est particulièrement importante pour la caractérisation de la géométrie des canopées (essentielle à des fins de classification) et à la cartographie des

milieux humides non boisés. Évidemment, au-delà de la polarisation, les bandes L et P sont importantes pour les milieux forestiers et boisés alors que la bande C est importante en agriculture et dans les environnements de faibles biomasses comme les milieux humides non boisés et la toundra.

Applications	Fréquence			X			C			L			P		
	hh	vv	cr	hh	vv	cr	hh	vv	cr	hh	vv	cr	hh	vv	cr
Écologie															
Cartographie de la végétation	•	•	●	•	•	●	◐	◑	●	◐	◑	●	◐	◑	●
Estimation de la biomasse	•	•	•	•	•	•	•	•	●	•	•	●	•	•	●
Structure (géométrie) des canopées	●	●	•	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Suivi des forêts inondées	-	-	-	-	-	-	●	•	•	●	•	•			
Milieux humides non boisés	●	●	●	●	●	●	●	•	•	●	•	•			
Suivi des cultures	◐	◐	◐	◑	◑	◑	●	●	●	-	-	-			
Suivi de la toundra	●	●	●	●	●	●	•	•	•						
Cycles Gel/dégel végétation	◐	◐	◐	◑	◑	◑	○	○	○						
Hydrologie															
Texture et humidité des sols	-	-	-	•	•	•	●	●	●	○	○	○			
Cartographie de la salinité des sols	-	-	-	-	-	-	●	●	-						
Rugosité de surface	•	•	•	•	•	•	●	●	●	•	•	•			
Frontières terre-eau / inondation	-	-	-	•	•	-	●	•	-	●					
● :	Important	○ ○ ○	Fréquence importance qu'importe la polarisation												
◐ :	Important	◐ ou ◑	seulement une polarisation est requise												
◑ :	Important	◑◑◑ ou ◑◑◑	Polarimétrie requise mais seulement une fréquence												
• :	Utile														
— :	Pas obligatoire		Aucun symbole : pas d'information												

Tableau 6.2-1 : Imagerie radar optimale pour des applications écologiques et hydrologiques reliées aux milieux humides (adapté de

Source : Adapté de Schmullius et Evans (1997)

Tel que mentionné précédemment, dans le cas de l'imagerie satellitale la multi-polarisation n'est acquise que récemment tandis que la multifréquence (en simultané) n'est que l'apanage des radars aéroportés. Seule la mission SIR-C de la navette spatiale a fourni des données avec une diversité de fréquences et de polarisations. Ainsi la plupart d'études portant sur les milieux humides jusqu'à tout récemment ont été effectuées à partir des images en fréquence et polarisation simples (Tableau 6.1-1). Les résultats les plus importants de ces études en ce qui a trait à l'hydrologie et l'écologie (Tableau 6.2-1) seront brièvement revus par la suite.

6.2.1. Hydrologie

Les études dans ce domaine s'intéressent tantôt à la délimitation des périmètres d'inondation tantôt à l'hydrologie des tourbières.

La délimitation des périmètres d'inondations dans le cas des marais et de marécages est l'une des applications les plus courantes des images radar (Smith, 1997; Milne *et al.*, 2000; Saich *et al.*, 2001; Töyrä *et al.*, 2001; 2002; Hess *et al.*, 2003; Töyrä et Pietroniro, 2005; Bartsch *et al.*, 2007). Ici on fait appel le plus souvent à l'imagerie multitemporelle. Les techniques basées sur le seuillage ou la différence d'image et agrémentées, parfois, de morphologie mathématique pour améliorer la précision du masque inondé/sec (et par extension milieu humide / milieu sec) sont populaires et sont basées sur le fort contraste existant entre une surface inondée et son environnement immédiat. Une zone inondée sera caractéristiquement très sombre due à la réflexion spéculaire causée par la surface d'eau lisse ou, au contraire, très brillante s'il y a présence de végétation émergente (arbre ou herbes) ce qui causera une rétrodiffusion de type double-bond (Hess *et al.*, 1990; Henderson et Lewis, 2008). Ce fort contraste assure généralement un bon taux de succès sous diverses conditions (Smith, 1997). Des conditions venteuses peuvent cependant entraîner une dissipation de la rétrodiffusion spéculaire par la création de vagues et donc une augmentation de la rétrodiffusion à laquelle un angle d'incidence étroit et /ou la polarisation VV sera particulièrement sensible. Une forte biomasse foliaire peut également réduire la précision ou rendre impossible délimitation du périmètre d'inondation en empêchant le signal incident d'atteindre la surface inondée. Il n'y a donc pas de consensus dans la littérature sur quelle est la meilleure configuration (bande C vs bande L, copolaire vs orthopolaire) pour la délimitation des périmètres d'inondations. La meilleure configuration dépend donc du contexte et de la structure de la végétation (Townsend, 2002). La présence de végétation émergente complique la détection du rivage (Figure 6.3-1). Concernant les tourbières, contrairement aux marais et marécages une approche multitemporelle basée sur l'identification des zones saturées/inondées ne semble pas donner des résultats probants. Selon Krankina *et al.* (2008) ceci, tout au moins pour les zones boréales, est principalement dû au fait qu'une partie significative d'une tourbière ne présente pas une inondation prolongée.

Quelques études (Racine et *al.*, 2005; Clark et *al.*, 2009; Kasischke et *al.*, 2009) ont tenté d'établir une relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et divers paramètres représentatifs de l'état hydrologique des tourbières dont l'humidité de la tourbe (teneur en eau volumétrique) liée, entre autres, aux fluctuations du niveau d'eau dans l'acrotelme (voir chapitre 15). Que ce soit avec C-VV (Kasischke et *al.*, 2009) ou C-HH (Racine et *al.*, 2005) aucune relation entre σ^0 et l'état des tourbières n'a été trouvée. Les raisons évoquées sont d'une part l'influence de la couverture végétale (arbustes et formations herbacées) qui atténue le signal et un niveau d'eau hors de portée du signal incident pour des profondeurs aussi faibles de 15 cm sous la surface (Kasischke et *al.*, 2009). Plus d'une cinquantaine d'images ERS1 et 2 a été utilisée par Clark et *al.* (2009) pour établir une cartographie de la probabilité des "zones hydrologiques sensibles"¹² à l'échelle d'un bassin versant. Plutôt qu'un seuillage, un classificateur flou a été utilisé pour établir une classification binaire de chaque image en une classe saturée et une classe non saturée. Les auteurs rapportent que les physionomies arborées n'ont pas été une source majeure d'erreur puisque la majorité des secteurs boisés (milieux secs ou tourbières) étaient à canopée ouverte. Les questions sur l'hydrologie des tourbières sont traitées avec plus de détails dans la dernière partie de la thèse.

6.2.2. Écologie

Tel que mentionné, l'analyse d'images radar multi-temporelles aide à délimiter le périmètre d'inondation des marais et marécages. Cependant la reconnaissance détaillée des classes de végétation à l'intérieur de ce périmètre est difficile si l'on se base exclusivement sur l'amplitude du signal radar, particulièrement lorsque une seule fréquence et polarisation sont utilisées. La reconnaissance devient davantage difficile dans le cas des tourbières où même cette délimitation n'est pas réalisable. Les principaux résultats obtenus dans les études citées au Tableau 6.1-1 sont brièvement revus par la suite.

¹² Les zones hydrologiques sensibles (*HSAs, Hydrologically sensitive areas.*) se définissent comme étant les zones où la nappe phréatique est sporadiquement ou en permanence près ou à la surface (saturation) ou encore lorsqu'une zone est inondée.

Multi-sources

Dans le cas de l'utilisation combinée avec des images optiques (Tableau 6.1-1-A), le rôle de l'imagerie radar est souvent confiné à la délimitation du périmètre inondé des marais et marécages tandis que les données optiques sont utilisées pour la reconnaissance des classes de végétation à l'intérieur de ce périmètre (par exemple, Arzandeh et Wang, 2002; Li et Chen, 2005; Bwangoy et *al.*, 2010). Cependant même en utilisant des données optiques, la discrimination entre formations végétales de ces milieux humides n'est pas toujours aisée. Dans le cas de l'imagerie optique, il existe à la fois une confusion spectrale entre les milieux humides et les milieux secs mais également entre les divers types de milieux humides (Ozermi et Bauer, 2002; Poulin et *al.*, 2002). L'identification des marais et des marécages au printemps pose généralement moins de problèmes comparativement aux milieux humides ayant des régimes hydriques plus secs, comme les tourbières, ou encore pour les marécages lorsque la biomasse foliaire est importante (Ozesmi et Bauer, 2002). Concernant les tourbières Poulin et *al.* (2002) mentionnent la difficulté de les identifier sur les images multispectrales à résolution moyenne (Landsat). Lang et *al.* (2008a) constatent quant à eux l'échec des techniques de cartographie traditionnelle des milieux humides en termes de faisabilité et de précision liés à la difficulté d'obtenir des images optiques sans nuages à intervalles répétés ou pour des questions de coûts (photographies aériennes et validation sur le terrain).

Texture

La texture des images radar (Tableau 6.1-1-B), quantifiée le plus souvent par les statistiques de 2^e ordre issues des matrices de cooccurrence, est principalement utilisée dans le cas des tourbières (Bernier et *al.*, 2003; Demers, 2005, Racine et *al.*, 2005). À titre d'exemple, Demers (2005) utilise trois images RADARSAT en mode standard (S1 et S7) pour la classification d'un complexe tourbeux de la région de Radisson dans le nord du Québec. Plusieurs configurations et combinaisons de canaux de texture ont été utilisées, mais l'exactitude totale de la classification des canaux de texture basée sur le maximum de vraisemblance n'a jamais dépassé les 60%. D'importantes confusions ont aussi été observées entre les classes censées être représentatives d'une morphologie de tourbière et un regroupement des classes a été nécessaire (Tableau 6.2-2) afin d'améliorer l'exactitude de la classification qui a demeuré, quand même, inférieure à 75%. L'une des raisons évoquées était la taille de plusieurs éléments morphologiques (mares, lanières...) qui était inférieure à la résolution du capteur. Racine et

al. (2005) emploie une méthodologie similaire pour le même secteur, mais avec des images RS1 acquises en mode fin (F4). L'exactitude globale de la classification avec la meilleure combinaison de canaux de texture a été d'environ 35 % sans ou avec regroupement de classes de beaucoup inférieure à celle obtenue par Demers malgré une résolution spatiale trois fois supérieure (mode fin vs mode standard) et appariée à la taille des éléments morphologiques du milieu à classifier. Les auteurs évoquent à la fois une moins bonne résolution radiométrique du mode F4 et de dates d'acquisition ainsi que l'information complémentaire des angles d'incidence des modes S1 et S7 utilisées par Demers.

Classes originales		Classes regroupées
Mares faible densité, mares forte densité, tourbière lanières et mares, tourbière ridée, tourbière uniforme	→	Tourbières ouvertes
Tourbière boisée	→	Tourbières boisées
Eau (libre)	→	Eau
Fen sur minéral, Surfaces nues, autres	→	Minéral

Tableau 6.2-2 : Regroupement des classes morphologiques

Source : Demers (2005)

L'étude d'Arzandeh et Wang (2002) est un exemple d'utilisation de la texture pour la reconnaissance des classes des milieux humides autres que les tourbières. Les auteurs définissent les classes suivantes : forêt, urbain, Typha, Phragmite, marécages, herbes hautes, eau et agriculture. Ils proposent une méthodologie d'analyse de canaux de texture selon différents paramètres de calcul (fenêtre, pas et direction d'échantillonnage) afin de choisir le meilleur sous-ensemble possible de canaux de texture selon les caractéristiques de sites d'entraînement spécifiés par l'utilisateur. Ils constatent que c'est la taille de la fenêtre de calcul plus que le pas et la direction d'échantillonnage qui a le plus d'impact sur la définition des meilleures combinaisons des canaux de texture. Malgré tout, l'exactitude de classification ne dépasse pas les 75% comparativement à celle d'une image Landsat qui est supérieure à 90% avec les mêmes sites d'entraînement et les mêmes classes.

Multitemporel

Les études avec des séries d'images radar acquises surtout durant la période de croissance (Tableau 6.1-1-C) examinent la possibilité d'améliorer la reconnaissance des formations végétales en exploitant la dynamique temporelle des diverses classes de milieux humides. Si le recours à l'imagerie multitemporelle est fréquent pour la caractérisation et la classification des

milieux humides, peu d'études abordent spécifiquement le problème posé par le traitement et la gestion des séries temporelles. L'une des raisons est que souvent on se limite à quelques images et ainsi des techniques simples telles le ratio ou la différence entre images peuvent être employées pour détecter les changements (voir Rignot et van Zyl, 1993). Pour les séries temporelles plus populeuses la technique de l'analyse en composantes principales est souvent employée (Moisan et *al.*, 1999; Lang et *al.*, 2008a). Martinez et Le Toan (2007) et Silva et *al.* (2010), pour leur part, proposent une série de mesures calculées par pixel de la série multitemporelle qui permettent de réduire la dimensionnalité d'images tout en rehaussant les contrastes temporelles entre les diverses classes.

Multi-angulaire

L'angle d'incidence apporte une information sur la structure des physiologies végétales car il définit la quantité du signal qui sera transmise ou atténuée par la canopée¹³. Si l'on dispose d'images d'un même secteur acquises selon des angles d'incidence différents, leur analyse combinée peut fournir d'informations complémentaires sur les classes de végétation, pourvu qu'il n'y ait pas un trop de décorrélation temporelle entre elles (Tableau 6.1-1-D). À titre d'exemple, Bernier et *al.* (2003) ont démontré la complémentarité des modes S1 et S7 de RADARSAT-1 pour l'amélioration de la classification des tourbières du Nord du Québec. Dans la même veine, Li et *al.* (2007) observèrent que les bogs ouverts ne sont pas discriminables des marais pour les angles d'incidence faibles, mais que la séparabilité devient bonne pour les angles d'incidence élevés.

D'autres études se concentrent plus sur la détection des périmètres d'inondation en fonction de l'angle d'incidence. Selon plusieurs les angles d'incidence faibles permettent une meilleure détection des périmètres d'inondations, car il y a une pénétration accrue des canopées végétales (Adam et *al.*, 1998; Töyrä et *al.*, 2001; Töyrä et Pietroniro, 2005). Par contre les angles d'incidence faibles, en l'occurrence les modes S1 et S2 de RADARSAT-1 et IS1 (15° à 29°) d'ENVISAT-ASAR sont très sensibles à la rugosité de la surface de l'eau induite par les vents. En présence de forts vents, des distinctions aussi simples que celle entre eau libre et végétation peuvent s'avérer difficiles (Ramsey et Laine, 1997; Bernier et *al.*, 2003) car la

¹³ Voir Kakischke et Bourgeau-Chavez, (1997); Townsend (2002) et Lang et *al.*, (2008a,b) pour une modélisation par transfert radiatif de cet effet appliqué aux marécages.

rétrodiffusion des surfaces augmentera (présence de vagues). D'un autre côté, contrairement à ce que prédit la théorie, Lang et *al.* (2008b) n'ont pas trouvé d'évidence que les faibles angles d'incidence ($\approx 25^\circ$) permettaient une meilleure détection des forêts inondées que les angles d'incidences plus rasantes ($\approx 45^\circ$) pour différents types de physiologies arborées. La dépendance du signal à l'angle d'incidence semble plus grande pour les milieux ouverts (sphaignes) et la végétation herbacée des marais que pour les autres physiologies particulièrement pour les polarisations parallèles (Takada et Mishima, 2009).

Multi-fréquence et multi-polarisation

Les indices biophysiques de Pope (1994) reflètent bien l'approche multi-polarisée qui se base surtout sur des rapports de canaux de polarisations (Tableau 6.2-1).

[CSI] Indice de structure de la canopée	$= \frac{VV}{VV + HH}$	[BMI] Index de biomasse	$= \frac{VV + HH}{2}$
[VSI] Indice de diffusion volumique	$= \frac{((HV + VH)/2)}{((HV + VH)/2) + ((VV + HH)/2)}$	[ITI] Index du type d'interaction	$= \Delta\phi_{hh} - \phi_{vv}$

Tableau 6.2-3 : Indices biophysiques radar

Source : Pope et *al.* (1994)

La popularité de ces indices tient à leur simplicité et à leur ressemblance avec les indices de végétation tirés des données multispectrales à moyenne résolution (par ex. SPOT ou Landsat). Il est toutefois possible de se questionner sur l'apport réel de ces indices. Par exemple, l'indice de biomasse (BMI) qui mesure la quantité relative de biomasse ligneuse par rapport la biomasse foliaire, exploite les polarisations linéaires HH et VV alors que la plupart des études empiriques ont démontré que l'estimation de la biomasse est meilleure avec la polarisation croisée (Ramsey et *al.*, 1998). Ce problème est cependant soulevé par les auteurs mêmes qui mentionnent qu'il arrive que les indices BMI et VSI répondent de manière similaire à un changement de biomasse ou qu'encore l'indice VSI puisse donner une meilleure mesure de la biomasse. L'indice de la structure de la canopée (CSI), qui mesure l'importance relative des structures verticales par rapport aux structures horizontales, peut donner des résultats ambigus et doit être interprété conjointement avec la différence de phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ qui correspond à l'indice du type d'interaction (ITI). Par exemple, un marécage et une forêt qui partageraient la même structure auraient une valeur de BMI très différente due à l'augmentation de HH causée par la rétrodiffusion double-bond (Pope et *al.*, 1994). Même en l'absence d'inondation, il a été

rapporté que les variations de l'humidité du sol contaminent les indices biophysiques et qu'ainsi il est difficile de caractériser correctement la structure et la densité de la végétation (Kasishke *et al.*, 2003). Ainsi, un examen attentif des indices biophysiques de Pope et des résultats présentés dans Pope *et al.*, (1994) révèle avant tout l'apport de la fréquence plutôt que celui de la polarisation. Bien que les ratios de bandes présentés au Tableau 6.2-3 puissent exploiter l'information polarimétrique, il faut être prudent quant à l'élaboration d'indices qui imitent les indices de végétation du domaine optique, par exemple l'indice SAR_{vi} présenté par Stoll (2005). L'élaboration d'indices basés sur les images radars semble donner de meilleurs résultats lorsqu'une même polarisation est utilisée pour deux fréquences (Pope *et al.*, 1994; Ranson et Sun, 1997) à condition que les deux fréquences aient été acquises simultanément pour éviter les effets de la décorrélation temporelle.

Les indices de végétation rehaussent la structure des diverses physionomies végétales mais normalisent l'information radiométrique qui est également importante de conserver. Une comparaison intéressante entre les paramètres de Pope et les canaux de polarisation HH, HV et VV est donnée dans Noernberg *et al.*, (1999) et les auteurs montrent leur complémentarité.

La séparabilité entre diverses classes de milieux humides de la tourbière de la Mer Bleue (Ottawa) a été étudiée dans Baghdadi *et al.* (2001) basée sur les canaux de polarisation HH, HV et VV pour trois images Convair-580 (bande C) acquises la même année (Tableau 6.2-4). Les résultats présentés montrent qu'une polarisation/image n'est pas suffisante pour assurer une bonne séparabilité des diverses classes. En second lieu, les forêts sur substrat sec et les bogs arborés ne sont pas séparables en juin et juillet de même qu'il existe beaucoup de confusion entre les bogs arborés et les clairières. Autre fait important, c'est le canal croisé qui assure la séparabilité entre les bogs ouverts et les bogs arborés de même qu'entre les bogs arborés et les clairières d'où l'importance d'obtenir un excellent rapport signal sur bruit pour HV et VH.

	June			July			October		
	HH	Cross	VV	HH	Cross	VV	HH	Cross	VV
Forest/Nonforested bog	0.94	3.03	0.86	1.33	2.65	1.13	1.50	3.48	1.26
Forest/Forested bog	0.67	0.79	0.82	1.01	1.43	1.13	1.03	2.20	1.16
Forest/Marsh	1.63	0.01	0.59	1.48	0.32	0.43	1.72	0.16	0.59
Forest/Open water	2.61	4.03	3.62	3.50	3.31	2.38	2.77	4.07	2.45
Forest/Clearing	1.25	2.16	2.16	1.92	2.00	1.77	1.53	2.52	1.49
Nonforested bog/Forested bog	0.55	2.27	0.31	0.64	3.00	0.26	0.73	2.68	0.31
Nonforested bog/Marsh	2.55	2.15	1.71	2.94	1.92	0.85	2.78	3.03	2.29
Nonforested bog/Open water	3.00	3.51	2.83	3.41	3.79	2.76	3.33	2.73	3.38
Nonforested bog/Clearing	0.44	1.37	1.42	0.66	1.79	1.19	0.08	2.14	0.58
Forested bog/Marsh	2.44	0.64	1.90	2.75	0.86	0.81	2.52	2.03	2.20
Forested bog/Open water	4.43	3.46	5.81	5.11	5.32	4.70	3.44	4.43	4.20
Forested bog/Clearing	1.10	1.34	2.63	1.57	1.23	1.96	0.8	0.58	0.91
Marsh/Open water	3.64	2.77	5.33	4.90	2.50	2.75	3.34	3.47	3.78
Marsh/Clearing	2.78	1.60	3.58	3.56	1.36	1.76	2.79	2.29	2.53
Open water/Clearing	2.90	3.76	2.17	4.02	4.57	2.03	3.25	4.04	2.36

Note :

$$S_{i,j} = \frac{|\mu_i - \mu_j|}{s_i + s_j}$$

 μ =moyenne s =écart-type* $S_{i,j} < 0.8$ = mauvaise

séparabilité

* $0.8 < S_{i,j} < 1.5$ =

séparabilité moyenne

* $S_{i,j} > 1.5$ > séparabilité

complète

Note 1 : *Nonforested bog* = synonyme de Bog ouvert ou de Bog à arbrisseaux (*shrub bog*)Note 2 : *Forested bog* = Bog arboré ou encore bog forestier (*reed bog*)

Tableau 6.2-4 : Indice de séparabilité pour quelques classes de tourbière

Source : Baghdadi et al., (2001), p.81, table 3.

Baghdadi et al., (2001) rapportent une précision globale de 73%, 73% et 86% pour les images de juin, juillet et octobre respectivement en utilisant les trois polarisations. Les auteurs rapportent des résultats inférieurs de 10 à 30% lorsqu'une seule polarisation est utilisée pour une seule image.

6.3. Études avec les données polarimétriques

6.3.1. Hydrologie

Il n'existe pas beaucoup d'études ayant utilisé la phase polarimétrique¹⁴ pour la caractérisation de l'hydrologie des milieux humides. La végétation émergente sur le pourtour des plans d'eau complique la délimitation du périmètre d'inondation et mène souvent à une sous-estimation du niveau d'eau et par extension du volume d'eau dans un réservoir (Figure 6.3-1). Cela est attribuable aux conditions mixtes de taille et de densité de la végétation émergente qui produisent une grande diversité de rétrodiffusion radar. Il est donc nécessaire d'utiliser à la fois l'amplitude et la phase pour faire face à cette diversité. Horritt et al. (2003) mentionnent que l'amplitude et la phase sont nécessaires pour améliorer la cartographie de la végétation émergente et par extension de la position du rivage et ainsi du niveau d'eau.

¹⁴ C.-à-d. la différence de phase HH-VV, la différence de phase circulaire RR-LL ou la différence de phase d'une base quelconque. La différence de phase entre deux images (l'interférométrie) n'est pas ici concernée.

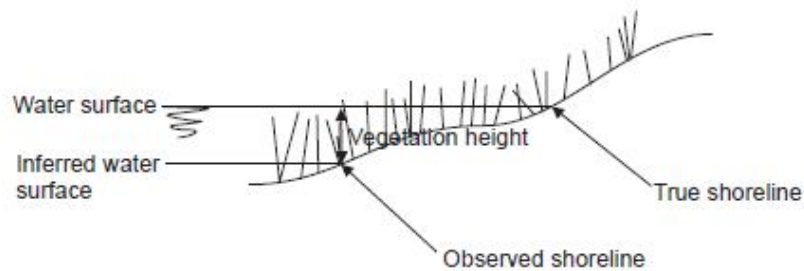


Figure 6.3-1 : L'effet de la végétation sur l'estimation du niveau d'eau

Source : Horritt et *al.* (2003)

La caractérisation de l'hydrologie des tourbières profiterait de l'utilisation de la phase issue d'une décomposition polarimétrique puisque cette dernière semble plus sensible aux propriétés du sous-sol à une profondeur importante que l'intensité du signal (Lasne et *al.*, 2003, Touzi et *al.*, 2007; 2009, Touzi et Gosselin, 2010). Tel que mentionné, ce sujet sera traité en détail dans la partie V de la thèse. Il apparaît important pour ce type d'application d'utiliser une plus grande longueur d'onde (bande L) pour favoriser une plus grande profondeur de pénétration du signal sous la surface (Touzi et Gosselin, 2010). Cependant la résolution spatiale du capteur est également importante, comme l'a souligné Racine et *al.* (2005), puisque l'humidité volumétrique de la tourbe peut être fortement variable sur de faibles distances. La fine résolution spatiale du capteur Convoir-580 pourrait expliquer la bonne séparabilité obtenue entre les bogs et les fens herbacés avec la phase polarimétrique pour le site de la Mer Bleue (Touzi et *al.*, 2007) malgré l'utilisation de la bande C.

6.3.2. Écologie

Plusieurs études comparent la multipolarisation et les paramètres issus d'une décomposition polarimétrique quant à leur apport respectif à l'identification des occupations du sol. Les résultats présentés dans Lee et *al.*, (2001) montrent clairement que la polarimétrie radar, incluant la phase, apporte toujours une amélioration de la classification par rapport à l'utilisation des canaux de polarisation HH, HV et VV en puissance. Cette amélioration est parfois marginale pour certaines "classes simples" comme les sols dénudés, l'eau où les classes comportant une forte proportion de rétrodiffusion volumique. La polarimétrie radar montre cependant son plein potentiel pour les classes où plus d'un mécanisme de rétrodiffusion est présent, généralement un mécanisme associé à la structure de la plante et une

autre à celui du substrat. Le même type d'analyses avec les mêmes données a été repris dans Ainsworth et *al.*, (2009) en incluant les modes de polarimétrie compacte $\pi/4$ (Souyris et *al.*, 2005) et CTRL (transmission circulaire et réception linéaire, Raney, 2007). Les résultats de la classification supervisée par maximum de vraisemblance (basé sur la distribution de Wishart) ont montré que la polarimétrie n'a offert qu'une performance globale légèrement supérieure par rapport à la polarimétrie compacte en bande L (quadpol= 81.8%, $\pi/4$ =80.9% et CTRL=73.6%).

Si une classification pour un milieu donné s'en tient à des classes générales (sol dénudé, eau, forêt, bâtiments), ou encore à des classes possédant une forte composante volumique, l'apport de la polarimétrie peut être marginal par rapport à la multi-polarisation ou aux modes de polarimétrie compacte. C'est surtout pour les milieux hétérogènes ou les mécanismes de diffusion se superposent sans que le signal ne soit saturé (et fortement dépolarisé) que la polarimétrie offrira les meilleurs rendements. Cette observation rejoint le concept du gradient de végétation du centre à la bordure des tourbières mentionné dans Bernier et *al.* (2003), dans Toyra et *al.*, (2001) ainsi que dans Augusteijn et Warrender (1998). Par exemple, si les tourbières ouvertes (rétrodiffusion de surface) et les forêts sur substrat sec (rétrodiffusion volumique) sont faciles à classer, la zone de transition (tourbière boisée) constituée de diverses classes de densité/hauteur l'est beaucoup moins et constitue la principale source d'erreur.

Le rassemblement des types de végétation en classes physionomiques (structurales) a été exploré pour la classification des pâturages en Australie dans Hill et *al.* (2005). Dans cette étude la structure a surtout été étudiée du point de vue de la contribution de la canopée à la rétrodiffusion totale pour 15 classes de prairies identifiées basée sur les paramètres de Freeman et trois fréquences (C, L et P). Les auteurs mentionnent que le principal apport des images optiques (Landsat) repose sur l'identification des zones couvertes de végétation verte¹⁵ alors que l'apport des images radars a été l'identification des classes de hauteur dans les formations herbacées et la discrimination entre les milieux agricoles et les formations herbacées des prairies naturelles. De plus, l'hétérogénéité des prairies naturelles rend les

¹⁵ Une très faible quantité de biomasse est détectable avec Landsat,

classes de hauteur, de structure et de densité plus utiles que les classes basées sur le type de végétation.

En dehors d'un cadre purement théorique, peu d'études se sont penchées sur la comparaison de l'apport des différentes techniques de décomposition (voir chapitre 3) sur le milieu à caractériser. Un exemple d'une telle étude est offert dans Alberga et *al.* (2008) pour les milieux urbains et dans McNairn et *al.*, (2009) pour les milieux agricoles. En général, la tendance consiste plutôt à utiliser des paramètres issus de plusieurs techniques de décomposition et laisser au classificateur (SVM, arbre hiérarchique...) la tâche de sélectionner les meilleurs paramètres (Lardeux et *al.*, 2009; Zou et *al.*, 2010).

La décomposition de Touzi (Touzi, 2007a) appliquée à de données polarimétriques provenant du RSO aéroporté CONVAIR (bande C) a montré des résultats prometteurs pour la caractérisation de diverses classes de milieux humides (marécages, marais, fen herbacé, bog à arbrisseau, et bog boisé) et milieux secs (Forêt et agriculture). Il a été montré (Touzi 2007a, Touzi et *al.*, 2009) que le type de rétrodiffusion (α_{s1}) et sa phase ($\Phi_{\alpha s1}$) sont nécessaires pour une bonne caractérisation des milieux humides de la tourbière de la Mer Bleue près d'Ottawa (45°24'21"N, 75°29'37"W). La phase $\Phi_{\alpha s1}$ s'est révélée être l'élément clé dans la distinction entre les fens herbacés pauvres et les Bogs à arbrisseaux (*shrub bog*), notamment par la capacité de la phase à détecter la présence d'eau sous la surface. Cette observation a été confirmée dans Touzi et Gosselin (2010) pour la tourbière de la Baie des Mines (46°22'30"N, 72°42'53"W), un des sites à l'étude dans notre recherche (voir partie III). En ce qui concerne la structure, la seconde hélicité (τ_2) s'est montrée importante dans Touzi et *al.* (2009) pour la discrimination entre les tourbières à arbrisseaux et tourbières boisées avec, en plus, une sensibilité à la présence ou non d'aiguilles dans les peuplements de mélèzes. La capacité du type de rétrodiffusion dominant (α_{s1}), de la phase $\Phi_{\alpha s1}$, de l'amplitude maximale (m_1) et de la première valeur propre (λ_{1N}) pour une caractérisation détaillée des mécanismes de rétrodiffusion présents dans les marais à Typha a aussi été démontré dans Touzi et *al.* (2009). Cette caractérisation de la tourbière de la Mer Bleue basée sur les paramètres de la décomposition de Touzi représente une amélioration évidente des résultats par rapport à ceux obtenus par Baghdadi et *al.* (2001) pour le même lieu et le même jeu de données (Tableau 6.2-4).

CHAPITRE 7

7. NOTIONS DE PHYSIONOMIE VÉGÉTALE

Le chapitre précédent a montré que l'analyse automatisée des images de télédétection et des images radar en particulier n'aboutit pas la plupart de temps à des résultats probants en ce qui a trait à la délimitation exacte des milieux humides (les tourbières en particulier) et à leur classification selon la typologie traditionnelle : fens, bogs, marais, etc. La question qui s'est posée dès le début de cette recherche était sous quel angle il fallait aborder ces problèmes de délimitation et de classification automatisée. Guidés par les observations tirées des études précédentes portant sur la modélisation du signal radar provenant des couverts végétaux, ainsi que sur les résultats des études expérimentales avec des données radar, nous avons émis l'hypothèse que les physionomies végétales constituaient l'élément idéal sur lequel baser un inventaire des milieux humides. Avant donc de valider cette hypothèse par nos propres données expérimentales nous avons cru bon dans ce chapitre d'étayer notre raisonnement. Plus particulièrement nous détaillerons la notion de physionomie végétale et nous démontrerons également pourquoi les physionomies végétales constituent l'élément de base pour la classification et le suivi des milieux humides. Le point de départ dans cette discussion sera le système de taxinomie du SCMHQ présenté à la section 5.4 qui fait appel à des critères de taxinomie reconnaissables tout au moins par photo-interprétation.

7.1. Niveaux de perception du SCMHQ et compatibilité avec les données radar

Les cinq premiers niveaux de perception du SCMHQ (Tableau 5.4-1) permettent de distinguer les milieux humides par l'intermédiaire des processus écologiques qui déterminent leur formation et leur évolution : système, habitat, forme, sous-forme et biotope. Chacun de ces niveaux peut être perçu comme un niveau de classification allant du général au particulier dans lequel il est possible d'insérer une classification des types de milieux humides. Les deux premiers niveaux (système et habitat) sont trop généraux pour permettre une classification intéressante des milieux humides en plus d'être faiblement liés à des caractéristiques du milieu mesurables par les radars. Les troisième et quatrième niveaux de perception (forme et sous-

forme) sont représentables à des échelles cartographiques situées entre 1: 5000 et 1: 20 000 ce qui est compatible avec la résolution spatiale des données radar utilisées dans cette recherche d'une dizaine de mètres. Par contre, chaque sous-forme (et forme) correspond à un assemblage plus ou moins hétéroclite de biotopes si bien qu'ils ne peuvent être correctement classifiés que si les biotopes sont à leur tour correctement identifiés.

Les biotopes, qui représentent le 5^e niveau de perception selon le SCMHCQ, appelés structures par Rydin et Jeglum (2006), ou microforme par Ivanov (1981) ou encore habitat par Gauthier (2001), représentent l'influence de la topographie locale (Rydin et Jeglum, 2006) sur le type de végétation que l'on y retrouve. Ils sont également associés à des facteurs d'humidité qui contrôlent le type de végétation selon divers gradients de végétation. Les biotopes occupent une aire géographique relativement restreinte et un biotope particulier est soumis à des conditions édaphiques relativement constantes ou cycliques (Gauthier, 2001).

À titre d'exemple, il existe quelques biotopes de base (mare, lanière, platière, butte, plateau, talus, dépression...) dont l'assemblage et l'alternance (c.-à-d. le patron spatial) permettent de définir différentes sous-formes et formes des tourbières (Figure 5.4-5). Le profil topographique de la Figure 7.1-1 donne un exemple des divers biotopes et des physionomies de végétation associées.

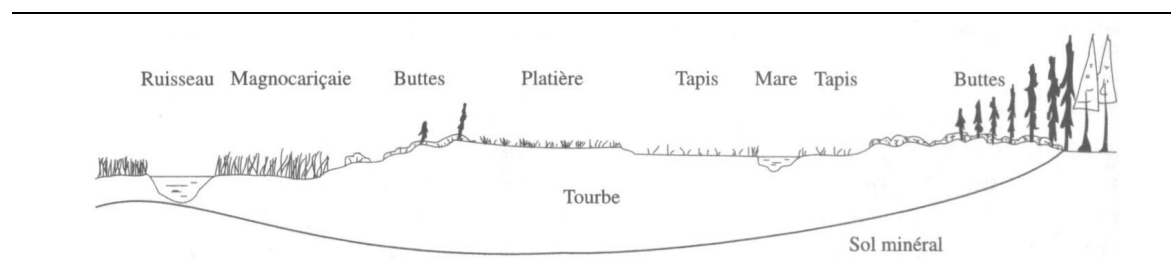


Figure 7.1-1 : Représentation des divers biotopes d'une tourbière

Source : Gauthier (2001), fig.3.6, p.108

La butte est un biotope surélevé qui correspond à un monticule de tourbe s'élevant généralement à 20 ou 30 cm ou davantage au-dessus de la partie basse (dépression) de la tourbière. La platière humide consiste en une surface de végétation uniforme et plate qui entoure les mares d'eau libre. Le tapis est un biotope plat et mouillé situé dans une mare de tourbière ou à sa périphérie. La nappe phréatique atteint le niveau du *capitulum* des mousses et

est visible autour des tiges de mousses. Finalement, la magnocariçaie est une formation herbeuse dominée par les *Carex* de grande taille.

Les biotopes pourraient offrir une approche intéressante à la classification des milieux humides par radar si c'est possible de combiner la reconnaissance des physionomies végétales, avec la détection de l'état de l'humidité ainsi que la perception de la troisième dimension. Par exemple, comment différencier une platière d'un tapis si ce n'est que par la reconnaissance des physionomies végétales qui leur sont associées (Figure 7.1-1) ou comment identifier facilement les butes sans la perception de la troisième dimension. Avec des images monoscopiques, leur reconnaissance n'est possible que dans des cas spécifiques comme les tourbières structurées. En effet, certains biotopes comme les mares et autres surfaces d'eau libre seront facilement identifiables qu'importe le type de capteur utilisé pour peu que la résolution spatiale soit suffisante. L'alternance entre les surfaces d'eau libre et les différents biotopes (qu'importe leur nature) a conduit certains auteurs (Racine et *al.*, 2005; Demers, 2005) à utiliser la texture pour classifier les types de tourbières sur des images radar (chapitre 6). Par contre, ni les bogs ni les fens ne possèdent l'exclusivité d'un biotope ou d'une morphologie en particulier et une classification basée sur ce critère ne peut avoir qu'une portée régionale¹⁶.

Compte tenu des caractéristiques des images radar (influence de la structure du couvert végétal plutôt que des espèces, humidité), il est évident que les physionomies végétales constituent un angle privilégié pour aborder le problème de la classification des milieux humides. De plus, l'échelle de perception des physionomies végétale (6^e niveau du SCHMQ) est compatible avec la résolution spatiale des images RSOPOL (Tableau 5.4-1). Il y a une autre raison pourquoi les physionomies végétales constituent selon nous l'élément de base dans le cas de données radar, ce sont les opérations de suivi de l'état des milieux humides.

Le biotope est caractéristique de la somme des équilibres à l'échelle locale (conditions édaphiques, nutriments, physionomies végétales) (Figure 7.1-2). Une rupture de cet équilibre entraînera une modification du biotope puis à moyen ou long terme une modification de la

¹⁶ C'est-à-dire que, si pour une région donnée, les fens et les bogs se caractérisent par des morphologies qui diffèrent.

sous-forme et de la forme du milieu humide. Le suivi des milieux humides implique la détection des changements qui ne se traduisent nécessairement pas par une modification abrupte du type ou sous-type de milieu humide. À moins d'une modification brusque des conditions environnementales, les changements sont graduels et correspondent à une échelle temporelle beaucoup plus longue¹⁷ que les cycles de 2 à 5 ans demandés pour la mise à jour des inventaires tel que mentionné en introduction. À moins d'un changement catastrophique (brusque), un ajustement du type de physionomie végétale à une modification de l'équilibre local se fera à une échelle temporelle plus courte que celle du biotope, donc plus propice au suivi.

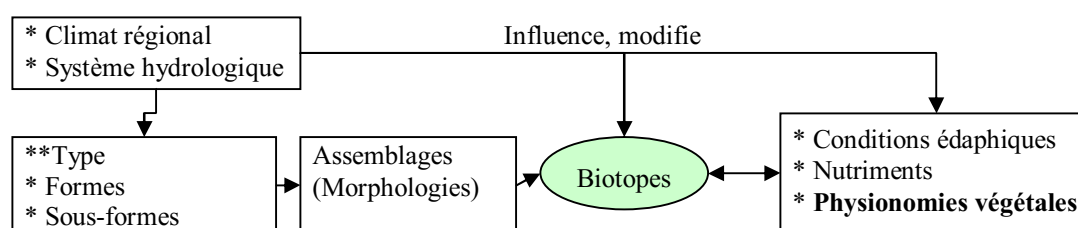


Figure 7.1-2 : Relations entre le climat régional, les biotopes et la physionomie végétale

Cette position centrale des physionomies végétales comme élément représentatif des équilibres dans un milieu humide est soulignée dans Jeglum et al. (1974) “*Physiographic features of wetlands are complex and subtle, and it is often difficult to devise physiographic gradients which define wetland types. Since the physiognomy and dominance patterns of vegetation express the resultant of all the transactions within a wetland ecosystem, we have used these vegetation patterns to define wetland types. Having defined our wetland types in this manner, we can add physiographic relationships, insofar as they are understood, to the wetland types as descriptive adjuncts* (Jeglum et al., 1974)”.

7.2. Stratification horizontale et verticale des physionomies végétales

Les figures Figure 5.4-1 à Figure 5.4-5 ont donné un aperçu des diverses physionomies végétales des milieux humides. Il convient maintenant de préciser ce qu’est une physionomie

¹⁷ Par exemple, suite à l’accumulation du dépôt de tourbe, plusieurs fens se transforment en bog. Cette succession dynamique fait en sorte que les fens sont aujourd’hui relativement rares dans le Québec méridional, notamment dans les Basses Terres du Saint-Laurent ou du lac Saint-Jean (Buteau et al., 1994). De nombreux bogs ont d’abord été des fens (NWWG, 1997). On consultera également Tornocai et Stolbovoy (2006) pour une explication plus générale des grandes transitions entre fens et bogs.

végétale et d'établir une classification compatible avec les images radars. La physionomie caractérise la structure de la végétation et non l'espèce (Senterre, 2005, p.71). Par structure on entend : la taille et le diamètre des constituantes de la plante (tige, branche, tronc...); les dimensions et la forme des feuilles; l'angle auquel les constituantes de la plante se raccordent (c.-à-d. l'architecture); la biomasse totale; le rapport entre la biomasse totale et la biomasse foliaire; l'absence ou la présence de feuilles, etc. Il faut aussi tenir compte des facteurs qui modifient la relation entre la physionomie et le signal radar comme l'humidité des constituantes de la plante, celle du substrat et la densité de recouvrement du sol par une physionomie en particulier, la mixité entre les physionomies et le niveau de l'eau pour les marais et marécages. On suppose ici que les mesures polarimétriques sont sensibles à la physionomie espèces végétales des milieux humides. Dans un contexte opérationnel de suivi (*monitoring*) et de classification, il est important de connaître quelles sont les physionomies de base qu'il est possible de reconnaître avec un fort taux de succès. Ce n'est qu'après cette étape que l'on pourra utiliser les physionomies pour reconstituer, au besoin, les classes (types et sous-types) de milieux humides.

Les physionomies végétales proposées dans cette thèse tirent leur origine du concept de «strate végétale», ou «étagement vertical», formalisées dans Oldeman (1974). On retrouve les strates hypogées (flore souterraine), cryptogamiques (lichen et mousses), herbacée, arbustive et arborescente (Gilet, 2000). Ces strates peuvent ensuite être décomposées en sous-strates selon les valeurs présentées au Tableau 7.2-1. Les valeurs présentées dans ce tableau, tiré de Gilet (2000), n'ont, comme le rappelle l'auteur, qu'une valeur indicative. Ces classes constituent néanmoins un bon point de départ pour une catégorisation par physionomies de la végétation des milieux humides.

La strate correspond avant tout à une classe de hauteur, mais il est évident qu'une même strate peut contenir des végétaux ayant des caractéristiques différenciables par les données radars. La classe herbacée haute, par exemple, peut contenir à la fois des roseaux (*Phalaris arundinacea*) et du scirpe (*Scirpus sp.*) qui par le diamètre de leur tige et la présence ou non d'une importante biomasse foliaire produiront une rétrodiffusion différente. Tout en préservant le mieux possible la nomenclature établie, la classe physiologique correspondra avant tout à une collection d'espèces végétales partageant une même structure, *c'est-à-dire un même arrangement* [architecture] *dans l'espace de ses composantes* (Senterre, 2005, p.74). On

retrouve dans la littérature quelques études ayant exploité la notion d'architecture pour la classification des milieux humides basée sur l'imagerie radar (Noernberg et *al.*, 1999, Parmuchi et *al.*, 2002,) et naturels (Dobson et *al.*, 1995a; Pierce et *al.*, 1998).

Strates et sous-strates (ensemble structurel)	symbole	Hauteur optimale indicative	Hauteur minimale indicative	Hauteur maximale indicative
Arborescente haute	A	25m	18m	35m
Arborescente basse	a	14m	8m	18m
Arbustive haute	B	4m	2m	8m
Arbustive basse	b	1m	0.5m	2m
Herbacée haute	H	50cm	30cm	100cm
Herbacée basse	h	10cm	2cm	30cm
Muscinale haute	M	20mm	10mm	40mm
Muscinale basse	m	5mm	2mm	10mm

Tableau 7.2-1 : Physiologies végétales basées sur la notion de strates végétales

Source : Gilet (2000), p.13

La stratification verticale n'est qu'un aspect de la physiologie végétale à laquelle il faut ajouter celui de la stratification horizontale c'est-à-dire l'homogénéité des classes physiologiques selon une unité d'aire donnée (m^2 , km^2 , ha...). Le pourcentage de recouvrement du sol par une physiologie donnée fait également partie de la notion de stratification verticale. Si l'utilisation de la physiologie végétale comme élément de base du suivi et de la classification des milieux humides est prometteuse, les défis liés à l'effet la stratification horizontale sur le signal doivent également être considérés. Ce type d'information n'est pas disponible sur les cartographies conventionnelles à l'exception de la cartographie écoforestière du Québec (20K) produite par le ministère des ressources naturelles du Québec. Cette carte représente les peuplements forestiers en plus de 30 classes de densité/hauteur (A : 80 à 100% de couverture, B : 60 à 80%, C : 40 à 60% et D : 25 à 40%).

Il n'existe pas une définition exacte de ce qu'est un arbrisseau, un arbuste ou un arbre. La ramification est le critère le plus souvent évoqué pour établir la distinction entre arbrisseaux et arbustes. La hauteur est une autre variable qui permet de distinguer entre ces physiologies, mais encore il n'y a pas de consensus sur les valeurs exactes. Pour Farrar (1997) un arbuste est une plante ligneuse qui ne dépasse pas 4.5 m de hauteur alors qu'Hubert (2009) établit cette limite à 7 m :

- i. **Un arbre** est une grande plante ligneuse vivace dont la tige principale, ou tronc, ne se ramifie en branches qu'à partir d'une certaine hauteur. Il est composé de racines, d'un tronc qui se ramifie en branches, qui elles-mêmes se ramifient et donnent des feuilles;
- ii. **Un arbuste** est un végétal ligneux dont la tige n'est pas ramifiée dès la base et dont la hauteur ne dépasse pas 7m. Il a la même composition que l'arbre;
- iii. **Un arbrisseau** est un végétal ligneux dont la tige est ramifiée dès la base. Il ne s'élève qu'à une faible hauteur (1 à 4m). Il a aussi la même composition que l'arbre mis à part le tronc.

Le NWWG propose également quelques définitions des physionomies végétales soit :

BOISÉ

Dominé par des espèces de plus de 5 m de hauteur.

ARBUSTIF

- *Arbustif bas* — comprend à la fois de petits arbustes (0,1 à 0,5 m) et des arbustes nains (moins de 0,1 m).
- *Arbustif mixte* — comprend de grands arbustes (plus de 1,5 m), des arbustes moyens (0,5 à 1,5 m), et de petits arbustes (0,1 à 0,5 m).
- *Arbustif haut* — comprend à la fois de grands arbustes (plus de 1,5 m) et des arbustes moyens (0,5 à 1,5 m).

Les arbres rabougris peuvent aussi être compris.

GRAMINOÏDE

Dominé par des plantes herbacées indifférenciées. Les types particuliers de terre humide graminéoïde sont :

- *Graminés* — dominé par des collectivités d'espèces graminées basses, hautes ou mixtes (p. ex. *Zizania*)
- *Petits joncs* — dominé par des collectivités de *Juncus* et de *Triglochin*
- *Roseaux* — dominé par des collectivités d'espèces de roseaux (p. ex. *Phragmites*)
- *Carex* — dominé par des collectivités de *Carex* (*Carex* et *Eriophorum*)
- *Grands joncs* — dominé par des collectivités de *Scirpus* et de *Typha*

LATIFOLIÉS

Ce type de terre humide est dominé par des espèces latifoliées qui comprennent toutes les plantes herbacées non graminéoïdes.

LICHENS

Dominé par des espèces de lichens (surtout *Cladina* et *Cladonia*).

MOUSSES

Dominé par des espèces de mousses. Les mousses les plus communes sont *Sphagnum*, les mousses hypnacées (*Pleurozium*, *Hylocomnium* et *Ptilium*) et les mousses brunes (*Drepanocladus*, *Scorpidium* et *Tomenthypnum*).

DÉNUDÉ

Dénudées, avec moins de 5 p. 100 de la surface recouverte de végétation.

AQUATIQUE

Dominé par des macrophytes aquatiques. Les types particuliers de terre humide aquatique sont :

- *Aquatique flottant* — dominé par des macrophytes aquatiques avec feuilles flottant à la surface de l'eau.
 - *Aquatique submergé* — dominé par des macrophytes aquatiques entièrement submergés sous la surface de l'eau
-

Tableau 7.2-2 : Types de physionomies proposées par le NWWG (1997)

Source : NWWG (1997), p.60

7.3. Arrimage entre le SCHMQ et les physionomies végétales

Une description générale des physionomies végétales a été offerte aux sections 7.1 et 7.2 avec une emphase sur la notion de stratification pour laquelle la hauteur des physionomies est un paramètre clé. De cette description a émergé quelques grandes classes physiologiques (Tableau 7.2-1) correspondant pour la plupart à celles énumérées aux figures 5.4-1 à 5.4-5 dans le cadre du SCHMQ (c.-à-d., dénudée, herbacé, arbustif, arboré, muscinale, lichen et herbier flottant). Cependant, l'un des défis posés par cette thèse consiste au fait que : 1) il n'existe pas de système standard énumérant l'ensemble possible des classes de physiologies végétales avec des caractéristiques précises quant à leur structure et ; 2) qu'il n'existe pas, à la connaissance de l'auteur, de vérité terrain exprimé en termes de physiologies végétales.

Dans un premier temps, il sera donc nécessaire de créer à la fois un système de classes physiologiques et une vérité terrain en fonction des données disponibles et ce indépendamment des données polarimétriques utilisées dans cette thèse. La classification des milieux humides du centre Saint-Laurent (CSL), la base de données des cultures assurées du Québec (BDCA) et la carte écoforestière du Québec (SIEF) seront utilisées à cette fin (sections 9.2 et 9.3). Finalement, pour tirer parti des connaissances théoriques acquises au chapitre 3 et celles de la revue de littérature du chapitre 6, il a été décidé de bonifier les classes physiologiques du SCHMQ par la création de sous-classes physiologiques. Ce processus est également décrit au chapitre 9 et à l'annexe 1.

PARTIE III : CADRE DE LA RECHERCHE

Le but de cette partie est de présenter l'approche méthodologique suivie afin d'atteindre les objectifs de notre recherche. Cette approche est décrite au chapitre 8 avec un aperçu des sites à l'étude, des données utilisées ainsi que des analyses effectuées pour conclure sur le potentiel des paramètres de la décomposition de Touzi pour différencier les physionomies végétales des milieux humides étudiés. Le dernier chapitre de cette partie (chapitre 9) présente les caractéristiques des principales physionomies végétales rencontrées dans nos sites à l'étude ainsi les étapes de développement d'une base de données sur les physionomies végétales sur laquelle reposent les différentes analyses présentées dans les parties IV à VI.

CHAPITRE 8

8. APPROCHE METHODOLOGIQUE

8.1. Aperçu général

La méthodologie suivie dans cette recherche est présentée sous forme d'organigramme à la Figure 8.1-1. Comme nous l'avons mentionné en introduction, la région du Lac Saint-Pierre est notre site à l'étude. À l'intérieur de cette région, nous avons choisi le secteur de la Baie des mines pour évaluer l'apport des paramètres polarimétriques dans la caractérisation des tourbières ainsi que le secteur des îles de Sorel pour la caractérisation des bas et hauts marais ainsi que des marécages. La description générale du site d'étude est donnée dans la section 8.2 tandis que la description détaillée des deux secteurs choisis et de leur couvert végétal sera présentée au chapitre 9 où il sera question de l'établissement d'une base de données sur les physiologies végétales de ces deux secteurs.

Pour ces deux secteurs à l'étude, des séries de données polarimétriques provenant des RSO des satellites ALOS et RADARSAT-2 (RS2) ont été choisies. La description de ces données et de leurs prétraitements est présentée dans la section 8.3. D'autres séries de données incluant des images Landsat, des cartes forestières et des données environnementales (niveaux d'eau du Saint-Laurent, données météorologiques) ont servi pour l'établissement de la base de données sur les physiologies végétales (chapitre 9) et en général comme données de support aux diverses analyses. Une description sommaire de ces données de support est présentée à la section 8.4.

Après application des décompositions polarimétriques, la série de paramètres polarimétriques générée a été moyennée par objet de la base de données, chaque objet représentant une aire occupée par une classe physiologique en particulier. Les objets ont été identifiés par interprétation de données de support. Les paramètres polarimétriques moyennés ont servi dans un premier temps aux analyses de leur sensibilité aux caractéristiques particulières de chaque type physiologique (structure, état de la végétation, types et conditions du substrat). Dans le

cas des données RS2 ces analyses ont aussi porté sur la sensibilité des paramètres polarimétriques aux variations phénologiques des couverts végétaux durant la période de croissance-sénescence. Ces analyses ont servi comme base pour mieux interpréter les résultats des analyses de séparabilité des classes physiologiques des milieux humides entre elles et par rapport à des physiologies végétales similaires en milieu sec. Pour les données RS2, puisque le nombre et les dates d'acquisitions le permettaient, des algorithmes de classification d'« images » multitemporelles des paramètres polarimétriques couvrant le secteur des îles de Sorel ont été appliqués.

Les analyses de séparabilité et les classifications visaient à évaluer l'apport réel des paramètres polarimétriques à l'identification automatique des milieux humides dans un territoire donné ainsi que de leur typologie en fonction des physiologies végétales. Dans toutes ces analyses, l'accent a été mis sur les paramètres de décomposition de Touzi, le sujet principal de cette recherche. Les paramètres polarimétriques issus d'autres décompositions ainsi que les paramètres standards (coefficients de rétrodiffusion, différence de phase entre polarisations parallèles) utilisés pour l'inventaire et la cartographie de la végétation en général n'ont servi qu'à titre de comparaison. Dans la section 8.5 nous présenterons certains détails sur les techniques et algorithmes utilisés pour étudier la séparabilité des classes physiologiques ainsi que sur les algorithmes de classification. Les analyses et les principaux résultats obtenus font l'objet des chapitres 9 à 14. Pour des questions de clarté les analyses effectuées à partir des données ALOS sont regroupées dans la partie IV de la thèse (chapitres 10 et 11) tandis que celles concernant les données RS2, dans la partie V de la thèse (chapitres 12 à 14).

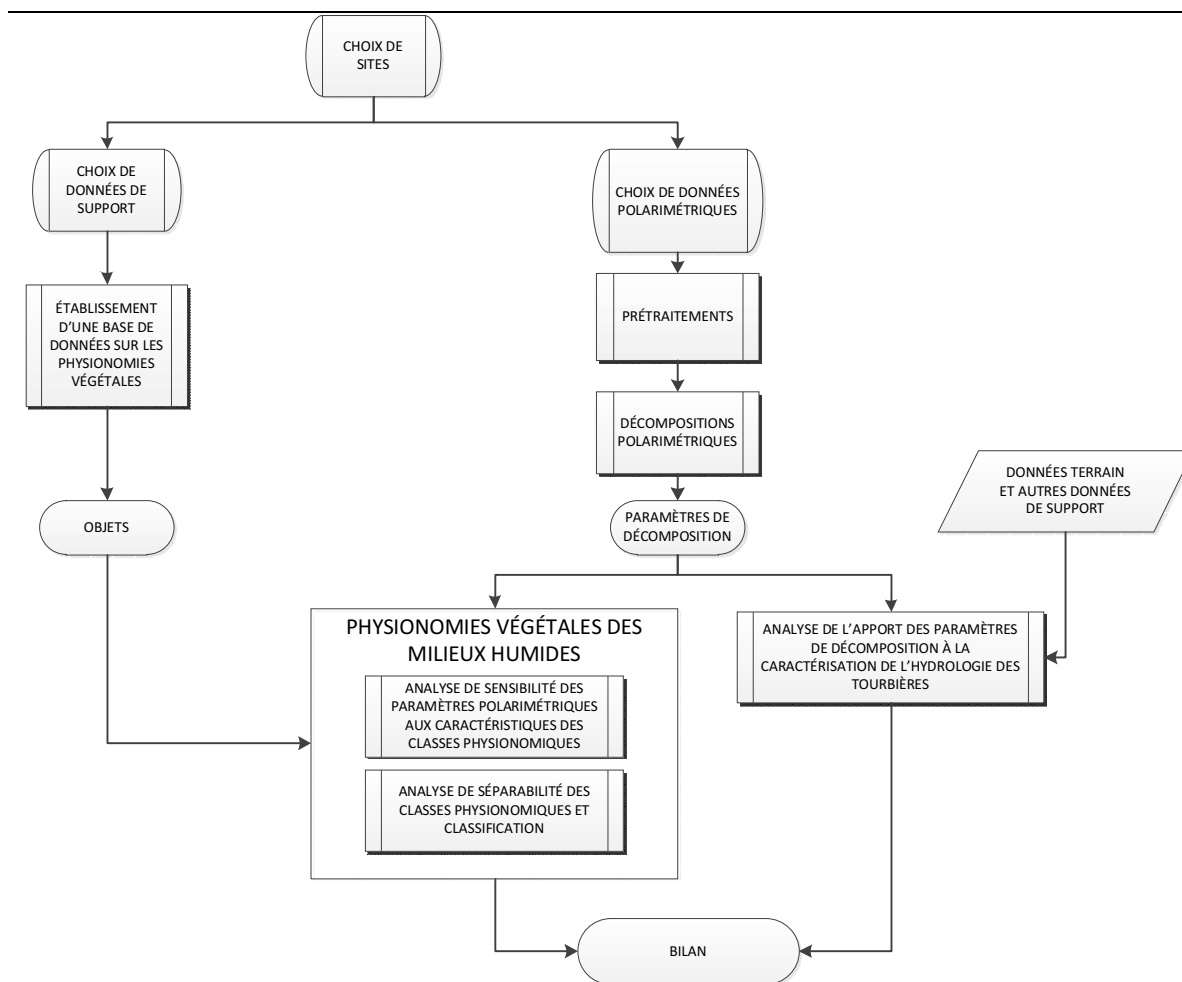


Figure 8.1-1 : Approche méthodologique

Dans une étude publiée récemment (Touzi et Gosselin, 2010) nous avons constaté que certains paramètres de la décomposition de Touzi pratiquée sur des données ALOS, en particulier la phase polarimétrique, apportaient de l'information sur le niveau d'eau sous la surface des tourbières ouvertes. Nous avons ainsi décidé dans le cadre de cette recherche de revoir ces analyses avec les données ALOS et de les étendre dans le cas des données RS2. Des données recueillies au sol ainsi que d'autres données (images optiques, cartes) ont été utilisées pour supporter ces analyses. La partie VI de la thèse est consacrée au sujet de la caractérisation de l'hydrologie des tourbières ainsi qu'aux résultats de nos analyses avec les paramètres polarimétriques (chapitres 15 et 16).

8.2. La région du Lac Saint- Pierre

La région du Lac Saint-Pierre (Figure 8.2-1) s'est révélée être un site idéal dans lequel situer notre étude pour les raisons suivantes :

- i. La grande diversité des milieux humides incluant des marais, des marécages riverains, des tourbières boisées et ouvertes;
- ii. La superficie couverte par chacune des catégories des milieux humides compatibles aux résolutions de base des données ALOS (environ 30 m) et RS2 (environ 10 m);
- iii. La proximité et l'abondance des champs agricoles et des forêts sur substrats secs offrant une bonne base de comparaison avec des physionomies équivalentes à celles des milieux humides;
- iv. La disponibilité de données RS2 et ALOS pour cette région;
- v. L'abondance en données auxiliaires pour supporter les analyses.

La région du Lac Saint-Pierre constitue l'une des composantes majeures de l'écosystème du Saint-Laurent et fait partie des basses terres du Saint-Laurent. Le lac Saint-Pierre a reçu en 1998 la désignation de site RAMSAR en vertu de la convention relative aux zones humides d'importance internationale en regard de son exceptionnelle diversité et du caractère unique de son écosystème (RMB, 2010). L'érablière argentée, de plus en plus rare au Québec, est omniprésente dans la région et forme l'association arborescente dominante et on y retrouve la plus importante plaine d'inondation en eau douce au Québec (RMB, 2010). Le lac Saint-Pierre est peu profond (< 4m) à l'exemption d'un chenal de navigation d'une profondeur maximale d'environ 11 m (Vis et *al.*, 2003). Les eaux peu profondes du lac Saint-Pierre, les rivages aux pentes douces et ses eaux riches en nutriments ont favorisé le développement de grandes zones de végétation aquatique émergée et submergée (Vis et *al.*, 2003). Au printemps, les eaux submergent plus de 7000 ha de prairies naturelles, d'arbustes, de forêts riveraines et 4 000 ha de terres cultivées constituant une halte pour plus de 800 000 oiseaux en période de migration printanière. C'est ce qui en fait la plus importante halte migratoire de la sauvagine dans tout l'Est du Canada (RMB, 2010). Au cours des cinquante dernières années, 70 % des marais ont disparu le long du Saint-Laurent et 20 % des marais restants se retrouvent au lac Saint-Pierre, soit une superficie de 8000 ha (RMB, 2010). Les herbiers aquatiques, avec une faune riche, occupent 6200 ha. Les milieux humides du Lac Saint-Pierre comptent 288 espèces d'oiseaux observées, dont 116 considérées comme nicheuses ainsi que 12 espèces d'oiseaux faisant

partie de la liste des oiseaux menacés du Québec (RMB, 2010). On y retrouve également 27 espèces de plantes rares et 79 espèces de poissons, dont 2 figurants sur la liste des espèces menacées (RMB, 2010). Deux secteurs du Lac Saint-Pierre sont nommés réserve de la biosphère et sont protégés en vertu de la Loi : le refuge d’oiseaux migrateurs de Nicolet (3135 ha) et la réserve faunique de la Grande-Île (145ha). Plusieurs zones tampons au statut juridique divers ceignent les zones centrales et demeurent accessibles à des activités compatibles avec les objectifs de conservation (Figure 8.2-1).

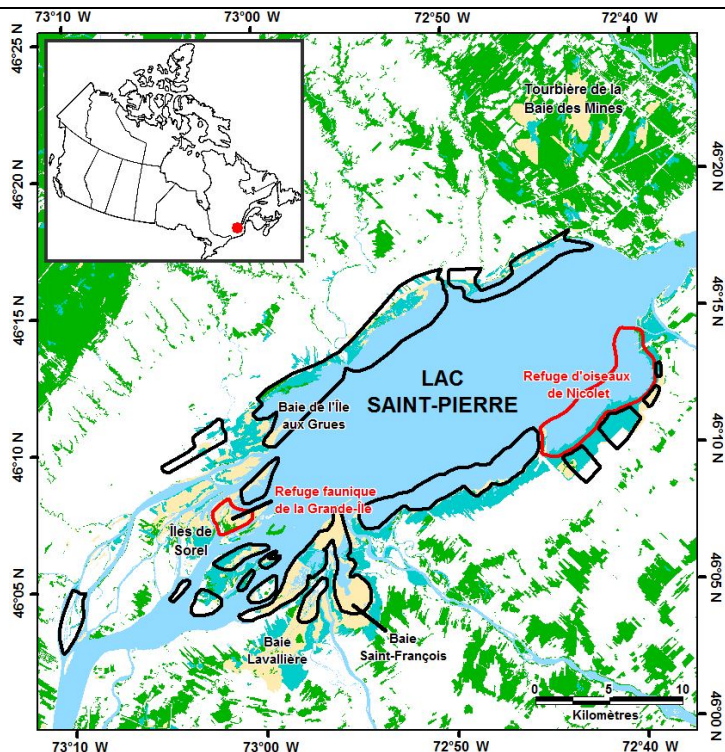


Figure 8.2-1 : La région du Lac Saint-Pierre (contour rouge: zones de conservation; contour noir : zones tampons)

L’estimation de la superficie occupée par les différents types de milieux humides du lac Saint-Pierre varie selon la technique de cartographie utilisée. Selon les données compilées au début des années 90 on y retrouvait 8395 ha de marécages, 4796 ha de prairies humides, 8361 ha de marais et 6217 ha d’herbiers aquatiques (Langlois et *al.*, 1992).

Tel que mentionné, nos analyses ont été effectuées sur deux secteurs, la tourbière de la Baie des Mines et les îles de Sorel. La description détaillée de ces sites est donnée au chapitre 9 où il sera question également des caractéristiques des physionomies végétales.

8.3. Données RSO polarimétriques et prétraitements

La figure 8.3-1 montre la couverture de la région à l'étude par la série de données ALOS et RS2. Les paragraphes qui suivent présentent une description sommaire de ces séries ainsi que de leurs prétraitements.

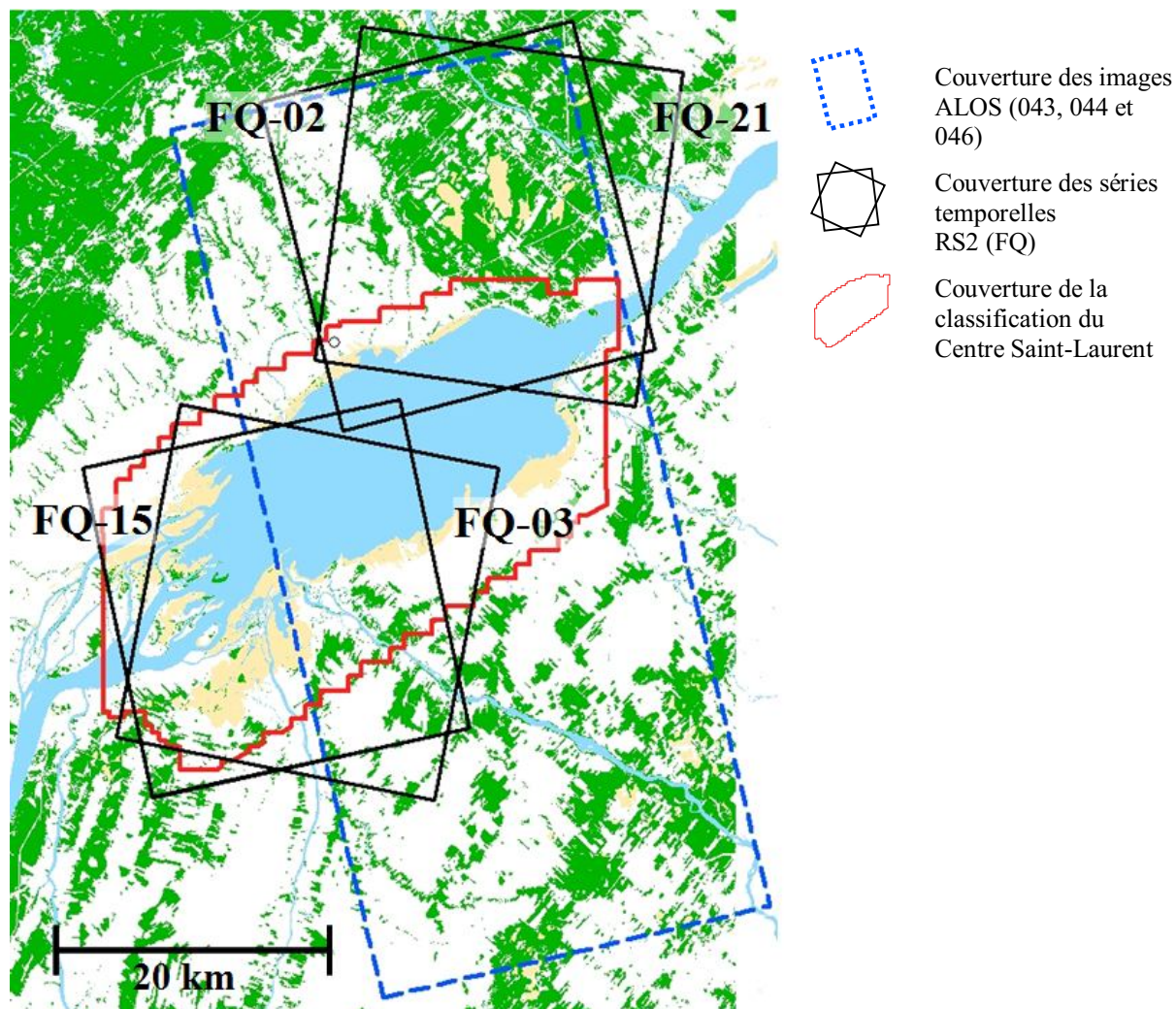


Figure 8.3-1 : Couverture des données RADARSAT-2 (FQ) et ALOS-PALSAR (PLR) des secteurs d'étude ainsi que de la carte des milieux humides établie par le Centre Saint-Laurent

8.3.1. ALOS-PALSAR

L'agence spatiale japonaise (JAXA) qui est responsable du satellite ALOS avait adopté une stratégie d'acquisition des données où chaque capteur à bord de ce satellite (voir chapitre 2) n'opérait que dans une fenêtre temporelle annuelle. Cela fut décidé afin d'optimiser l'acquisition des données selon un compromis entre les besoins des scientifiques, ceux des

utilisateurs ainsi que des contraintes liées à l'opération et à la maintenance du satellite. La fenêtre temporelle assignée au mode polarimétrique était entre mars et mai bien qu'il ait été possible d'obtenir des images en dehors de cette période. Le Tableau 8.3-1 présente les caractéristiques des deux scènes ALOS en mode polarimétrique acquises pour cette étude couvrant le secteur de la tourbière de la Baie des Mines ainsi qu'une portion du secteur des Îles de Sorel (Figure 8.3-1).

Scène	Acquisition aa-mm-jj	Niveau de traitement	Angle d'incidence (deg.)	Résolution spatiale (m), 1 vue	
				azimut	portée
ALOS-043	2006-11-10	1.1	22.7 à 25°	4.5	10
ALOS-046	2007-05-13	1.1	22.7 à 25°	4.5	10

Tableau 8.3-1 : Données ALOS-PALSAR-PLR

Les prétraitements des données ALOS selon l'ordre d'application incluaient les suivants :

- i. Lecture de la matrice $[S_2]$ et extraction des canaux en *sigma-nought* par le logiciel PWS (Polarimetric Workstation ; Touzi et Charbonneau, 2004);
- ii. Traitement multi-vues 3x1 (portée x azimut) pour réduire le nombre de lignes;
- iii. Extraction des canaux de polarisation σ_{hh}^0 , σ_{hv}^0 et σ_{vv}^0 ;
- iv. Extraction des paramètres de la décomposition de Touzi et de Cloude-Pottier par le logiciel PWS et ceux de Freeman-Drunden à l'aide logiciel POLSARPRO (<http://earth.eo.esa.int/polsarpro/>). Les calculs ont été effectués pour une fenêtre de traitement de 7x7 pixels;
- v. Application du filtre de chatoiement de Lee standard de taille 7x7 sur les canaux de polarisation (logiciel PCI GEOMATICA)
- vi. Géocodage des données (logiciel PCI GEOMATICA). L'espace inter-pixels de l'ensemble des données après ré-échantillonnage bilinéaire était fixé à 12 m x12 m.

8.3.2. RADARSAT-2

Quatre faisceaux du mode polarimétrique fin ont été utilisés dans cette recherche pour couvrir les deux secteurs d'études (Tableau 8.3-2). Les modes FQ02 (19⁰.7-21⁰.7) et FQ21 (40⁰.2-41⁰.6) ont été utilisés pour couvrir le secteur de la Baie des Mines alors que les modes FQ03 (20⁰.9-22⁰.9) et FQ15 (34⁰.4-36⁰.0) ont été utilisés pour couvrir le secteur des Îles de Sorel

(Figure 8.3-1). De plus, une série temporelle a été constituée pour chacun de ces modes pour l'année 2009 selon un cycle de 24 jours.

Secteur de la Baie des Mines		Secteur des Iles de Sorel	
FQ21-Descendant	FQ02-Ascendant	FQ15-A Ascendant	FQ03-Descendant
1) 2009-05-15	1) 2009-05-18	1) 2009-04-27	1) 2009-05-11
2) 2009-06-08	2) 2009-06-11	2) 2009-05-21	2) 2009-06-04
3) 2009-07-02	3) 2009-07-05	3) 2009-06-14	3) 2009-06-28
4) 2009-07-26	4) 2009-07-29	4) 2009-07-08	4) 2009-07-22
5) 2009-08-19	5) 2009-08-22	5) 2009-08-01	5) 2009-08-15
6) 2009-09-12	6) 2009-09-15	6) 2009-08-25	6) 2009-09-08
7) 2009-10-06	7) 2009-10-09	7) 2009-09-18	7) 2009-10-02
8) 2009-10-30	8) 2009-11-02	8) 2009-10-12	8) 2009-10-26
9) 2009-11-23	9) 2009-11-26	9) 2009-11-05	9) 2009-11-19

Note : heure universelle d'acquisition, Baie des Mines : FQ02-A=22h30, FQ21-D=10h56
Iles de Sorel : FQ03-D=13h36, FQ15-A=22h42

Tableau 8.3-2 : Données RADARSAT-2 (année-mois-jour)

La même série de prétraitements a été appliquée pour les données RS2. Cependant dans ce cas il n'a pas eu de traitements multi-vues tandis que la fenêtre de traitement pour les calculs des paramètres de différentes décompositions ainsi que pour le filtrage de chatoiement a été fixée à 11 x 11 pixels. Finalement après géocodage l'espacement inter-pixels a été fixé à 8m x 8 m.

8.4. Données de support

Les séries de données de support utilisées dans cette étude, principalement pour l'établissement de la base de données sur les physiologies végétales des secteurs d'étude, sont brièvement décrites dans les paragraphes qui suivent.

8.4.1. Images satellitaires optiques

Ces images ont été introduites dans cette étude comme : i) aide à l'établissement des cartes des physiologies végétales utilisées comme référence pour les analyses des données RSO et; ii) comme support visuel pour la compréhension des conditions du terrain lors de l'acquisition des données RSO. Les images utilisées comprenaient une image multispectrale Ikonos acquise en juin 2005 mise à notre disposition par le Centre Saint-Laurent ainsi qu'une série d'images Landsat. L'image Ikonos a été utilisée pour la cartographie des physiologies végétales de la

tourbière de la Baie de Mines tandis que les images Landsat pour supporter les analyses dans les deux secteurs d'étude.

Les images Landsat (Tableau 8.4-1) ont été téléchargées via le site web GLOVIS du USGS (<http://glovis.usgs.gov/>). Ces images sont orthorectifiées avec un espacement inter-pixels de 30 m. Les images du 5 novembre 2006 et du 8 mai 2007 ont été acquises à quelques jours d'intervalle des données ALOS-PALSAR PLR. La série d'images acquises en 2009 était utilisée comme support aux analyses de données RS2. Puisque les images Landsat ont été utilisées dans cette recherche comme documents de support et non pas comme documents d'analyse, une simple conversion des valeurs numériques en réflectances apparentes au satellite a été effectuée. Ceci pour enlever surtout le biais de l'angle zénithal du soleil dans la comparaison des images Landsat prises à des dates différentes. Cette conversion a été effectuée selon la formulation connue impliquant i) les paramètres d'étalonnage du capteur (conversion valeurs numériques en luminances au satellite) disponibles dans les fichiers des métadonnées accompagnant les images Landsat; ii) l'éclairement solaire aux confins de l'atmosphère et la distance terre-soleil pour la date d'acquisition des données disponibles par le «Handbook» de Landsat¹⁸ et; iii) l'angle de l'élévation solaire (Tableau 8.4-1). Le «Handbook» de Landsat décrit en détail la formulation de conversion.

Cap- teur	Date (aa-mm-jj)	Élev. Sol. (°)	Azi- muth (°)	Remarques
L5	2006-11-05	26.5	163.0	Sans nuages; Acquise 5 jours avant l'image ALOS-043
L7	2007-05-08	56.6	143.4	Sans nuages; Acquise 5 jours avant l'image ALOS-046
L5	2009-04-19	50.9	145.6	Sans nuages
L7	2009-04-27	53.7	145.4	Sans nuages: Rive-Sud/Rive-Nord, Îles de Sorel Ennuagé: Baie des Mines.
L7	2009-05-13	58.9	142.5	Sans nuages
L5	2009-05-21	59.2	139.9	Sans nuages: Rive-Sud Iles de Sorel, Baie des Mines Ennuagé: Rive-Nord Iles de Sorel.
L7	2009-06-14	61.6	136.3	Sans nuages
L7	2009-08-17	52.3	143.6	Voile nuageux significatif pour tous les secteurs sauf Baie de Mines; Ennuagé: portion Est Iles de Sorel
L5	2009-09-10	45.1	150.8	Sans nuages
L5	2009-09-26	39.7	155.3	Sans nuages: Rive-Sud Iles de Sorel, Baie des Mines Ennuagé: Rive-Nord Iles de Sorel.
L5	2009-11-13	24.0	162.4	* Aucun nuage

Tableau 8.4-1 : Images Landsat-5 et Landsat-7 (Path14/Row28) utilisées comme données de support

¹⁸ <http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/handbook.html>

8.4.2. Données cartographiques

8.4.2.1. *Cartes des milieux humides*

Les cartes des milieux humides du Saint-Laurent du Centre Saint-Laurent (CSL ; Létourneau et Jean, 2006), ministère de l'Environnement du Canada, ont été utilisées comme référence pour l'établissement de notre base de données sur les physionomies végétales des milieux humides du secteur des îles de Sorel (Figure 9.3-3). Cette cartographie a été réalisée par classification dirigée d'une série d'images Ikonos acquises entre 2001 et 2003 appuyée sur de nombreux relevés de végétation réalisés au cours de la même période. Au total, plus d'une cinquantaine d'espèces végétales ont été classifiées dont une vingtaine sont dominantes dans la région du Lac Saint-Pierre (chapitre 9). Le secteur des îles de Sorel a quant à lui été couvert par une image Ikonos acquise le 23 août 2003. L'analyse des résultats post-classification rapportée par Létourneau et Jean (2006) montrent que la classification est fiable pour l'ensemble des classes végétales de la région du Lac Saint-Pierre (voir Létourneau et Jean, 2006, tableau 10, p.47).

8.4.2.2. *Cartes écoforestières*

Plusieurs feuillets vectoriels de la carte écoforestière à l'échelle du 1/20 000 du ministère des Ressources naturelles et Faune du Québec étaient disponibles pour les secteurs d'étude. Ces cartes ont été utilisées comme support pour l'identification des physionomies arborées. Elles contiennent aussi des informations sur les milieux humides, notamment en ce qui concerne les tourbières et les marécages, ainsi que sur les conditions du terrain (classe de pente, dépôt de surface, classe de drainage, etc.).

8.4.2.3. *Cartes des cultures agricoles*

Afin de supporter l'identification des cultures agricoles utilisées comme contrepartie des physionomies végétales en milieu sec lors de nos analyses nous nous sommes servis des cartes numériques de la Financière Agricole du Québec publiées annuellement depuis 2003 sur les cultures assurées (BDCA)¹⁹. Grâce à ces cartes il est possible d'obtenir plusieurs échantillons

¹⁹ Voir Financière Agricole du Québec, Base de données des cultures assurées (BDCA),
URL : http://www.fadq.qc.ca/geomatics/geomatics_professionnels/insured_crop_data_base.html

avec un nombre suffisant de pixels d'une physionomie végétale en milieu sec pour l'année d'acquisition des données RSO. Par exemple, le maïs et le tournesol, par le diamètre de leurs tiges, se comparent à quelques espèces des milieux humides dont le Typha ou les Roseaux. Les physionomies herbacées des prairies humides et des Fens herbacés peuvent se comparer à celle des cultures céréalières et fourragères. Parmi les classes recensées par la BDCA les cultures de foin, de maïs, de blé, d'orge, d'avoine et de soya ont été retenues dues à leur abondance dans les secteurs d'étude.

8.5. Les analyses des données sur les physionomies végétales

8.5.1. Les analyses de sensibilité

Les analyses de sensibilité des paramètres polarimétriques reposent sur une série d'objets représentant diverses classes physionomiques identifiées à l'aide des différentes données de support tel que présenté en détail dans le chapitre 9. Pour chaque objet, une série de statistiques (moyenne, écart-type, aplatissement, asymétrie) ont été calculées pour l'ensemble des paramètres polarimétriques et des paramètres standards (coefficient de rétrodiffusion, différence de phase entre canaux en polarisation parallèle). Cette approche "orientée objet" permet d'améliorer la compréhension des résultats en réduisant la variabilité des statistiques inhérente à l'échelle du pixel. Néanmoins, dans la mesure du possible, chaque classe physionomique a été représentée par un grand nombre d'objets pour obtenir un portrait réaliste de chacune des physionomies végétales. Les analyses de sensibilité sont surtout basées sur des graphiques 2D (ou 3D) permettant d'évaluer la relation entre les différents paramètres de la décomposition de Touzi et/ou les autres paramètres étudiés par classe physionomique. Le chapitre 9 sera consacré aux analyses de sensibilité des données ALOS et le chapitre 11 à celles de données RS2.

8.5.2. Le classificateur supervisé SVM

L'un des apports originaux de cette thèse concernera le développement d'un arbre hiérarchique de classification (Chapitre 13 et 14) basé sur le seuillage des paramètres de la décomposition de Touzi. Ce type de classification est robuste et repose fortement sur la

connaissance qu'à l'utilisateur du milieu à classifier et possède l'avantage de produire des règles de décisions explicites (pas de phénomène de boîte noire). Mais l'utilisateur ne peut pas simultanément tenir compte d'une grande quantité de paramètres et de classes lors du processus de classification. Or il est fortement probable que la séparabilité entre les classes physiologiques puisse être améliorée en augmentant la dimensionnalité, c'est-à-dire en tenant compte simultanément d'un plusieurs paramètres lors de la classification.

La machine à vecteur de support (SVM, de l'anglais *support vector machine*, *Vapnik et al.*, 1998; Boser et *al.*, 1992) est un classificateur non linéaire (Figure 8.5-1A) qui est de plus en plus populaire pour la classification des images radar (Lardeux et *al.*, 2006; Frison et *al.*, 2009; Bhattacharya et Touzi, 2011). Sa popularité grandissante tient à sa capacité d'intégrer plusieurs paramètres et en grande quantité ce qui est souvent nécessaire pour obtenir une classification précise (Bhattacharya et Touzi, 2011) avec les données radar. Sa nature non paramétrique est de plus adaptée à la classification des images radar (et des paramètres qui en sont dérivés) de distributions statistiques variées.

L'algorithme LIBSVM (Chang et Lin, 2011)²⁰, une extension de l'algorithme nu-SVM (Scholkopf et *al.*, 2001), a été utilisé dans sa version implémentée dans ENVI. Le SVM est essentiellement un classificateur binaire (Figure 8.5-1A) et une stratégie doit être adoptée pour un problème de classification multiclasse. La stratégie du vote (Wu et *al.*, 2004) est la plus simple et consiste à comparer chaque paire de classes selon un critère de décision donné et l'étiquette de classe finale sera assignée à celle qui aura remporté le plus de victoire. L'algorithme LIBSVM intègre quant à lui une stratégie par paire de classes mais probabiliste (décrite dans Wu et *al.*, 2004) permettant d'évaluer le degré d'appartenance d'un échantillon à une classe donnée.

Le SVM sépare les classes selon une surface de décision, appelée hyperplan optimal (Figure 8.5-1B), qui maximise la marge entre les classes et les points de données les plus proches de l'hyperplan sont appelés vecteurs de support. Les vecteurs de support sont les éléments essentiels de la phase d'apprentissage (ENVI, 2010²¹) et leur sélection dépend en partie d'un paramètre de pénalité qui permet un degré plus ou moins élevé d'erreur de classification ce qui

²⁰ <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm/>

²¹ Guide de l'utilisateur ENVI v4. Mot clé : SVM classification. Guide consulté le 15 mai 2012.

est particulièrement important pour les échantillons de classes qui ne sont pas entièrement séparables lors de la phase d'apprentissage (ENVI, 2010). Le paramètre de pénalité contrôle ainsi le compromis entre la possibilité de tolérer des erreurs lors de l'entraînement et la formation de marges rigides qui mènera au surentraînement (Moutrakis et *al.*, 2010) du modèle donc à une perte de sa capacité de généralisation.

La phase d'apprentissage du SVM est aussi basée sur le concept de noyau (kernel). Cela consiste à utiliser un classificateur linéaire pour résoudre un problème non linéaire en transformant l'espace de représentation des données d'entrée en un espace de plus grande dimension, dans lequel le classificateur linéaire est alors utilisé :

"... if a problem is non-linear, instead of trying to fit a non-linear model, one can map the problem from the input space to a new (higher-dimensional) space (called the feature space) by doing a nonlinear transformation using suitably chosen basis functions and then use a linear model in the feature space. This is known as the 'kernel trick'" (Sewell, 2009).

Le choix de la fonction noyau pour effectuer cette transformation est important et il existe plusieurs types de noyau et quatre sont implémentés dans ENVI soit le noyau linéaire, RBF (*radial basis function*), Polynomial et Sigmoidale. En ce qui concerne la classification des images radar, le noyau RBF semble faire l'objet d'un consensus (Frison et *al.*, 2009) et il a été utilisé pour l'ensemble des classifications SVM présentées au chapitre 13. Lors de la phase d'apprentissage, $\approx 5\%$ des objets de chaque classe physiologique ($\approx 10\%$ pour la classe de Zizanie) ont été utilisés. Les mêmes objets ont été utilisés pour l'ensemble des classifications.

Mentionnons que le SVM applique un rééchantillonnage des données (généralement dans l'intervalle $[-1,+1]$ ou $[0, 1]$) pour éviter que les attributs (paramètres) possédant une plus étendue dominent les autres. Le rééchantillonnage linéaire est généralement recommandé (ENVI, 2010) et il a été utilisé lors de nos classifications. Mais l'effet de rééchantillonnage sur les différents paramètres de la décomposition de Touzi (et par extension sur l'utilisation optimale de l'information polarimétrique contenue dans ces paramètres) reste à évaluer et pourrait faire l'objet d'une future étude.

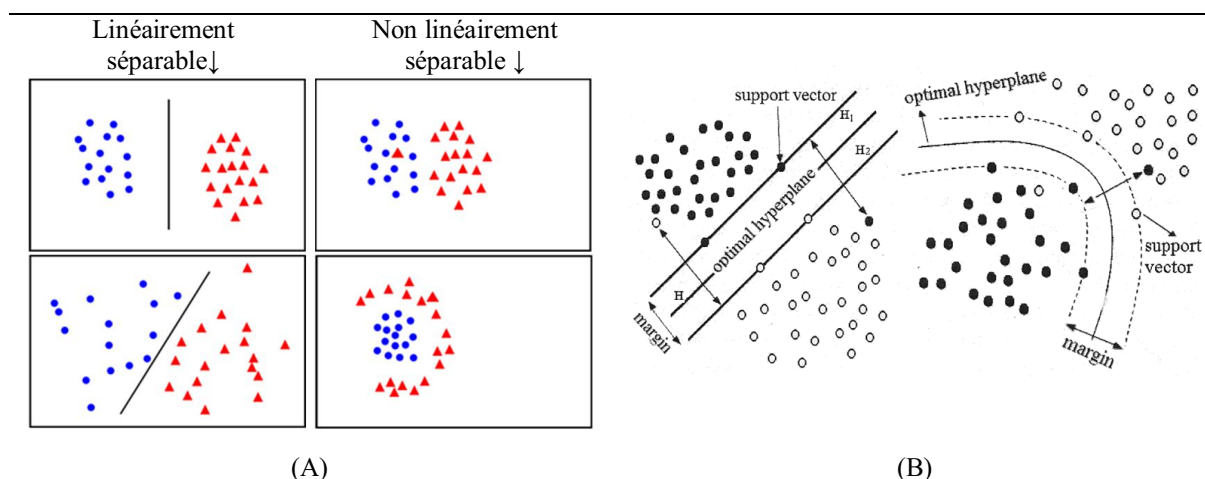


Figure 8.5-1 : Principes de base de la machine à vecteur de support

8.5.3. Les analyses de séparabilité

Des statistiques extraites des objets définis précédemment ont été utilisées pour évaluer la séparabilité des classes physiologiques à l'intérieur des milieux humides ou entre classes physiologiques similaires en milieu humide et milieu sec. Cette évaluation a été réalisée à l'aide de l'algorithme de divergence transformée qui est présenté en détail dans Jensen (2005). Un programme a été créé à cet effet dans l'environnement Matlab pour l'automatisation du calcul.

La divergence (D_{ij}) entre deux classes se mesure par la comparaison de leur matrice de covariance et de leur vecteur de moyennes respectif dont les dimensions sont équivalentes au nombre de bandes ou paramètres utilisés pour représenter chaque classe. La divergence (D_{ij}) entre la classe i et la classe j correspond à :

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \text{tr} \left[(\text{cov}_i - \text{cov}_j) (\text{cov}_j^{-1} - \text{cov}_i^{-1}) \right] + \frac{1}{2} \text{tr} \left[(\text{cov}_i^{-1} + \text{cov}_j^{-1}) (\bar{m}_i - \bar{m}_j) (\bar{m}_i - \bar{m}_j)^T \right] \quad (8.5-1)$$

où cov_i et cov_j sont les matrices de covariance des classes i et j , cov_i^{-1} cov_j^{-1} l'inverse des matrices de covariances, \bar{m}_i et \bar{m}_j les vecteurs de moyennes des classes i et j . La contribution individuelle de chaque coefficient de rétrodiffusion ou paramètre de décomposition à la divergence totale peut être évaluée par (Jensen, 2005) :

$$D_{ij} = \frac{1}{2}(s_i^2 - s_j^2) \left(\frac{1}{s_j^2} - \frac{1}{s_i^2} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{s_i^2} + \frac{1}{s_j^2} \right) (m_i - m_j)^2 \quad (8.5-2)$$

où les matrices de covariance et les vecteurs de moyennes sont remplacés par la variance des classes (s_i^2, s_j^2) et les moyennes des classes. Les classes facilement séparables donnent des valeurs de divergences très élevées. La divergence transformée (DT_{ij}) est généralement utilisée pour donner un poids exponentiellement décroissant aux distances croissantes entre les classes (Jensen, 2005) :

$$DT_{ij} = 2 \left(1 - e^{-D_{ij}/8} \right) \quad (8.5-3)$$

Le multiplicateur 2 sert à échelonner les résultats et représente la valeur maximale que peut prendre la divergence transformée qui devient alors bornée en 0 et 2. Il est communément admis qu'une valeur $DT_{ij} < 1$ indique une très faible séparabilité entre deux classes, $1 < DT_{ij} < 1.9$ indique une séparabilité plutôt faible alors que $DT_{ij} > 1.9$ représente une parfaite séparabilité. Il est parfois mentionné que les divergences transformées supérieures à 1.7 indiquent une séparabilité acceptable entre deux classes d'occupation du sol.

Pour assurer la robustesse des observations, toutes les divergences transformées correspondent à la moyenne d'une série de divergences transformées. Par exemple, considérant la classe i comprenant 155 objets et un total de 18600 pixels et la classe j comprenant 203 objets et 24360 pixels, chaque itération sélectionnera aléatoirement une fraction des pixels de chaque classe, calculera la divergence transformée et recommencera la procédure selon le nombre d'itérations souhaité :

$$\bar{x} DT_{ij} = \frac{1}{n} \sum DT_{ij} \quad (8.5-4)$$

où le nombre d'itérations (n) a été fixé à 10 et le pourcentage des pixels sélectionnés pour chaque classe lors des itérations à 25 %. Les résultats des analyses de séparabilité sont présentés aux chapitres 11 et 13 pour ALOS et RS2 respectivement.

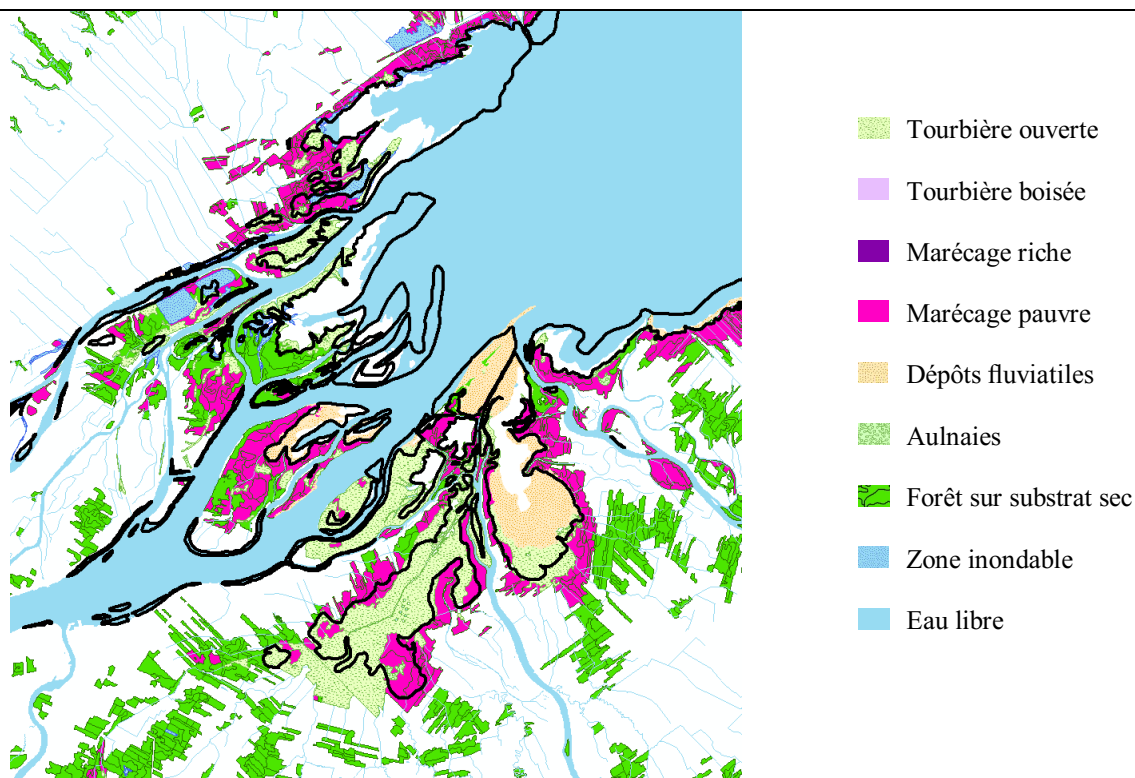
CHAPITRE 9

9. PHYSIONOMIES VÉGÉTALES DES MILIEUX HUMIDES DE LA RÉGION DU LAC SAINT-PIERRE ET ÉTABLISSEMENT D'UNE BASE DE DONNÉES

9.1. Caractéristiques des secteurs étudiés

9.1.1. Le secteur des Îles de Sorel

Le secteur des îles de Sorel contient de grandes étendues de milieux humides composés essentiellement de marais herbacés et de marécages arbustifs (Figure 9.1-1).



Note 1 : le contour des milieux humides (en noir) provient de la BDTQ.

Note 2 : les types de milieux humides proviennent des cartes écoforestières du Québec

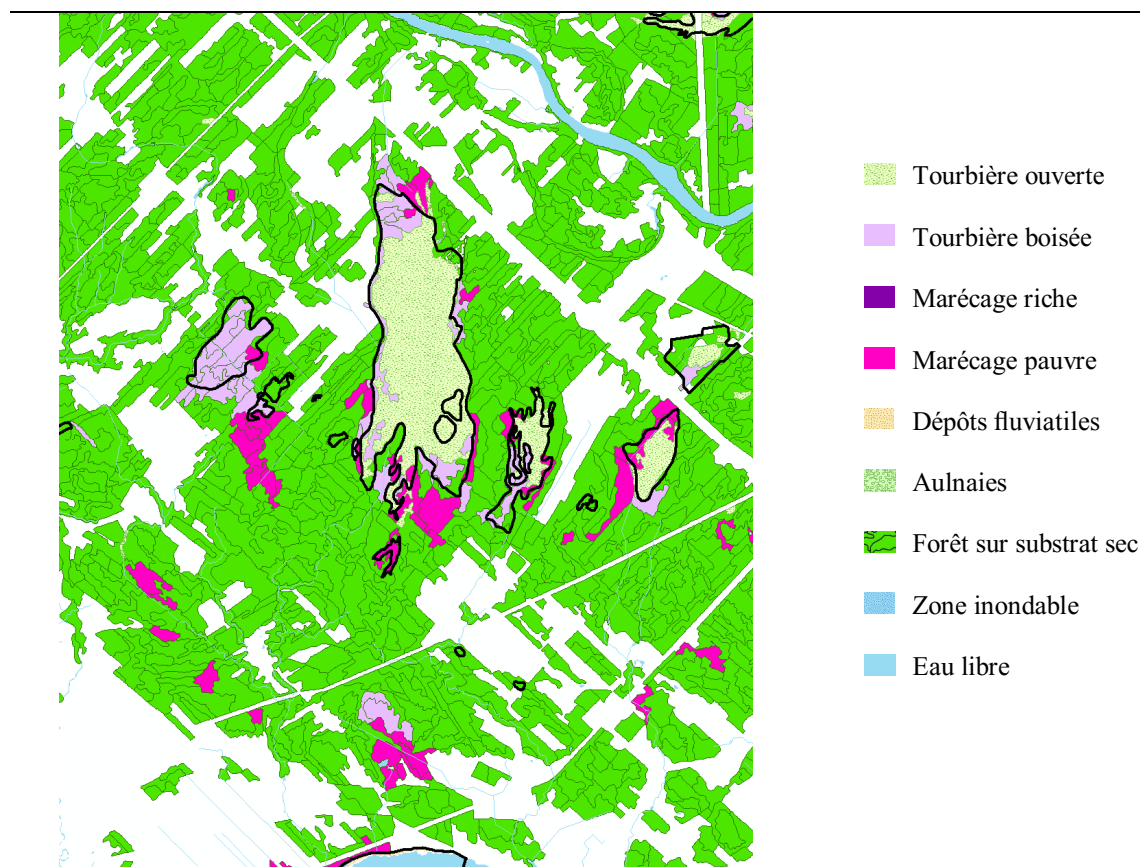
Figure 9.1-1 : Les Îles de Sorel, types de milieux humides

En 2002, selon la cartographie du Centre Saint-Laurent (chapitre 8), on comptait 3459 ha de marécages arbustifs dont 2400 occupés par l'Érable argenté (*Acer saccharinum*) ainsi que 857 ha occupés par des marécages herbacés. Les hauts marais qui occupent 2539 ha sont largement dominés par le Phalaris roseau (*Phalaris Arundinacea*) avec quelques stations de Carex qui occupent 237 ha. Pour les bas marais qui couvrent une superficie de 5153 ha, 1696 ha sont

occupés par le Typha (*Typha sp.*), 864 ha par le scirpe fluviatile (*Bolboschoenus fluviatilis*), 510 ha par la Zizanie (*Zizania sp.*) et 474 ha par le Scirpe des étangs (*Scripus lacustris*).

9.1.2. Le Secteur de la tourbière de la Baie des Mines

La tourbière de la Baie des Mines (46°22'30"N, 72°42'53"W) est située au nord du lac Saint-Pierre à 12 km à l'ouest de Trois-Rivières (Figure 8.2-1). Cette tourbière d'une superficie de 695 ha est majoritairement ombrotrophe (Bog à éricacées) avec, au sud, des sections dominées par la végétation herbacée (Fen pauvres) et par endroits des secteurs de tourbière boisée et de marécages (Figure 9.1-2).



Note 1 : le contour des milieux humides (en noir) provient de la BDTQ.

Note 2 : les types de milieux humides proviennent des cartes écoforestières du Québec

Figure 9.1-2 : La tourbière de la Baie des Mines et les milieux humides avoisinants

La portion ombrotrophe de la tourbière de la Baie des Mines présente une succession de buttes et de dépressions formant une microtopographie caractéristique de ce type de tourbière. Les arbrisseaux de la famille des Éricacées constituent la végétation dominante composée, entre

autres, de Thé du Labrador (*Ledum groenlandicum*), de Kalmia à feuilles étroites (*Kalmia angustifolia*) et de Cassandre caliculé (*Chamaedaphne calyculata*) avec en sous-étage un tapis de sphaignes (*Sphagnum spp.*). Par endroits et en proportion variables, les physionomies herbacées (*Carex spp.* mais probablement *Carex oligosperma*) se mêlent aux Éricacées jusqu'à devenir dominantes dans la portion sud de la tourbière de la Baie des Mines pour y former le secteur de Fen pauvre avec en sous-étage un tapis de sphaignes (*Sphagnum spp.*). Des îlots de tourbières boisées, dominées par une couverture éparse de Mélèze (*Larix laricina*), parsèment le secteur ombrotrophe de la tourbière. Aux marges de la tourbière et au sud cette couverture se densifie pour former des tourbières boisées à canopées ouvertes dominées par des peuplements de Mélèze et d'Épinette noire (*Picea mariana*).

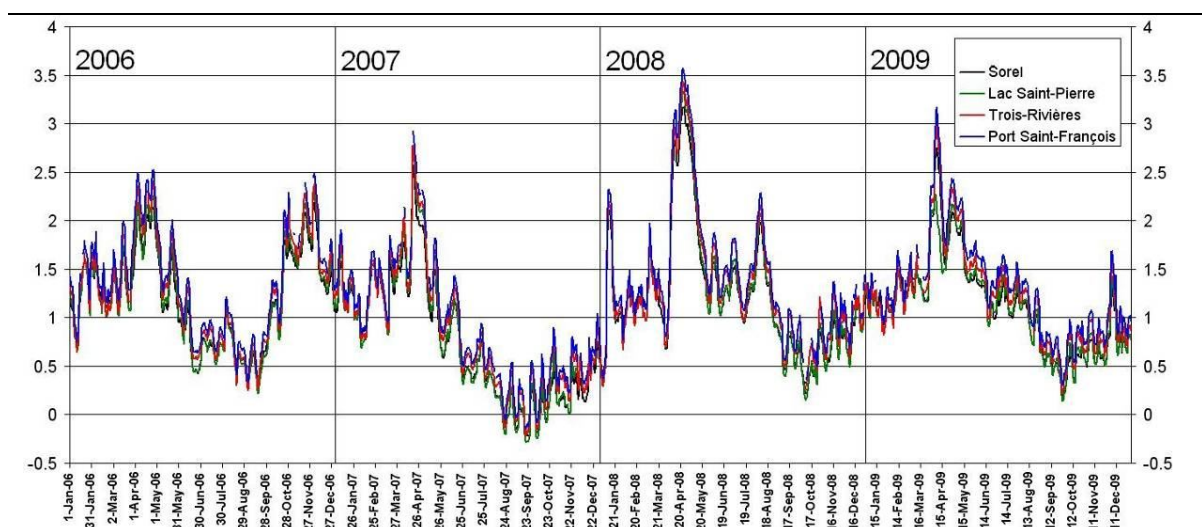
9.2. Regroupement des espèces végétales en classes physionomiques et description des quelques physionomies typiques

La cartographie des milieux humides du Saint-Laurent (section 8.4.2) a servi de point de départ pour l'identification des classes de physionomies végétales des milieux humides. Différents manuels de botanique (Guides Fleurbec, Flore Laurentienne) et autres sources ont été utilisés pour relever les caractéristiques structurales des diverses espèces végétales (Annexe 1) dont la hauteur, le diamètre de la tige principale, la forme des feuilles. Le Tableau 9.2-1 présente les classes physionomiques qui seront étudiées. Des détails concernant des espèces végétales typiques de chaque classe physionomique sont donnés dans les paragraphes qui suivent.

Classe et espèces végétales	Description / définition	Modificateur(s)	M.H typique
[H1] Herbacée haute 1			
[38] <i>Typha</i> sp. [35] <i>Acorus calamus</i> [40] <i>Sparganium eurycarpum</i>	Espèces de moyenne et forte biomasse foliaire caractérisés par de longues feuilles, plutôt larges et ordonnée (souvent dressées et rigides). Tiges ayant un diamètre s'approchant de la longueur d'onde de la bande C. Plantes de grande taille (>1m).	• Saison (+++) • Niveau de l'eau et marées	• B.M
[H2] Herbacée haute 2			
[89] <i>Calamagrostis canadensis</i> [21] <i>Zizania</i> sp. [88] <i>Phalaris arundinacea</i> [84] <i>Phragmites australis</i> [90] <i>Glyceria grandis</i> [36] <i>Lythrum salicaria</i>	Espèces de moyenne et forte biomasse foliaire caractérisées par de longues feuilles, plutôt étroites et désordonnées. Tiges ayant un diamètre inférieur à la d'onde de la bande C. Plantes de grande taille (>1m).	• Niveau de l'eau et marées • Saison (++)	• H.M • B.M • Fen
[h1] Herbacée moyenne 1			
[20] <i>Schoenoplectus pungens</i> [26] <i>Scirpus lacustris</i> [27] <i>Bolboschoenus fluviatilis</i> [31] <i>Eleocharis</i> sp. [43] <i>Schoenoplectus pungens</i> [83] <i>Carex</i> sp.	•Faible biomasse foliaire, feuilles parfois absentes. Espèces caractérisées par des tiges dressées ayant un diamètre inférieur à la d'onde de la bande C. Végétation de hauteur moyenne (≈1m). •Les espèces appartenant à <i>Carex sp</i> pourraient former une classe polarimétrique distincte, p.ex. <i>Carex oligosperma</i> .	• Saison (+++)	• H.M • B.M
[h2] Herbacée moyenne 2 (Forbs)			
[34] <i>Pontederia cordata</i> [25] <i>Sagittaria</i> sp. [32] <i>Butomus umbellatus</i>	Plantes de taille moyenne autres que les graminées c.-à-d. carex, laiche ou joncs).	• Niveau de l'eau et marées • Saison (++)	•H.M •Fen
[M] Muscinale			
[--] Lichens [--] Sphaignes	•Pas de classes de ce type dans la classification du Centre Saint-Laurent. • Peut contenir les gazons.	• Saison (++)	•Bog et Fen
[D] Eau et Dénudé			
[6] Eau peu profonde [11] Eau peu profonde à herbier flottant [--] Vasière	Eau libre ou avec végétation flottante.	• Saison	• M.L • B.M
[A1] Physionomies arborées			
[130] Mrg. arboré [131] Mrg. arboré à <i>Acer saccharinum</i> [135] Mrg.arboré à <i>Salix nigra</i> [136] Mrg. arboré à <i>Salix fragilis</i>	Contient tout autant les physionomies sur substrat sec (<i>upland forest</i>), les marécages arborés ou les tourbières boisées.	• Saison (+) •Marécages (niveaux de l'eau +++) •Feuillage ou non (C+++), L (++) , (P+). •Biomasse •D/H	•Mrg. •T.B •H.M (+)
[A2] Physionomies arbustives			
[110] Mrg. arbustif [112] Mrg. arbustif à <i>Salix</i> sp. [113] Mrg.arbustif à <i>Alnus incana</i> ssp. <i>rugosa</i> [111] Mrg. arbustif à <i>Cornus rugosa</i>	Contient tout autant les physionomies sur substrat sec (<i>upland forest</i>), les marécages arbustifs ou les tourbières boisées.	• Saison (+) • Biomasse • D/H	•Mrg. •T.B (++) •H.M (++)
[A3] Arbrisseaux (<i>dwarf shrub</i>)			
(Exemples) [--] <i>Ledum groenlandicum</i> [--] <i>Kalmia angustifolia</i> [--] <i>Chamaedaphne calyculata</i>	Arbustes de petite taille (<4m) et très ramifiés qui dans les milieux humides appartiennent souvent à la famille des Éricacées.	• Saison (+) • Humidité du substrat • Densité	•T.B (+++) •H.M (++)
Abréviations : Mrg. = marécage; D/H= Classe de densité hauteur en référence aux cartes écoforestières du Québec; H.M = Haut marais; B.M= Bas marais; T.B= Tourbière boisée; M.L=Marais lacustre (+)= Influence; (++) = Grande Influence; (+++) = Très grande influence Note 1: Les espèces apparaissant en rouge ne sont pas fréquentes dans la région du Lac Saint-Pierre. Les codes entre braquettes correspondent au numéro de classe de l'espèce végétale dans la classification des milieux humides du Saint-Laurent Note 2: L'annexe 1 contient une traduction française, anglaise et latine des espèces végétales.			

Tableau 9.2-1 : Classes de physionomies végétales

La répartition et le cycle de croissance des physionomies végétales des marais du Lac Saint-Pierre, dont il sera question par la suite, sont très influencés par le cycle du niveau d'eau du fleuve Saint-Laurent ainsi que par la topographie de ses rives. À cet effet Tessier *et al.* (1981) soulignent que dans la région des îles de Sorel : “la topographie joue un rôle très important, car la moindre dénivellation occasionne un changement dans la composition de la végétation [...] la microtopographie et la mise en eau printanière sont les facteurs les plus importants dans la position des groupements”. Les grandes rivières des climats tempérés présentent des variations saisonnières de leur débit et du niveau de l'eau menant à la formation de plaine d'inondation printanière et d'un réseau complexe de milieux humides riverains (Hudon, 1997). Ces milieux humides riverains embrassent un gradient allant des sites inondés annuellement mais généralement exondés, aux sites constamment submergés appartenant aux systèmes aquatiques (Hudon, 1997). Les bas marais du Lac Saint-Pierre présentent une dynamique temporelle marquée par une régénérescence annuelle complète de la biomasse aérienne qui suit de près le cycle du niveau de l'eau. Ce cycle est marqué par un pic annuel se situant vers la fin avril correspondant aux crues printanières où le niveau atteint les 2.5 à 3 m en moyenne (Figure 9.2-1).



Note : Le "niveau 0" correspond au zéro hydrographique, c.-à-d. à la position de la basse mer inférieure de grande marée. Pour plus d'information sur le zéro hydrographique (zéro des cartes marines) on consultera la page web «[RÉFÉRENCES VERTICALES](http://www.lau.chs-shc.gc.ca/french/ReferencesVerticales.shtml)» du ministère des Pêches et Océans Canada à l'adresse suivante : <http://www.lau.chs-shc.gc.ca/french/ReferencesVerticales.shtml> (page révisée le 2008-09-15 et consultée le 2010-03-31). Compilation à partir de données brutes provenant des *Archives canadiennes des données sur les marées et niveaux d'eau*, Pêches et Océans Canada (Données téléchargées le 31 mars 2010)

Figure 9.2-1 : Évolution quotidienne du niveau de l'eau (en mètres) du lac Saint-Pierre entre 2006 et 2009

Après les crues printanières, le niveau de l'eau s'abaisse progressivement pour atteindre 0.5 m environ. C'est au cours de cette période que la végétation des bas marais se développe progressivement en «ceinture» de végétation. De fortes précipitations peuvent entraîner une remontée des eaux de quelques centimètres jusqu'à 1m parfois. Les variations horaires du niveau de l'eau dues aux marées sont négligeables dans le secteur.

La végétation émergente des marais colonise les eaux peu profondes (<2m) autour des îles et des bancs de sable (Hudon, 1997). La construction de barrages hydroélectriques, d'ouvrage de régulation des crues ou de diversion du courant entraîne une modification du niveau d'eau et des débits. Cela entraîne en retour une modification de la répartition spatiale des espèces végétales (Hudon, 1997; Auclair *et al.*, 1976) puisque chaque espèce possède une préférence quant à la profondeur moyenne de son habitat (Figure 9.2-2).

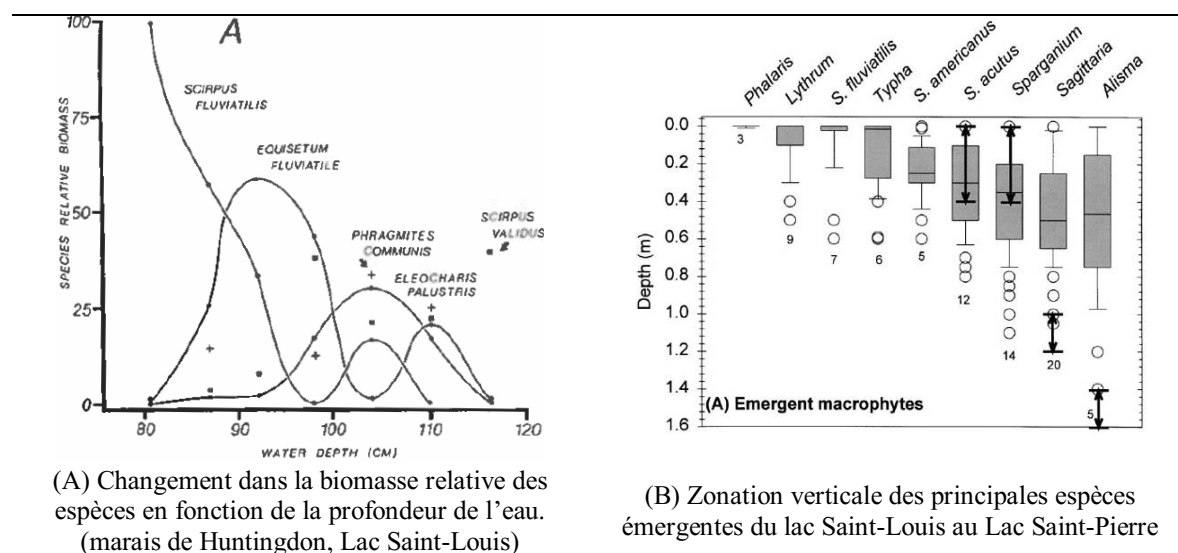


Figure 9.2-2 : Relation entre la profondeur de l'eau et les principales espèces végétales émergentes

Source : (A) Auclair *et al.*, 1976, fig.7-A, p.949; (B) Hudon, 1997, fig.3-A, p.2859

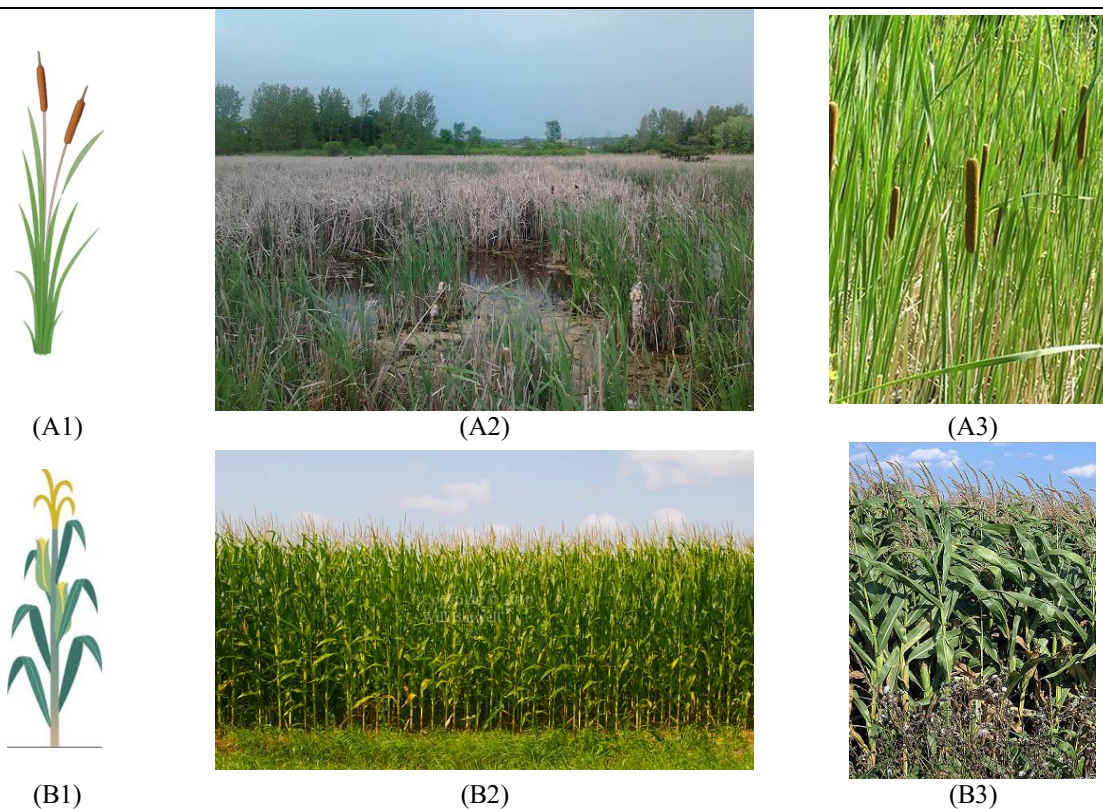
Mais comme le souligne Hudon (1997), les variations interannuelles du niveau d'eau dues au contrôle du débit en amont sont difficiles à distinguer des variations interannuelles du niveau d'eau attribuables aux fluctuations naturelles. La stabilisation du niveau de l'eau pour la circulation maritime entraîne une perte de biodiversité en favorisant certaines espèces alors que les cycles annuels avec de fortes variations du niveau de l'eau augmentent la biodiversité mais également le risque d'invasion par les plantes exotiques (Hudon, 1997). Parmi les plantes exotiques invasives, le Phragmite commun (*Phragmites australis*) est en pleine progression

dans la vallée du Saint-Laurent comme le rapportaient Gervais *et al.* (1993) dans une étude portant sur la distribution géographique de cette espèce.

9.2.1. Herbacées hautes [H1]

Dans le secteur des îles de Sorel, les physionomies herbacées hautes [H1] correspondent pour la plupart à des bas marais de *Typha. Sp* (51-38, *Typha latifolia* ou *Typha angustifolia*). Les sites de *Typha* sont d'aspect variable au printemps. La tige robuste du *Typha* permet à ces peuplements de maintenir une biomasse dressée mais desséchée tout au long de l'hiver et au début du printemps. Toutefois, il n'est pas rare que les sites habituellement occupés par le *Typha* soient complètement dénudés sous l'action érosive des radeaux de glace qui lors du déglacage arrachent et emportent au loin la végétation. Un phénomène similaire survient pour toutes les espèces végétales des bas marais et en particulier pour les espèces de Scirpe (Dionne et Bouchard, 2000).

Le *Typha* commence sa croissance tôt au cours du printemps et connaît ensuite une croissance rapide (Asaeda *et al.*, 2005). Les Figure 9.2-3 A et B illustrent des aspects saisonniers des peuplements de *typha* et de maïs respectivement, ces derniers utilisés comme peuplements de comparaison d'un milieu sec. Il est mentionné que le *Typha* connaît trois poussées d'émergence des tiges, l'une au printemps, une autre en juillet et août et finalement une dernière en septembre (Dikerman et Wetzel, 1985; Asaeda *et al.*, 2005). La Figure 9.2-4 que la biomasse aérienne du *Typha* peut atteindre 0.5 kg m^{-2} entre août et septembre. Dans les marais d'eau douce des biomasses aériennes supérieures à 1.2 kg m^{-2} sont aussi mentionnées (Whigham et Simpson, 1978) et même supérieures à 2 kg m^{-2} (marais du Minnesota; Dubbe *et al.*, 1988).



Sources d'images : (A1) et (C1) Integration and Application Network (IAN), University of Maryland Center for Environmental Science (<http://ian.umces.edu/about/overview/>); (A2) Gabriel Gosselin, 25 mai 2012. *Typha latifolia*, biomasse desséchée mais dressée (45°28'12N, 75°44'30W); (B2) Cornfield Ontario Canada, Will Burwell Photography (<http://willburwell.photoshelter.com/>); (C3) Cornfields in Ontario Linda Dawn Hammond, (Bradford West Guillimbury Line 4), Aug.28, 2005 (<http://www.flickr.com/photos/dawnone/>)

Figure 9.2-3 : Physiologies herbacées hautes 1 [H1] : (A) *Typha* Sp. et (B) Maïs.

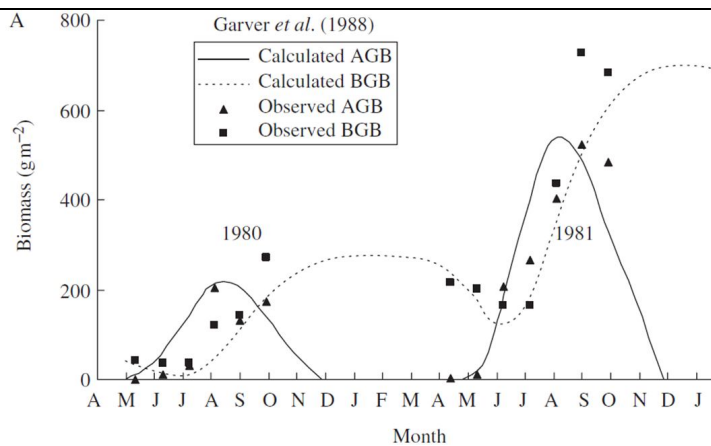
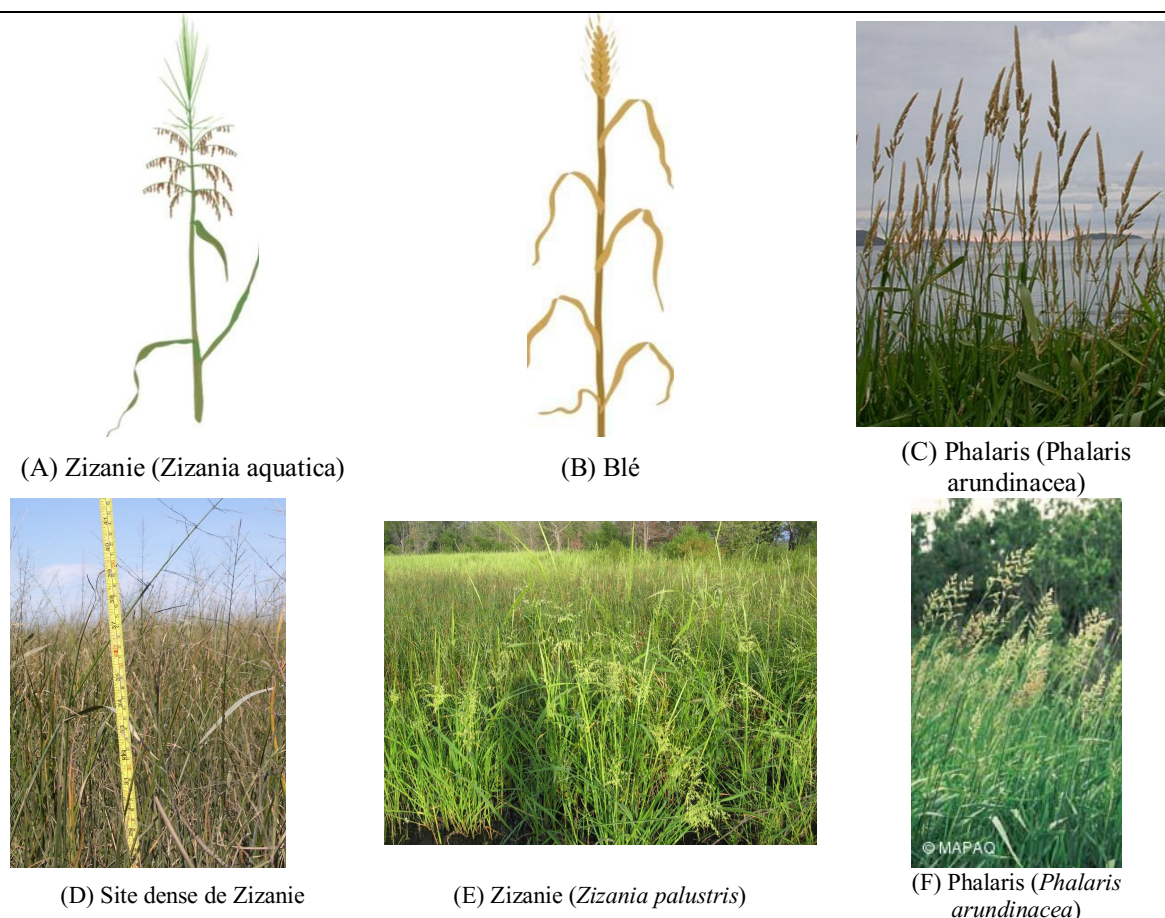


Figure 9.2-4 : Évolution saisonnière de la biomasse aérienne (AGB) et souterraine (BGB) du *Typha* Sp.

Source : Asaeda *et al.*, 2005, fig.2-AS, p.305.

9.2.2. Les physionomies herbacées hautes [H2]

Les physionomies de ce groupe comprennent aussi des espèces de grande taille (>1m) et qui peuvent atteindre de fortes biomasses. Mais contrairement aux physionomies du type [H1], elles ne possèdent cependant pas une structure particulière. Ce sont des physionomies que l'on retrouve dans les hauts marais ([52-88] *Phalaris arundinacea* et [52-89] *Calamagrostis canadensis*) ainsi que dans les bas marais ([52-21] *Zizania Sp.*). La Figure 9.2-5 illustre les caractéristiques des peuplements de Zizanie et de Phalaris et de blé, ces derniers utilisés comme peuplements de comparaison d'un milieu sec. Les peuplements de phalaris et de zizanie sont décrits avec plus de détails dans les paragraphes qui suivent.



Sources d'images : (A) et (B) Integration and Application Network (IAN), University of Maryland Center for Environmental Science (<http://ian.umces.edu/about/overview/>); (C) Broadford, Skye <http://www.plant-identification.co.uk/skye/gramineae/phalaris-arundinacea.htm>. Page consultée le 5 octobre 2009. (D) Gabriel Gosselin, marais de Montmagny, 15 octobre 2008; (E) <http://blog.emergencyoutdoors.com/edible-wild-plants-northern-wild-rice-zizania-palustris-1/>; (F) ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ, 2010)

Figure 9.2-5 : Physionomies herbacées hautes 2 [H2]

[52-28] Le Phalaris

Le Phalaris est une graminée dont la taille se situe entre 1.0 et 2.5 m et possède deux périodes de croissance : l'une survenant avant la maturation des graines et l'autre après (Klopatek et Stearns, 1978). Durant ses deux premiers mois de croissance, il investit ses énergies dans la croissance de sa biomasse aérienne qui croît à un taux deux fois supérieur à celui de son système racinaire. Cette croissance rapide donnerait au Phalaris un avantage sur les autres espèces essayant de s'établir en coupant leur accès au soleil (Reinhardt Adams et Galatowitsch, 2005). Dans le deuxième stade de croissance, le Phalaris investit dans la croissance de sa biomasse souterraine pour s'assurer d'un accès maximal aux nutriments et favoriser sa propagation (Reinhardt Adams et Galatowitsch, 2005). Pour des latitudes comparables à celles du lac Saint-Pierre, des biomasses aériennes de 1.35 kg m^{-2} ont été rapportées quoique des valeurs se situant entre 0.69 et 1.03 kg m^{-2} soient plus communes (Klopatek et Stearns, 1978). Le Phalaris occupe les hauts marais sur des sites qui ne sont généralement pas inondés mais les peuplements bien établis peuvent tolérer de longues périodes d'inondation (Klopatek et Stearns, 1978). Le Phalaris roseau supporte très bien les sols saturés en eau et sa production de biomasse aérienne augmente même lorsqu'il amorce sa croissance en conditions saturées (Dae Kim et *al.*, 2006).

Le Phalaris donc, tout comme le Typha, peut atteindre une forte biomasse aérienne. Mais contrairement au Typha, il y a pour les hauts marais à Phalaris une présence annuelle de biomasse et le substrat est saturé en eau mais rarement inondé. Le Tableau 9.2-2 compare les peuplements de Typha et de Phalaris en termes de biomasse aérienne totale. On constate qu'il y a une différence marquée entre les deux au début de l'été (entre le 20 mai et le 30 juillet) où le Phalaris présente une évolution de sa physiologie, période durant laquelle une nouvelle biomasse remplace celle de l'année précédente.

Date	<i>Typha latifolia</i>		<i>Phalaris arundinacea</i>	
	Biomasse aérienne (dressée)	productivité	Biomasse aérienne (dressée)	productivité
	g m ⁻²	g m ⁻² jour ⁻¹	g m ⁻²	g m ⁻² jour ⁻¹
16 mai	29.0	1.45	--	--
10 juin	279.1	9.96	815.5	19.12
15 juillet	1095.3	23.35	1091.5	8.89
15 aout	1398.4	9.63	1136.4	1.18
16 septembre	1494.0	3.31	1352.7	9.32
21 octobre	1467	-0.76	--	--

Tableau 9.2-2 : Biomasse aérienne totale (ABG) et productivité journalière du *Typha latifolia* et du *Phalaris arundinacea* pour un marais d'eau douce du Wisconsin (43°31'N, 88°25'W)

Source : Klopatek et Stearns, 1978, table 4, p.324

[52-21] La Zizanie

Malgré une physionomie similaire au Phalaris (Figure 9.2-10), la Zizanie ne suit pas le même cycle de croissance étant une plante de bas marais. Tôt au printemps, à l'instar du Typha, les sites de Zizanie sont inondés avec peu ou pas de végétation émergente. Vers le mois de mai s'amorce une longue période de croissance suivie d'une transition brusque lorsque les phases de floraison et de fructification sont atteintes en juillet ; à partir du mois de juillet, la croissance de la Zizanie s'accélère et se poursuit jusqu'en septembre pour atteindre des biomasses avoisinant les 1.2 kg m⁻², si l'on exclut le système racinaire (Whigham et Simpson, 1977). La Figure 9.2-6 montre l'évolution de la biomasse aérienne et de la densité d'un peuplement typique de la Zizanie.

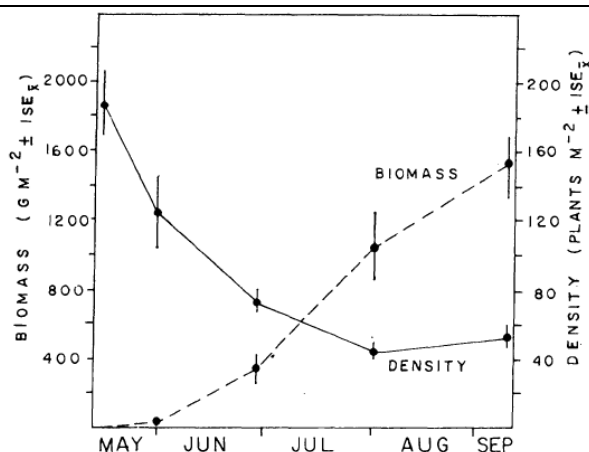





Figure 9.2-6 : Évolution saisonnière de la biomasse aérienne totale et de la densité d'un peuplement typique de *Zizania aquatica*

Source : Whigham et Simpson (1977)

9.2.3. Les physionomies herbacées moyennes [h1]

La classe physionomique [h1] des bas marais regroupe l'Éléocharide des marais et trois espèces de Scirpe. Cette classe physionomique se distingue surtout par une biomasse aérienne composée principalement de tiges dressées de taille moyenne (≈ 1 m) pour lesquelles la biomasse foliaire est très faible (Figure 9.2-7).

Espèce	Description
	<p>Tige dressée et non ramifiée, feuilles à la base habituellement au nombre de deux. Le scirpe des étangs s'installe à la limite de l'eau et de la terre; il s'avance par contre en eau assez profonde (2m) où il forme des colonies moins denses. Occupe parfois de grandes étendues et forme des colonies si denses que peu d'espèces réussissent à s'y infiltrer. Fleurbec (1987)</p>
<p>(A) [53-26] Scirpe des étangs (appelé aussi Scirpe lacustre) : <i>Scirpus lacustris</i> (<i>Schoenoplectus lacustris</i>)</p>	
	<p>Herbacée vivace, tige dressée et non ramifiée parfaitement triangulaire pouvant atteindre 1.5m. Croissant en petites ou très grandes colonies. Feuilles alternes, épaisses, disposées sur 3 rangs qui font chacune face à l'une des trois arêtes de la tige. En forme de ruban arqué (50 x 1.6cm). S'installe à la frontière de l'eau et de la terre, de préférence à de faibles profondeurs, il s'avance aussi en eau plus profonde, vers 1 à 1.5m (Fleurbec, 1987, p.332-333)</p>
<p>(B) [53-27] Scirpe des rivières : <i>Scirpus fluviatilis</i> (<i>Bolboschoenus fluviatilis</i>)</p>	
	<p>Tiges triangulaires longues de 0.2 à 1.3m. 1 à trois feuilles longues de 10 à 30 cm et paraissant continuer la tige. Flore Laurentienne (1995), p.694</p>
<p>(C) [53-20] Scirpe d'Amérique : <i>Scirpus Americanus</i> (<i>Schoenoplectus pungens</i>)</p>	


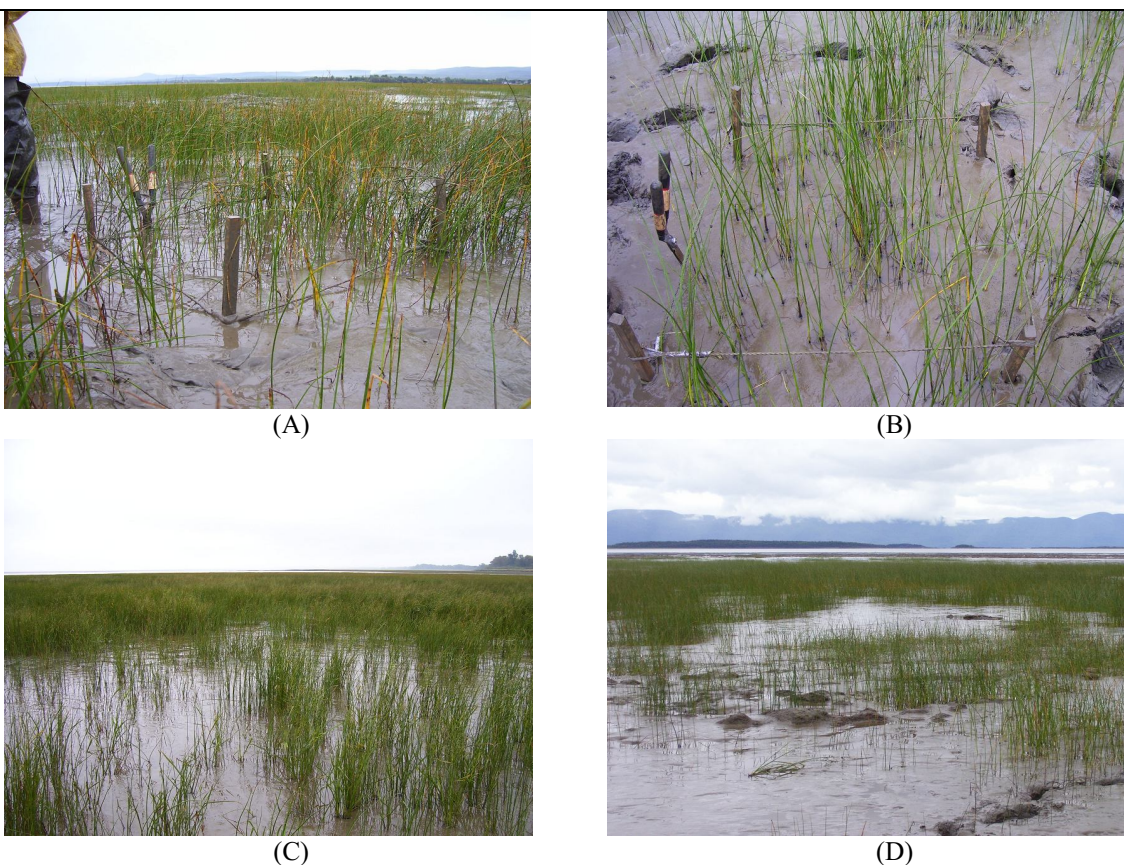
			<p>Tige dressée, feuilles peu nombreuses situées à la base de la tige et réduites à la gaine</p>
<p>(D) [53-31] Éléocharide des marais (<i>Eleocharis palustris</i>).</p>			
<p>Sources d'images : (A) Fleurbec (1987), p. 331; (B) University of Wisconsin, Cofrin Center for Biodiversity [page web consultée le 9 avril 2011 (http://www.uwgb.edu/biodiversity/herbarium/)]; (C) Integration and Application Network (IAN), University of Maryland Center for Environmental Science (http://ian.umces.edu/about/overview/); (D) Fleurbec (1987), p.322 et 323</p>			

Figure 9.2-7 : Principales espèces végétales de la physionomie herbacée moyenne 1 [h1]

La zonation verticale de ces espèces émergentes dans le bas marais est un élément qui les différencie. Au printemps la plupart des bas marais du lac Saint-Pierre sont complètement inondés. Ainsi plus un site se situe près de la limite du haut marais, plus rapidement il sera exondé, plus tôt émergera la végétation et plus dense elle aura tendance à l'être. Au contraire, les sites à la limite entre bas marais et eau peu profonde (ou libre) seront soit exondés tardivement ou demeureront inondés tout au long de l'année selon les conditions météorologiques de l'année concernée. La végétation sur ces sites aura tendance à être moins dense. Le Scirpe des rivières [53-27] est celui qui occupe les sites les moins profonds suivi du Scirpe américain [53-20] pour les sites de moyenne profondeur alors que l'Éléocharide [53-31] préfère les sites plus profonds (Auclair et *al.*, 1976, Hudon, 1997). Le Scirpe des rivières possédera ainsi le feuillage le plus abondant alors que le Scirpe américain et l'Éléocharide sont pratiquement dépourvus de biomasse foliaire. La Figure 9.2-8 montre quelques exemples des sites de Scirpe américain de faible densité.

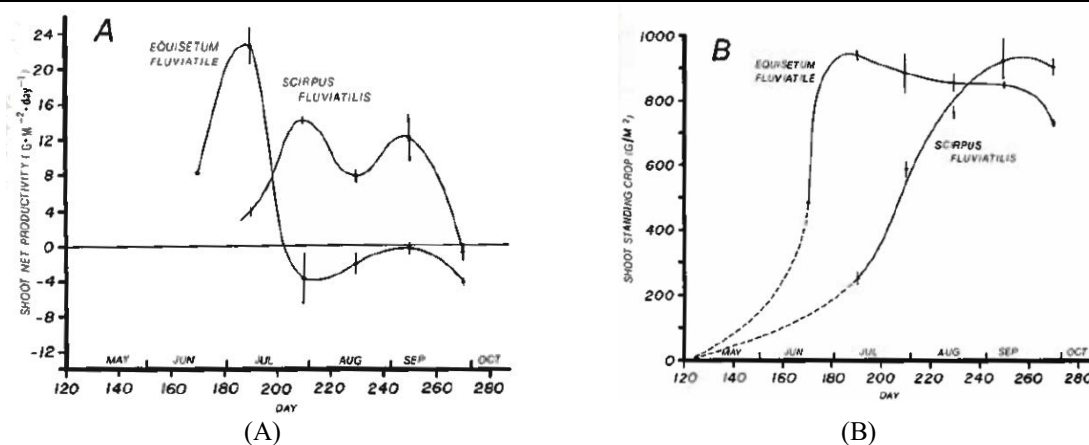


Note : Ces sites de Scirpes américains du bas marais de Montmagny (46°59'57N, 70°33'35W) ont été visités et échantillonnés par Gabriel Gosselin entre le 14 et le 15 Octobre 2009. Ils sont représentatifs des bas marais à Scirpes du lac Saint-Pierre.

Figure 9.2-8 : Scirpe américain [53-20], sites de faible densité

Les marais à Scirpe du lac Saint-François (45°04'N, 74°30'W, ≈180 km en amont du lac Saint-Pierre) ont été décrits et étudiés par Auclair et *al.* (1976) et aident à comprendre la dynamique des bas marais du Lac Saint-Pierre. Les marais étudiés par ces auteurs, d'une profondeur moyenne de 60 à 140 cm, étaient composés de végétation émergente (d'*Eleocharis*, *Equisetum*, *Phragmites* et *Scirpus*) formant une mosaïque de communautés végétales quasi monospécifiques. Il a été mentionné que pour les zones tempérées froides, les marais submergés d'eau douce constituaient la communauté végétale dont la productivité nette est la plus forte (Odum, 1971 et Westlake, 1963, cités dans Auclair et *al.*, 1976). Pour ces communautés, une productivité moyenne de 4500 g m⁻² an⁻¹ a été mesurée sur les sites fertiles comparés à 1200 et 3800 g m⁻² an⁻¹ pour les forêts de feuillus et de conifères respectivement ou encore 3000 g m⁻² an⁻¹ pour les marais salés. Dans les marais submergés (bas marais), le Scirpe lacustre (*Scirpus lacustris*) est celui dont la productivité est la plus forte avec 4600 g m⁻² an⁻¹ (Auclair et *al.*, 1976). Les principales raisons qui expliquent cette forte productivité sont un apport suffisant et constant en eau, la présence d'une grande quantité de nutriments

provenant du lessivage des hautes terres avoisinantes et par la faible activité des herbivores dans ces milieux. À titre d'exemple, la Figure 9.2-9 illustre les variations de la productivité et de la biomasse de la *Scirpe fluviatile* pendant la saison de croissance.



Note : L'appellation latine *Scirpus fluviatilis* est aujourd'hui remplacée par *Bolbosch oenus fluviatilis*.

Figure 9.2-9 : (A) Production nette journalière ($\text{g m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$) et (B) évolution de la biomasse aérienne (g m^{-2}) au cours de la saison de croissance pour la prêle fluviatile (*Equisetum fluviatile*) et la Scirpe fluviatile (*Scirpus fluviatilis*)

Source : Auclair et al., (1976), fig.3, p.947

Sa productivité nette est bimodale avec un fort pic de production en juillet ($12.90 \text{ g m}^{-2} \text{ jours}^{-1}$) et un autre en septembre ($4.73 \text{ g m}^{-2} \text{ jours}^{-1}$). Alors que le premier pic est associé de près aux températures maximales et un déficit de pression de vapeur alors que le second pic de croissance est associé au décalage du cycle de croissance des rhizomes comparativement aux feuilles et aux tiges (Auclair et al., 1976).

La prêle fluviatile pour sa part présente un très fort pic de croissance survenant avant celui du Scirpe en juin et sa biomasse totale atteint rapidement son maximum vers la fin juin et décroît par la suite alors que celle du Scirpe augmente progressivement entre juillet et septembre.

9.2.4. Physionomies arborées [A1], arbustives [A2] et arbrisseaux [A3]

Les physionomies arborées [A1] et arbustives [A2] ont été extraites de la carte écoforestière du Québec. Pour ce faire, la classe de hauteur a été utilisée en attribuant les classes 1 à 4 aux physionomies arborées et les classes 5 et 6 aux physionomies arbustives (Tableau 9.2-3). Cette frontière établie à 7 m entre les deux physionomies est de plus en accord avec les définitions rapportées dans la section 7.2.

		Classes de hauteur						
		22m	17m	12m	7m	4m	2m	
		<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	
Classes de densité	100%	<u>A</u>	A1	A2	A3	A4	A5	6
	80%	<u>B</u>	B1	B2	B3	B4	B5	6
	60%	<u>C</u>	C1	C2	C3	C4	C5	6
	40%	<u>D</u>	D1	D2	D3	D4	D5	6
	25%							

Source : NCÉCO (2003), Tab.13, p.42, reproduction de la table originale.

Note 1 : La densité des peuplements des classes de hauteur 6 n'est pas spécifiée.

Tableau 9.2-3 : Classes de densité et de hauteur des peuplements forestiers de la carte écoforestière du Québec

De plus, le champ [TEC_CO_TEC] de la carte écoforestière permet l'identification des milieux humides arborés et arbustifs. Ce champ contient une série de codes à quatre caractères décrivant le type écologique du peuplement, le dernier caractère de ce code permet d'identifier les classes suivantes (Ménard et *al.*, 2006) :

- i. **Les marécages arborés pauvres** dont le code TEC_CO_TEC se termine par le chiffre 7 (c.-à-d. dépôt minéral mince à épais, de drainage hydrique, ombrotrophe);
- ii. **Les marécages arborés riches** dont le code TEC_CO_TEC se termine par le chiffre 8 (c.-à-d. dépôt organique ou dépôt minéral de mince à épais, de drainage hydrique, minérothrophe);
- iii. **Les tourbières boisées** dont le code TEC_CO_TEC se termine par le chiffre 9 (c.-à-d. dépôt organique, de drainage hydrique, ombrotrophe).

Pour les trois classes précédentes, la densité (CDE_CO) et la hauteur moyenne du couvert forestier (CHA_CO) sont généralement connues de même que le type de couvert et le groupement d'essences. Des classes de milieux humides supplémentaires sont présentes dans le champ terrain (TER_CO) qui regroupe tous les terrains à vocation non forestière ainsi que les terrains forestiers improductifs. Les classes suivantes ont été extraites :

- iv. **Les marécages inondés** (TER_CO="INO");

- v. **Les marécages arbustifs** (TER_CO="AL") désignant surtout les Aulnaies mais ne s'y limitant pas;

L'information précédente ainsi que les différentes classes de marécages présentes sur la carte des milieux humides du centre Saint-Laurent (Tableau 9.2-1) ont permis d'établir des sous-classes de physionomies arborées ou arbustives en fonction de leur appartenance à un milieu sec ou humide.

La classe des **zones dénudées humides** (TER_CO="DH") de la carte écoforestière a été le point de départ pour l'identification de la classe physionomique des arbrisseaux [A3]. Cette classe « *correspond aux milieux humides exempts d'arbres ou d'arbustes... qui peut contenir une grande diversité de milieux humides* » (Ménard et al., 2006). Pour cette classe la densité et la hauteur moyenne du couvert forestier ne sont pas connues. Pour le secteur d'étude, les zones dénudées humides se trouvaient surtout dans le secteur de la Tourbière de la Baie des Mines qui comprenaient à la fois des bogs à Éricacées et des fens herbacés pauvres.

Moore et al. (2002) ont publié des mesures de biomasses pour différentes espèces végétales (Tableau 9.2-4) présente à la tourbière de la Mer Bleue (45°24'02''N, 75°29'34''W, 12 km à l'est d'Ottawa). Bien que le jeu des transpositions appelle toujours à la prudence²², il est possible d'utiliser ces données pour obtenir une esquisse des biomasses typiques de la tourbière de la Baie des Mines. Ainsi, les sphaignes comptent pour 30% de la biomasse totale du Bog contre 50% dans le cas des Fens Pauvres et que la biomasse aérienne moyenne totale du fen pauvre est de 3.17 kg m⁻² contre 4.87 kg m⁻² pour le Bog. Il existe une bonne relation entre la hauteur moyenne de la nappe phréatique et le type de végétation que l'on retrouve en surface. Les physionomies herbacées des fens pauvres dominent lorsque la hauteur moyenne de la nappe phréatique atteint -30 cm sous la surface (Moore et al., 2002, fig. 1). Le même phénomène a été observé à la tourbière de la Baie des Mines où la tourbe moins épaisse de la portion sud est dominée par des formations herbacées.

²² L'auteur a visité à quelques reprises les deux tourbières et la végétation y est similaire tant pour les espèces végétales en présence que pour leurs dimensions moyennes.

Site	Species	Above-ground biomass (g m ⁻²)	
		Leaf	Shoot
Bog	<i>Chamaedaphne calyculata</i>	52 (68)	72 (78)
	<i>Kalmia angustifolia</i>	52 (58)	41 (46)
	<i>Ledum groenlandicum</i>	28 (42)	22 (32)
	<i>Vaccinium myrtilloides</i>	13 (25)	16 (30)
	<i>Maianthemum trifolium</i>		2 (3)
	Sedges (<i>Eriophorum</i> spp.)		8 (17)
	Other vascular plants*		37 (46)
	<i>Sphagnum capitula</i>		144 (39)
	Total		487 (93)
Poor-fen	Sedges (<i>Carex oligosperma</i> and <i>Eriophorum</i> spp.)		118 (51)
	<i>Kalmia angustifolia</i>	29 (40)	10 (13)
	<i>Sphagnum capitula</i>		160 (22)
	Total		317 (36)

Note1 : Les chiffres entre parenthèses correspondent aux écarts types entre les quadrants.

Note 2 : Superficie des quadrants : 0.5m x 0.5m.

Tableau 9.2-4 : Biomasses aériennes moyennes (g m⁻²) pour un site de Bog et un site de Fen pauvre de la tourbière de la Mer Bleue

Source : Moore et al. (2002), table 1, p.28

Tourbière de la Baie des Mines : photo-interprétation et données terrain

Une photo-interprétation de la tourbière de la Baie des Mines a été réalisée à partir d'une image Ikonos-2 acquise le 2 juin 2005 (Figure 9.2-10). L'objectif de cette photo-interprétation consistait à distinguer les secteurs de tourbières ouvertes (arbrisseau ou herbacé) des secteurs boisés (de diverse densité). Deux visites sur le terrain ont eu lieu soit le 3 novembre 2009 ainsi que les 26 et 27 novembre 2009. Ces visites ont eu pour objectif l'identification des principales espèces végétales et la validation de photo-interprétation. Lors de deuxième visite sur le terrain, qui s'est concentrée dans le secteur sud de la tourbière (Figure 9.2-12), les mesures suivantes ont été colligées :

- i. L'épaisseur de la couche de tourbe (acrotelme + catotelme) ;
- ii. Évaluation qualitative de la saturation en eau de la surface de la tourbière en fonction de la quantité et de la rapidité de l'accumulation d'eau au moment de la mesure de l'épaisseur de la tourbe. Une échelle qualitative de 1 à 5 (1=très saturé, 2, saturé, 3=moyennement saturé, 4= peu saturé et 5 très peu saturé) ;
- iii. Une description des espèces végétales dominantes avec quelques mesures dont la hauteur moyenne de l'espèce d'Éricacées dominante;
- iv. Des photographies pour tous les sites visités.

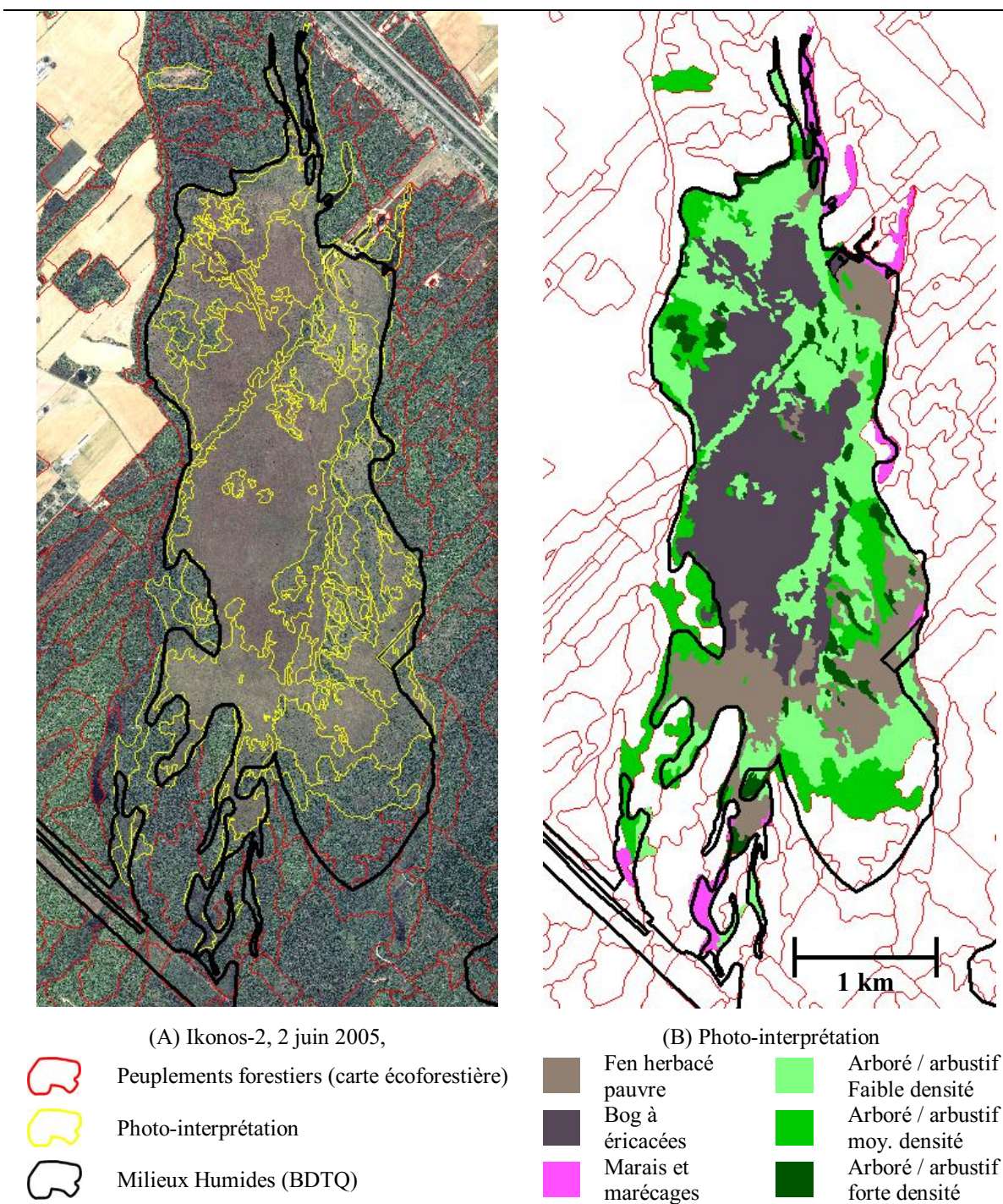


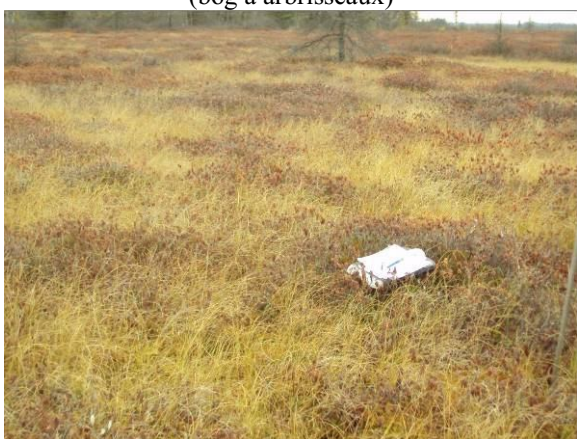
Figure 9.2-10 : Photo-interprétation de la tourbière de la Baie des Mines



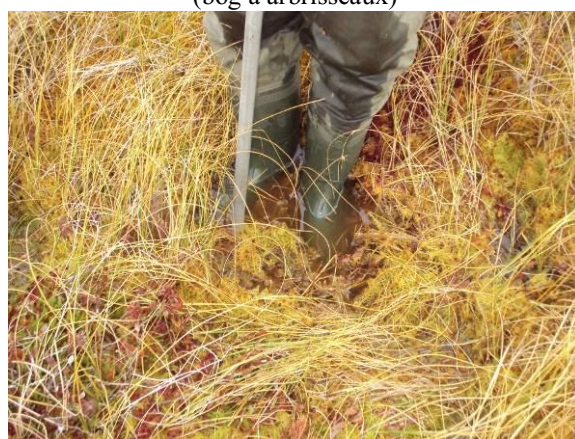
(A1) [A3] Tourbière ouverte, vue oblique
(bog à arbrisseaux)



(A2) [A3] tourbière ouverte, vue au sol
(bog à arbrisseaux)



(B1) [h2] Fen herbacé pauvre, vue oblique



(B2) [h2] Fen herbacé pauvre, vue au sol

Figure 9.2-11 : Photographies au sol de la tourbière de la Baie des Mines, 26 novembre

2009

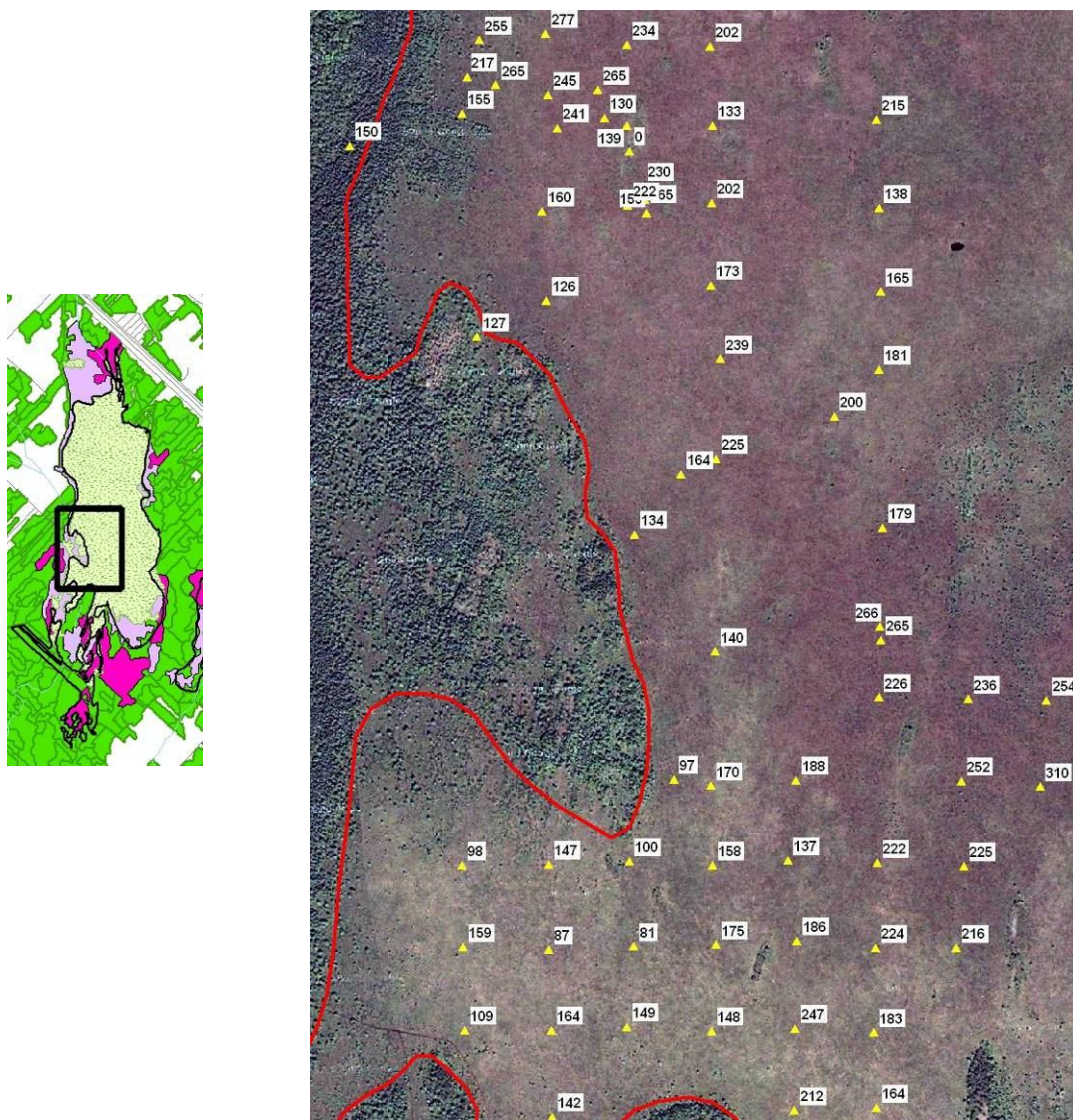


Figure 9.2-12 : Tourbière de la Baie des mines, profondeur de la tourbe (cm)

9.3. Création d'une base de données sur les physiologies végétales

Compte tenu des dates d'acquisition des données ALOS et RS2 nous avons procédé à l'établissement des deux bases de données incluant les objets par physiologie végétale à l'étude. Le Tableau 9.3-1 résume les sources de données utilisées pour la constitution de ces bases de données. Des détails sur les méthodes employées pour extraire l'information de ces sources de données sont donnés par la suite. Nous tenons à rappeler ici que les classes physiologiques des champs seront utilisées comme "classes témoins" auxquelles seront comparées des classes de physiologies équivalentes situées dans les milieux humides. Cela

servira à la fois à augmenter la profondeur et la portée de nos analyses ainsi qu'à étudier le problème (non résolu) de la séparation entre milieux humides et milieux secs.

	ALOS-PALSAR PLR	RADARSAT-2
I -Physionomies des champs (dénudées, herbacées, autres)	* Classification non-supervisée Landsat-5 du 5 novembre 2006.	* Base de données des cultures assurées (BDCA)
II -Physionomies des milieux humides	* Carte écoforestière * Classification Centre Saint-Laurent * Interprétation d'une image Ikonos-2	* Carte écoforestière * Classification Centre Saint-Laurent * Interprétation d'une image Ikonos-2
III -Physionomies arborées et arbustives	* Carte écoforestière * Classification non-supervisée Landsat-5 du 5 novembre 2006.	* Carte écoforestière * Classification non-supervisée Landsat-5 du 5 novembre 2006.

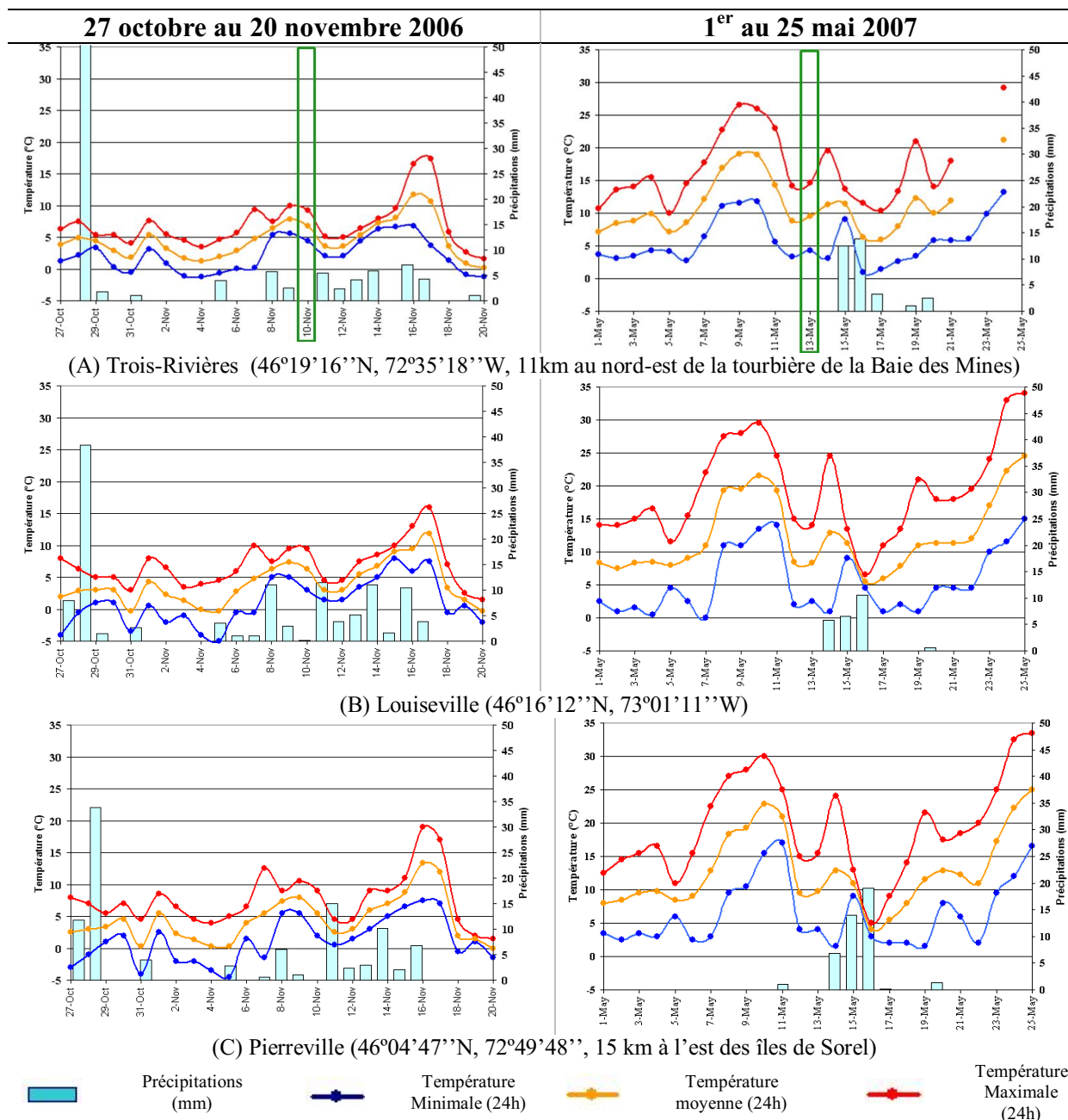
Tableau 9.3-1 : Sources des données sur les physionomies végétales à l'étude

9.3.1. ALOS-PALSAR PLR (2006-2007)

Les données ALOS-PALSAR PLR disponibles pour la région du lac Saint-Pierre (Tableau 8.3-1) ont été acquises tôt au printemps (mai 2007) ou tard à l'automne (novembre 2006). Ainsi la majorité des physionomies végétales des marais étaient soit dans un état de sénescence avancée ([H2]) ou absentes ([H1], [h1]...). Il n'a donc pas été possible d'utiliser la carte des milieux humides du Saint-Laurent (chapitre 7) pour l'ensemble des physionomies végétales. Deux images Landsat-5 acquises à quelques jours d'intervalle des images ALOS (Tableau 8.4-1) ont été utilisées pour extraire les classes physiologiques.

Les deux images ALOS ont été acquises selon des conditions météorologiques différentes. Les données recueillies par trois stations météorologiques de la région du lac Saint-Pierre (Figure 9.3-1) montrent que les données du 10 novembre ont été acquises dans des conditions fraîches et humides. Dans la dizaine de jours précédant l'acquisition, la température diurne s'est maintenue autour de 5°C pour descendre près du point de congélation au cours de la nuit. De faibles mais constantes précipitations (de 3 à 4 mm en moyenne) ont eu lieu à chaque jour ou presque au cours de cette période et la dernière précipitation d'importance avait eu lieu le 28 octobre 2006 où plus de 50 mm ont été enregistrés à la station de Trois-Rivières (Figure 9.3-1-A). Ces conditions météorologiques particulières ont permis d'obtenir à la fois des physionomies dénudées sèches et des physionomies dénudées humides. Il est important de noter que les conditions météorologiques n'ont pas montré d'évolution majeure entre le 5 et 10

novembre 2006. Cette stabilité assurait la représentativité des conditions au sol de la carte des physionomies végétales du 5 novembre six jours plus tard lors de l'acquisition ALOS et ainsi sa validité comme support des analyses.



Source (données brutes) : Environnement Canada, archives nationales d'information et de données climatiques. http://climat.meteo.gc.ca/climateData/canada_f.html

Figure 9.3-1 : Conditions météorologiques enregistrées pour trois stations de la région du lac Saint-Pierre à l'automne 2006 et au printemps 2007

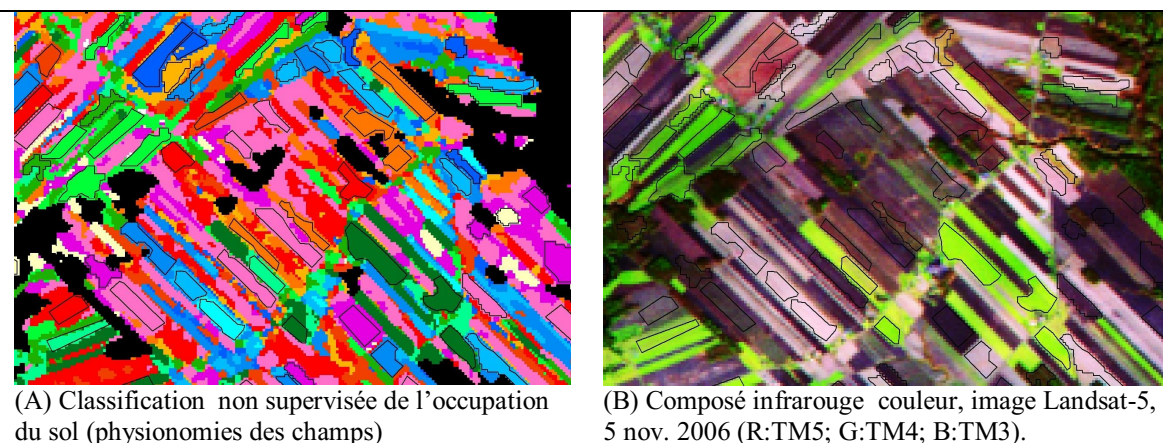
Les conditions météorologiques de la région du lac Saint-Pierre entre le 8 et le 13 mai 2007 ont été douces et sèches. Aucune précipitation n'est survenue dans les 8 jours précédents l'acquisition Landsat-7 (8 mai 2007) et seulement 1mm de pluie a été enregistré à la station de Sorel le 11 mai 2008. La température diurne moyenne s'est maintenue autour de 10°C entre les acquisitions Landsat et ALOS du printemps 2008.

L'analyse des images ALOS mettra l'accent sur la compréhension de la signification physique des paramètres de Touzi et leur sensibilité face à différents facteurs (biomasse, rugosité, humidité). Les conditions humides pour le couple d'images de novembre 2006 ont été très favorables à la diversité des classes. Pour extraire ces classes, l'algorithme ISODATA a été utilisé pour la classification non supervisée des bandes spectrales TM2, TM3, TM4 et TM5. Cette classification s'est déroulé en 7 étapes soit :

- i. Le masquage manuel des zones nuages et des zones affectées par un voile nuageux par un examen des bandes spectrales du visible (TM1, TM2, TM3);
- ii. La création d'un masque des physiologies arborées et arbustives en utilisant la couche vectorielle des forêts de la BDTQ;
- iii. La mise à jour manuelle du masque des physiologies forestières en éliminant du masque les secteurs où la forêt a été remplacée par une autre occupation du sol;
- iv. La classification des occupations du sol en milieu agricole;
- v. La classification des occupations du sol sous le masque forestier;
- vi. L'interprétation des deux classifications et l'assignation d'une étiquette à chaque classe spectrale;
- vii. La création d'une base de données constituée d'objets vectoriels.

Le nombre de classes (étapes iv et v) a été déterminé en partie par essai-erreur en recherchant un compromis entre un nombre suffisant de classes spectrales et la généralisation des résultats. Ce compromis a été atteint autour d'une vingtaine de classes pour les milieux agricoles, c.-à-d. qu'à partir de ce nombre les différentes classes spectrales ont commencé à épouser la forme des champs. Le même principe a été appliqué pour la classification des physiologies arborées sous le masque forestier. L'interprétation (vi) des résultats a été très méticuleuse et a reposé sur une analyse de la signature spectrale de chaque classe. Cette analyse est présentée en annexe 2. La dernière étape fut la création d'une base de données vectorielle (Figure 9.3-2) où

une série d'objets ont été manuellement numérisés pour chaque classe spectrale d'utilisation du sol.



(A) Classification non supervisée de l'occupation du sol (physionomies des champs)

(B) Composé infrarouge couleur, image Landsat-5, 5 nov. 2006 (R:TM5; G:TM4; B:TM3).

Figure 9.3-2 : Création des objets vectoriels à partir de la classification non supervisée

ISODATA

Au total, 3054 objets appartenant à 25 classes spectrales ont été numérisés. Les physiognomies identifiées se répartissent en trois groupes soit les physionomies des champs, les physionomies arbustives et arborées et celles des milieux humides. Le groupe des physiognomies des champs contient un amalgame de physiognomies dénudées sèches (c13, c15, c16 et c17) ou dénudées humides (c1, c4, c8). Entre ces deux extrêmes on retrouve une série de physiognomies dénudées moyennement humides avec ou sans résidus de cultures (c5, c7, c12, c14) et une classe de physiognomies herbacées sur substrat sec (c6, c9, c10, c11).

Plusieurs objets ont dû être éliminés de l'analyse temporelle (Figure 9.3-2-C) dû à la présence de nuages sur l'image Landsat du 8 mai 2008. Notons que les rives du Lac Saint-Pierre où se situent la majorité des marécages étaient couvertes de nuages pour les deux images Landsat. Le nom de la classe spectrale d'origine (c1, c2...c191, Tableau 9.3-2) a été conservé pour l'ensemble des analyses contenues dans la partie IV en plus de la classe physiognomique attribuée par interprétation. Cela fut fait pour vérifier la robustesse du regroupement des classes spectrales en classes physiognomiques et pour faciliter, le cas échéant, l'interprétation de sous-classes physiognomiques parmi l'ensemble des objets. Cette numérotation diffère légèrement de celle présentée aux Tableaux 9.2-1 et 9.2-3 puisqu'il n'a pas été possible, nous le rappelons, d'utiliser la classification des milieux humides du Saint-Laurent pour identifier des classes de bas marais.

Classes physiologiques (en date du 5 novembre 2006)			A) Alos 10 nov.2006 et Alos 13 mai 2007		B) Commun avec L5 (5nov. 2006)		C) Commun avec L5 et L7 (8 mai 2007).	
			nb. obj.	Σ pixels	nb. obj.	Σ pixels	nb. obj.	Σ pixels
I) Physiologies des champs								
[D] c1	●	Phys. dénudée très humide	59	31 749	59	5181	53	4453
[D] c4	●	Phys. dénudée très humide	82	34 714	82	5905	72	4955
[D] c8	■	Phys. dénudée très humide	194	123 786	194	19 860	179	17849
[D] c5	■	Phys. dén. hum & résidus culture	81	34 746	81	5751	59	3545
[D] c7	■	Phys. dén. hum & résidus culture	43	16 718	43	2878	26	1624
[D] c12	■	Phys. dén. hum & résidus culture	190	137 265	190	21 980	161	17 382
[D] c14	■	Phys. dén. hum & résidus culture	146	83 339	146	13 409	120	10 250
[h1] c6	■	Phys. herbacée sur substrat sec	90	37 111	90	6194	75	5204
[h1] c9	■	Phys. herbacée sur substrat sec	185	112 818	185	18 251	156	13890
[h1] c10	▼	Phys. herbacée sur substrat sec	131	51 175	131	8623	118	7236
[h1] c11	▲	Phys. herbacée sur substrat sec	160	79 275	160	12 912	134	9576
[D] c13	■	Phys. dénudée sèche	91	37 236	91	6483	56	3444
[D] c15	■	Phys. dénudée sèche	120	67 194	120	11 049	104	8563
[D] c16	▼	Phys. dénudée sèche	103	49 198	103	8281	95	6558
[D] c17	◆	Phys. dénudée sèche	72	34 067	72	5680	54	3574
<i>Sous-total 1</i>			<i>1747</i>	<i>926 391</i>	<i>1747</i>	<i>134186</i>	<i>1462</i>	<i>118103</i>
II) Physiologies des milieux humides								
[A2] c21	■	Tourbière boisée	40	9128	40	1462	38	1197
[A3] c61	■	Tourbière ouverte (arbrisseaux)	56	9053	56	1452	56	1418
[H2] c171	■	Marais herbacé	73	11621	--	--	--	--
[A2] c181	■	Marécages arbustifs	40	7857	--	--	--	--
[A1] c191	▲	Marécage arborés	192	29 971	8	205	8	205
<i>Sous-total 2</i>			<i>401</i>	<i>67 630</i>	<i>104</i>	<i>3119</i>	<i>102</i>	<i>2820</i>
III) Physiologies arborées des milieux secs								
[A1] c91	■	P. Con ou P. mixte très humide et/ou canopée très ouverte (o10).	172	26 860	172	4373	138	3348
[A1] c92	■	P. Con ou P. mixte humide et /ou contribution bio. foliaire (o11).	367	57 604	367	92 22	347	8268
[A1] c94	■	P. Con ou P. mixte humide et /ou contribution bio. foliaire (o11).	163	26 893	163	4306	88	2164
[A1] c93	▼	Peuplement de feuillus sans feuilles (o12).	135	28 806	135	5125	68	2447
[A1] c95	◆	Peuplements de feuillus sans feuilles (o13).	69	16 105	69	2799	55	1956
<i>Sous-total 3</i>			<i>906</i>	<i>156 268</i>	<i>906</i>	<i>25 825</i>	<i>696</i>	<i>18183</i>
Total			3054	1150289	2757	163210	2260	139 106
Note 1 : Résolution spatiale d'un pixel Landsat= 30x30m vs 12x12m pour Alos-Palsar.								
Note 2 : Consulter l'annexe 2 pour une description détaillée de chaque classe.								
Note 3 : Les objets des physiologies des milieux humides ont été extraits carte des milieux humides du lac Saint-Pierre et par la photo-interprétation de la tourbière de la Baie des Mines								

Tableau 9.3-2 : Répartition du nombre d'objets et d'échantillons par classe de physiologie végétale

9.3.2. RADARSAT-2 (2009)

En utilisant la même méthodologie que celle décrite à la section précédente, une série d'objets vectoriels ont été numérisés (Figure 9.3-3). La disponibilité des images RS2 pour l'ensemble de la saison 2009 a permis d'étudier les marais. Les physionomies retenues ainsi que le nombre d'objets par physionomies sont énumérées au Tableau 9.3-3.

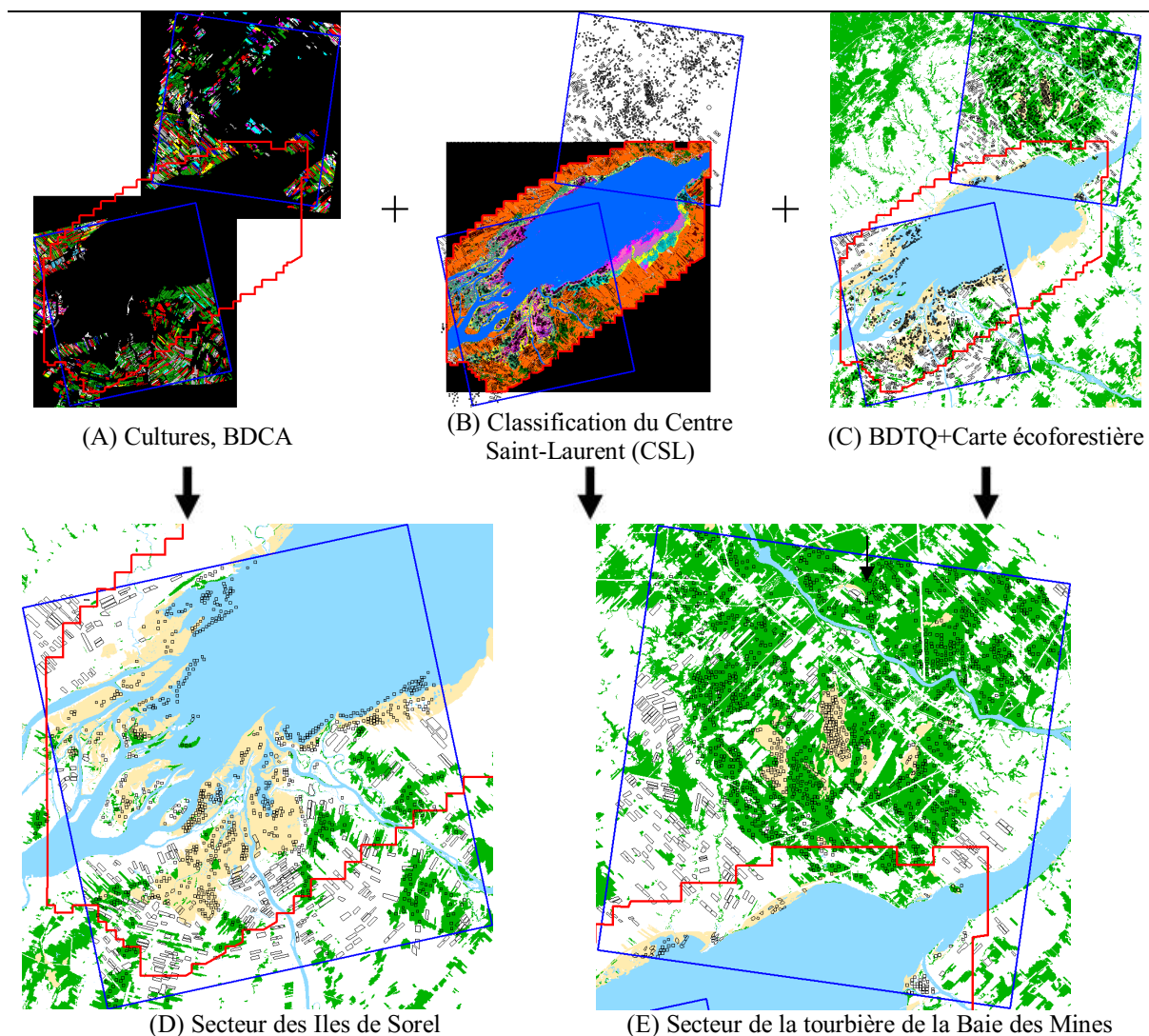


Figure 9.3-3 : Carte des objets vectoriels RADARSAT-2

Code Physionomies	Code CSL	Nom de la classe	FQ21D objets	FQ15A objets	Note	source
I) Physionomies des champs						
[h1]	1-1	Foin	54	66		BDCA
[H1]	2-2	Mais	86	179		BDCA
[h1]	3-3	Blé	22	114		BDCA
[h2]	6-6	Soya	73	126		BDCA
II) Physionomies des milieux humides						
II.1) Herbacée haute 1						
[H1]	51-38	Typha. Sp	--	114	B.M	CSL
[H1]	51-35	Acorus Calamus	--	19	B.M	CSL
II.2) Herbacée haute 2						
[H2]	52-88	Phalaris arundinacea	3	120	H.M	CSL
[H2]	52-21	Zizania Sp.	--	24	B.M	CSL
[H2]	52-89	<i>Calamagrostis canadensis</i>	15	--	H.M	CSL
II.3) Herbacée moyenne 1						
[h1]	53-26	Scirpus lacustris	17	50	B.M	CSL
[h1]	53-20	Schoenoplectus pungens (syn. <i>Scirpus Americanus</i>)	--	25	B.M	CSL
[h1]	53-27	Bolboschoenus fluviatilis (syn. <i>Scirpus fluviatilis</i>)	--	41	B.M	CSL
[h1]	53-31	Eleocharis sp.	--	18	B.M	CSL
[h1]	73-241	Tourbière ouverte (Carex sp.)	12	--	Fen	Interpretation
II.4) Herbacée moyenne 2						
[h2]	54-32	Butomus Umbellatus	--	4	B.M	CSL
II.5) Arbrisseaux						
[A3]	73-241	Tourbière ouverte	48	--	Bog	Interpretation
II.6) Arbustif						
[A2]	73-241	Tourbière boisée	40	--	Bog	Interpretation
[A2]	62-62	Marécage arbustif	--	51		CSL
II.7) Arboré						
[A1]	61-130	Marécage Arboré (<i>Acer saccharinum</i>)	34	58	Classes D/H confondues	CSL
[A1]	61-130	Marécage Arboré	29	181		CSL
III) Physionomies arborées des milieux sec						
[A1]	61-63	Phys. arborés substrat sec. Cl 1	1181	--	Classes D/H confondues	SIEF
[A1]	61-64	Phys. arborés substrat sec. Cl 2	159	--		SIEF
[A1]	61-65	Phys. arborés substrat sec	--	196		SIEF
Note 1 : Se référer au tableau 9.2-1 pour une définition des classes physionomiques						
Note 2 : CSL : Centre Saint-Laurent, SIEF : Carte écoforestière du Québec, BDCA : Base de données des cultures assurées du Québec, B.M : Bas marais, H.M : Haut marais						

Tableau 9.3-3 : Répartition du nombre d'objets par classe physionomique

Pour assurer la représentativité des objets deux stratégies ont été adoptées soit :

- i. Autant que possible, la numérisation des objets dans les secteurs homogènes (non pixélisée) des diverses sources de vérité terrain et en particulier pour la classification du centre Saint-Laurent (d'une résolution originale de 4m);

- ii. Une superficie minimale de 150m x 150m et de forme carrée pour minimiser les effets de bordures, c'est-à-dire limiter l'influence des pixels de bordure sur les statistiques de l'objet.

En ce qui concerne les objets appartenant aux physiologies arborées les objets ont été sélectionnés pour représenter le maximum de classes de Densité/Hauteur pour les peuplements de feuillus et de conifères. Notons finalement que seuls les objets des tourbières ouvertes et boisées ainsi qu'une portion des objets des marécages arborés et arbustifs sont les mêmes que ceux utilisés pour l'analyse basée sur les données ALOS. Si l'analyse RS2 bénéficiera en général des conclusions obtenues par l'analyse ALOS, la comparaison directe d'objets à objets n'était pas un objectif de cette thèse.

PARTIE IV : ANALYSE DES DONNÉES POLARIMÉTRIQUES ALOS-PALSAR POUR L'IDENTIFICATION DES PHYSIONOMIES VÉGÉTALES

Cette partie (chapitres 10 et 11) est dédiée aux analyses de paramètres polarimétriques de la décomposition de Touzi appliquée aux données ALOS afin d'établir leur apport à la caractérisation des physionomies végétales. Bien que les acquisitions ALOS se soient réalisées en dehors de la période végétative (tard à l'automne et tôt au printemps), plusieurs physionomies sont tout de même présentes et les milieux agricoles de la région offrent plusieurs classes d'humidité et de rugosité dont l'effet sur les paramètres polarimétriques peut être évalué. Le chapitre 9 porte sur l'analyse exhaustive des paramètres de la décomposition de Touzi tandis que le chapitre 10 présente les analyses sur leur potentiel pour différencier des classes de physionomie végétale.

CHAPITRE 10

10. SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES DE LA DÉCOMPOSITION DE TOUZI AUX CARACTÉRISTIQUES DES PHYSIONOMIES VÉGÉTALES

Ce chapitre porte sur les analyses de sensibilité des paramètres de la décomposition de Touzi aux caractéristiques des physionomies végétales. Compte tenu du nombre de paramètres à étudier, dont la signification physique reste pour la plupart encore mal connue, nos analyses seront effectuées uniquement à partir des objets représentant les différentes classes physionomiques telles qu'établies dans la base de données spécifique aux acquisitions ALOS (cf. §9.3.1, Annexe 2). Dans certains cas, pour illustrer notre propos nous considérerons l'ensemble des données.

La section 10.1 présente l'analyse du comportement de canaux de polarisation σ_{hh}^0 , σ_{vv}^0 , σ_{hv}^0 , ce qui servira comme base pour les comparaisons dans les sections subséquentes (10.2 à 10.8) où il sera question des paramètres polarimétriques de la décomposition de Touzi. Dans certaines sections nous présenterons des comparaisons avec d'autres paramètres standards comme la différence de phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ ainsi que les canaux de polarisation circulaire.

10.1. Les canaux de polarisation

Cette analyse concerne les données ALOS du 10 novembre 2006. À la fin de la période végétative, les physionomies végétales étudiées se répartissent grosso modo selon trois axes dans l'espace formé des canaux de polarisation σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 (Figure 10.1-1-A) :

- i. Axe 1 : le long de cet axe s'alignent les physionomies ayant une réponse σ_{hh}^0 équivalente à σ_{vv}^0 . En deçà d'une valeur $\sigma_{hh}^0 \approx \sigma_{vv}^0 \approx 0.45$ (soit -6.9dB) nous retrouvons les physionomies herbacées sur substrat sec et au-delà de cette valeur les physionomies dénudées humides. Les physionomies dénudées sèches peuvent se trouver de part et d'autre de cette valeur seuil et on les trouve même alignées selon l'axe 2;

- ii. Axe 2 : ici s'alignent les physionomies ayant une réponse σ_{hh}^0 légèrement supérieure à σ_{vv}^0 . Ce sont surtout les physionomies arborées (c91 à c95) qui ont une tendance évidente à se regrouper autour de cet axe. Ceci pourrait s'expliquer par une plus grande atténuation de σ_{vv}^0 . La capacité de la polarisation VV à pénétrer la canopée est moindre que celle de la polarisation HH du à la présence de branches et de troncs d'une orientation majoritairement verticale (Fung, 1994 p.508) ce qui cause une atténuation accrue (Fung, 1994 p.511). La polarisation VV tend donc à saturer à des niveaux plus faibles de biomasse (Dobson et al., 1995b).
- iii. Axe 3 : les physionomies ayant une réponse σ_{hh}^0 définitivement supérieure à σ_{vv}^0 sont alignées le long de cet axe. L'ensemble des physionomies arbustives et arborées des marécages (c181 et c191) se regroupent autour de cet axe. Ceci pourrait s'expliquer par la présence d'une composante de rétrodiffusion double-bond qui favorise la polarisation horizontale.

Les classes physionomiques des tourbières ouvertes (c61) et boisées (c21) de même que les marais herbacés [c171], ici composés quasi exclusivement de Phalaris (*Phalaris arundinacea*), sont confondus avec les autres classes physionomiques.

Si l'on remplace σ_{vv}^0 par σ_{hv}^0 nous pouvons constater que (Figure 10.1-1-B) :

- i. Les physionomies herbacées sur substrat sec et les physionomies dénudées humides présentent un comportement analogue à celui observé précédemment en s'alignant le long d'un axe linéaire. Les physionomies dénudées sèches n'ont toujours pas un comportement clair en se répartissant un peu partout dans cet espace.
- ii. Les physionomies arborées des milieux secs ou humides se démarquent nettement relativement aux autres physionomies à cause de leurs plus fortes rétrodiffusions en σ_{hv}^0 (>0.25 soit -12.1dB), dues notamment aux diffusions multiple et volumique.
- iii. Il y a trois regroupements d'objets qui se dégagent plus ou moins nettement. Le premier (indiqué 1 sur Figure 10.1-1-B) inclut principalement des tourbières ouvertes composées soit de d'arbrisseaux [A3] ou de physionomies herbacées [H2] qui se distinguent ainsi nettement des autres physionomies. Ceci peut être considéré comme un apport important du canal σ_{hv}^0 . Les autres regroupements indiqués comprennent des mélanges des

physionomies. Ainsi les marais herbacés se confondent avec plusieurs objets des physionomies dénudées sèches (regroupement 2) tandis qu'elles se confondent avec des forêts sur substrats secs (regroupement 3). Le canal σ_{hv}^0 qui s'est donc montré plus sensible à la structure des physionomies arborées n'est cependant pas en mesure de distinguer nettement les forêts des milieux secs des marécages arborés ou arbustifs.

La représentation des objets dans un espace formé des rapports entre canaux de polarisation $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ et $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{hv}^0$ fait mieux ressortir les différences structurales des classes physionomiques tout en diminuant les contingences environnementales dues aux variations d'humidité et de rugosité (Figure 10.1-1-C). Ainsi :

- i. Tel qu'entendu par les tendances signalées précédemment, la majorité des objets des physionomies dénudées sèches (c6, c9, c10, c11, c13, c15, c16, c17) ou humides (c1, c4, c8, c5, c7, c12, c14) forment maintenant un groupe distinct, à l'exception notable d'un sous-ensemble d'objets des physionomies dénudées sèches (regroupement indiqué D sur la figure 10.1c).
- ii. Un regroupement (indiqué C) comprenant principalement les classes physionomiques c5, c8 et c12 ressort d'une façon nette. Ces objets se distinguent par leur fort ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ ce qui indique un effet de structure accompagné d'une certaine dépolarisation. Ce sous-ensemble est important car représentatif du "comportement polarimétrique" de certaines classes physionomiques herbacées des bas marais du Lac Saint-Pierre. Elle fera l'objet d'une analyse plus détaillée afin de mieux comprendre ce comportement distinct comparativement aux autres classes physionomiques.
- iii. Tandis que les marais herbacés sont encore confondus avec d'autres occupations du sol (regroupement D), les physionomies arborées sur substrats secs (c91 à c95) forment un groupe relativement homogène indépendamment du type de peuplement (feuillus, conifères, mixtes) ou de leur structure (densité/hauteur).
- iv. L'utilisation des ratios rehausse les variations intra-classe des marécages arborés et arbustifs (regroupement A) de même que celles des tourbières ouvertes (regroupement B).

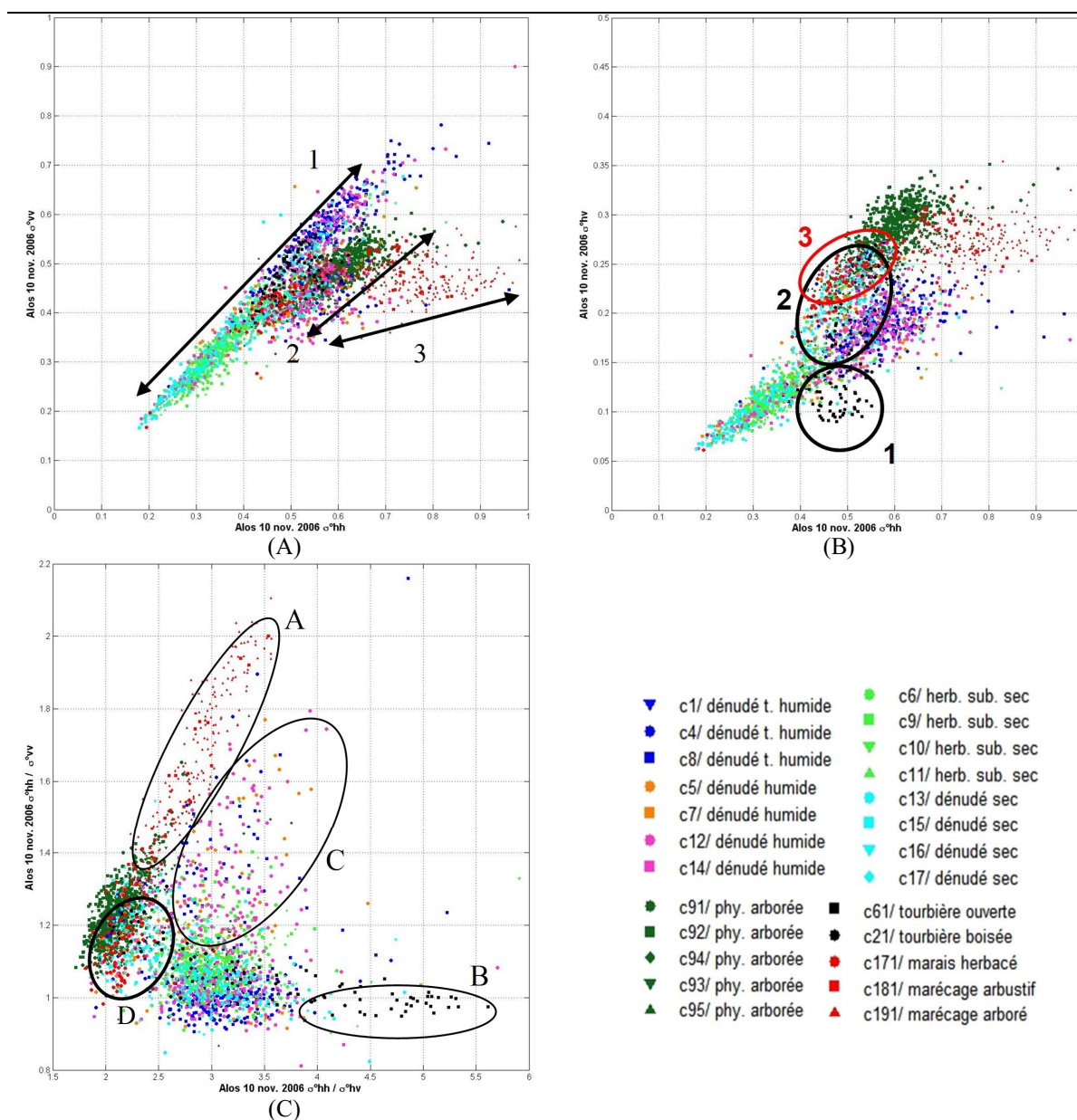


Figure 10.1-1 : Position des classes phytosociologiques dans les espaces formés des canaux de polarisation : (A) $\sigma_{hh}^0 - \sigma_{vv}^0$; (B) $\sigma_{hh}^0 - \sigma_{hv}^0$ et (C) des rapports entre canaux de polarisations

En conclusion, nous pouvons dire qu'à cette fin de saison végétative (novembre 2006) et pour les données utilisées (bande L; $\theta = 21.5^\circ$) les différents états d'humidité et de rugosité ont plus d'effets sur les canaux de polarisation que les différentes structures (ou leur absence) de la végétation, notamment en ce qui concerne σ_{hh}^0 . Si l'on veut appliquer les images multipolarisées pour la séparation des différentes phytosociologies, l'usage des trois canaux σ_{hh}^0 , σ_{vv}^0 et σ_{hv}^0 est indispensable, mais encore là les résultats seront plutôt mitigés. Nous verrons

au cours des prochaines sections comment l'information contenue dans les canaux de polarisation peut être «récupérée» par les paramètres de la décomposition de Touzi et ce de manière non ambiguë.

10.2. Type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1})

Cette analyse concerne les données ALOS du 10 novembre 2006 et le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) de la décomposition de Touzi est comparé au ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ ainsi qu'à σ_{hv}^0 afin de mieux évaluer son apport quant à la caractérisation des physiologies végétales. Les paramètres angulaires alpha permettent en principe une meilleure estimation du type de rétrodiffusion que le ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ car ils sont indépendants d'une base de polarisation. Concernant l'apport de α_{s1} vis-à-vis σ_{hv}^0 , il est examiné ici parce que la magnitude de σ_{hv}^0 est souvent évoquée comme un indicateur du degré de dépolarisation du signal.

En portant les données dans un espace formé de α_{s1} et $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ nous pouvons constater les suivants (Figure 10.2-1-A) :

- i. Il existe une relation plus ou moins linéaire entre α_{s1} et $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ (les deux zones A) pour les rétrodiffusions de surfaces ($\approx \alpha_{s1} < 40^\circ$) de part et d'autre d'une valeur $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 = 1$. La plupart des objets, surtout des champs agricoles, sont regroupés dans ces deux zones;
- ii. Une seconde relation est observée (axe B) pour les rétrodiffusions à tendance dipolaire ($\alpha_{s1} \approx 45^\circ$) où le ratio des polarisations $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ croit alors que α_{s1} tend vers 45° . On retrouve ici surtout des marécages arborés et arbustifs. À notre avis la présence de ces physiologies dans cette zone indique une rétrodiffusion double-bond non dominante plutôt qu'une rétrodiffusion dipolaire;
- iii. Une troisième relation est présente (zone C) et comprend les rétrodiffusions à tendance double-bond ($\alpha_{s1} > 45^\circ$). On observe dans cette zone une certaine décorrélation entre α_{s1} et $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$. Ce sont surtout les objets des marais herbacés (c171) qui se regroupent dans

cette zone. Fait important à noter est qu'aucun espace constitué seulement des canaux de polarisation (section 10.1) n'a permis de distinguer cette classe physiologique

- iv. Un sous-ensemble d'objets de physiologies agricoles se distingue des autres physiologies (zone E) mais cette distinction ne peut pas être attribuée uniquement à α_{s1} ou à $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$. À notre avis, il existe pour ces objets un effet qui a créé une forte disparité entre σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 mais qui, contrairement aux marécages, a été compensé lors de la rétrodiffusion et ramené à une rétrodiffusion de surface anisotrope (avec $10^\circ < \alpha_{s1} < 30^\circ$); les sections 10.4 et 10.6 présenteront plus de détails sur ces objets.

Les écarts observés (Figure 10.2-1-A : zones C et E) ne peuvent être expliqués que par les propriétés invariantes à la rotation de α_{s1} ne serait-ce que par l'absence de topographie marquée dans le secteur. Il ne faut pas non plus perdre de vue que l'angle α_{s1} représente le mécanisme de diffusion dominant et non pas la rétrodiffusion totale de l'objet sauf dans le cas extrême où $\lambda_{1N} = 1$. Certaines différences peuvent aussi s'expliquer par le fait que α_{s1} est calculé à l'aide d'une fenêtre (ici 7x7) contrairement à σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 . Si cela peut expliquer en partie la dispersion dans les zones A, cela n'explique pas les différences soulignées pour les zones C et E.

Une dernière remarque concernant le ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$. Ce ratio peut présenter un intérêt pour certaines études, notamment celles portant sur la rugosité des sols, parce qu'il permet d'identifier quel est le canal copolaire dominant, contrairement à α_{s1} . En effet, certains mécanismes de rétrodiffusion de surface, comme la diffusion de Bragg, seraient plus facilement identifiables par la relation entretenue entre les canaux σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 alors que l'angle α_{s1} se montrerait moins sensible. Les études de Hajnsek et al. (2003) et de Cloude et al. (2002) abondent dans le même sens en signalant qu'en général l'angle de rétrodiffusion symétrique semble moins sensible aux variations de la rugosité des surfaces. La section 10.7 montrera cependant qu'il est possible de retrouver cette information contenue dans ce ratio à l'aide du paramètre ψ_1 de la décomposition de Touzi.

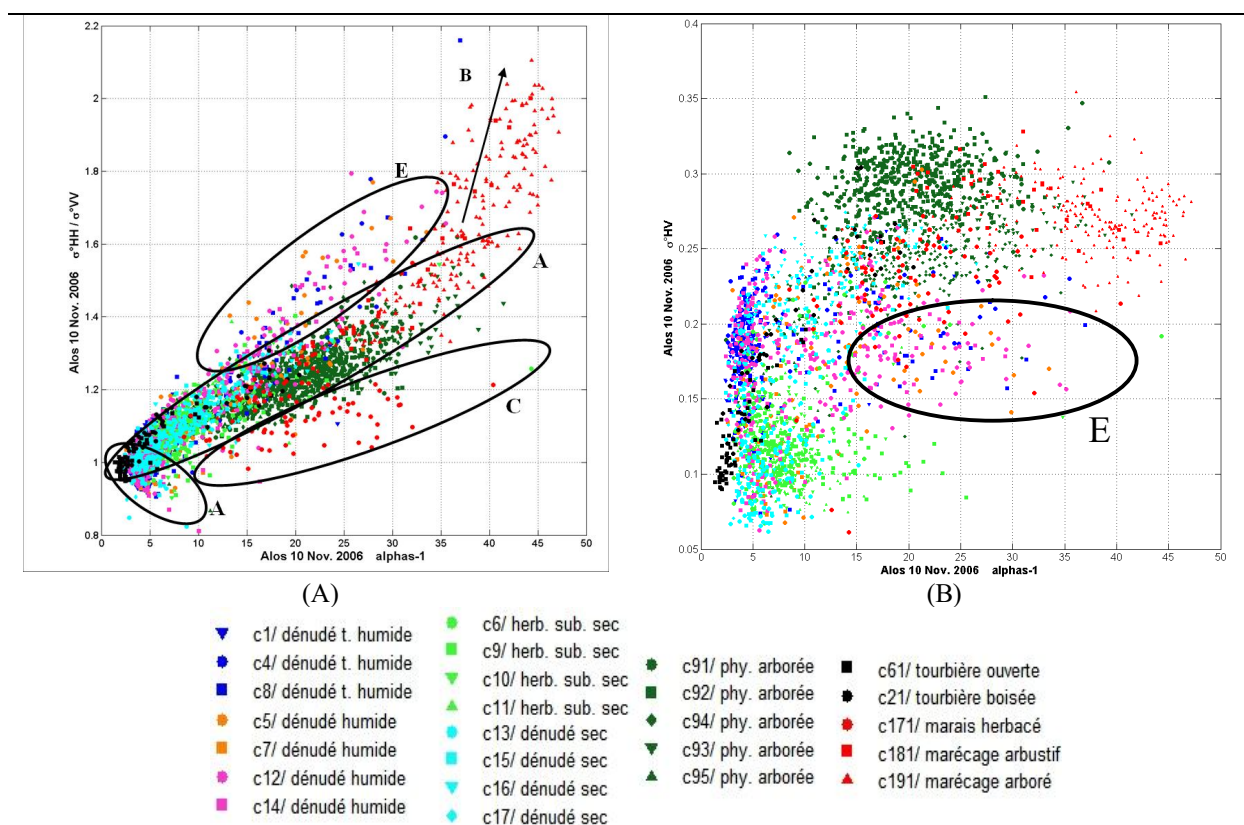


Figure 10.2-1 : Relations entre (A) le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) et le ratio de polarisation $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ ainsi que (B) la polarisation σ_{hv}^0

La Figure 10.2-1-B montre la distribution des objets dans l'espace $\alpha_{s1} - \sigma_{hv}^0$. Comme nous pouvons le constater, le canal σ_{hv}^0 permet d'identifier grosso modo trois classes de rétrodiffusion parmi les physionomies végétales soit : a) une classe de rétrodiffusion de surface comprenant les surfaces lisses [$\sigma_{hv}^0 \approx 0.15$ (-16.4dB)] ; b) une classe de physionomies dénudées lisses humides et/ou d'une forte rugosité ce qui a fait augmenter σ_{hv}^0 en puissance [$0.15 < \sigma_{hv}^0 < 0.25$ (-16.4 à -12dB)] et c) une classe de rétrodiffusion volumique ou multiple [$\approx \sigma_{hv}^0 > 0.25$ (-12dB)] comprenant des physionomies arborées et arbustives des milieux secs ou des marécages ainsi qu'un sous-ensemble d'objets des physionomies dénudées sèches et très rugueuses. Deux points importants ressortent de ce graphique quant à l'apport de α_{s1} comparativement à σ_{hv}^0 : 1) les deux premières classes d'objets similaires du point de vue physionomique différenciables par σ_{hv}^0 à cause de leur humidité et/ou leur forte rugosité constituent un seul groupe si l'on tient compte de leur valeur $\alpha_{s1} \approx 7^0$; 2) les objets du regroupement E (Figure 10.2-1-B) ne sont mis en évidence que par le type dominant de

rétrodiffusion symétrique α_{s1} . Ainsi, contrairement à ce dernier, σ_{hv}^0 ne permet pas de distinguer une augmentation de la puissance du signal due à l'humidité et/ou une forte rugosité d'une augmentation liée à une structure qui dépolarise le signal. Remarquons également qu'un sous-ensemble des physionomies herbacées sur substrat sec (c6, c9, c10 et c11) ne se distingue des surfaces dénudées sèches (c13, c15, c16 et c17) que sur l'axe α_{s1} .

Les causes de la dépolarisation du signal sont multiples (diffusion volumique, rétrodiffusion multiple, anisotropie (rugosité), bris de symétrie azimutale ou de rotation, etc.) et σ_{hv}^0 ne permet évidemment pas de différencier ces causes surtout si l'on rajoute l'effet de l'humidité sur la puissance rétrodiffusé. Il contient néanmoins une portion des éléments qui permettent la description des physionomies végétales et on verra dans les prochaines sections comment récupérer cette information par les autres paramètres de la décomposition de Touzi.

10.3. Phase du type dominant de rétrodiffusion symétrique ($\Phi_{\alpha_{s1}}$) et comparaison avec la différence de phase HH-VV ($\phi_{hh} - \phi_{vv}$)

La différence des phases HH-VV ($\phi_{hh} - \phi_{vv}$) contient une information complémentaire à celle contenue dans les canaux de polarisation. En effet, tel que mentionné au chapitre 6, la différence des phases $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ a été utilisée pour la détection des marais et marécages inondés (Hess et *al.*, 1990, 1995; Pope et *al.*, 1994, 1997 ; Henderson et Lewis, 2008). Cependant, sa forte variabilité spatiale (c.-à-d. son aspect bruité) a limité son utilisation et mené à la conclusion que son écart-type ou sa distribution seraient plus intéressants que sa valeur moyenne pour caractériser une physionomie donnée (Ulaby et *al.*, 1987). Ce paramètre mène en fait à une identification grossière des mécanismes de rétrodiffusion généralement résumés en deux types selon que le nombre de bords est impair ou pair (Touzi et *al.*, 2007 et 2009).

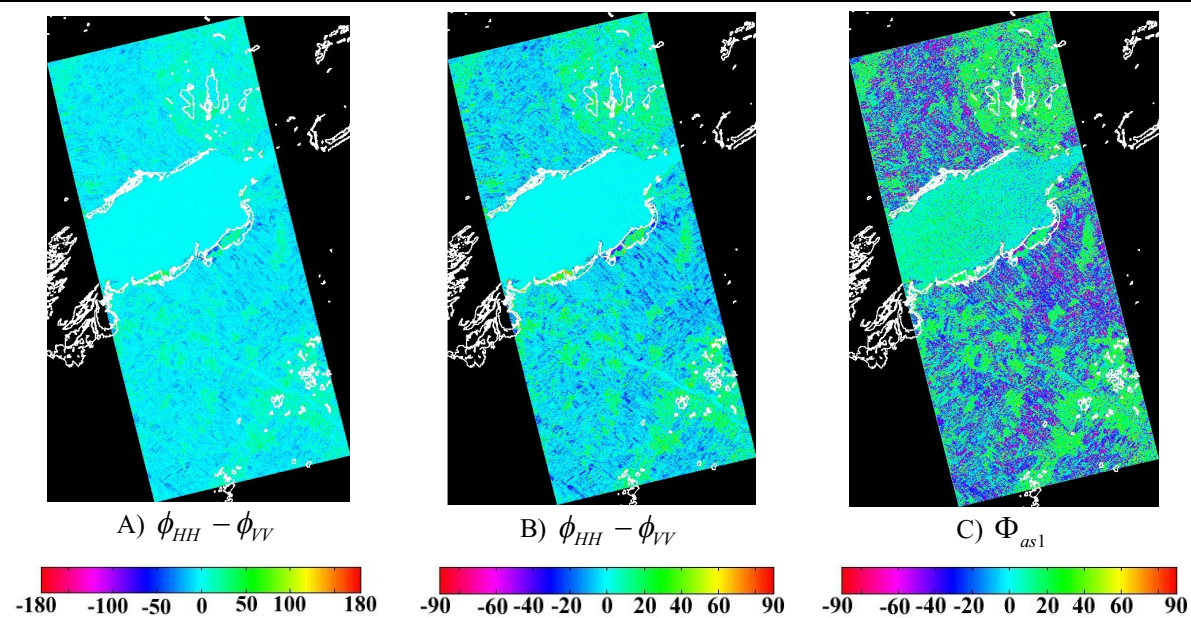
La phase du type dominant de rétrodiffusion symétrique ($\Phi_{\alpha_{s1}}$) de la décomposition de Touzi a été appliquée avec succès pour la description des milieux humides à partir des données polarimétriques aéroportées par Touzi et *al.* (2007 et 2009). Selon ces auteurs, $\Phi_{\alpha_{s1}}$ est estimée sous de meilleures conditions de cohérence comparativement à $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ puisqu'elle

n'est dérivée que par la portion dominante du signal rétrodiffusée. Ainsi, on obtient une phase moins bruitée qui, combinée à α_{s1} , mène à une caractérisation à haute résolution du type de rétrodiffusion. La comparaison de deux phases ($\Phi_{\alpha s1}$ et $\phi_{hh} - \phi_{vv}$) ainsi que l'apport de la combinaison des paramètres α_{s1} et $\Phi_{\alpha s1}$ sont analysées par la suite toujours dans le cas des données ALOS de novembre 2006.

10.3.1. Comparaison des deux phases

Une comparaison visuelle des images des phases $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ et $\Phi_{\alpha s1}$ (Figure 10.3-1) montre que le plus marquant n'est pas tant l'aspect bruité de $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ mais son manque de contraste comparativement à $\Phi_{\alpha s1}$, même lorsque les bornes de la phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ sont ramenées à l'intervalle $[-90, 90]$ (Figure 10.3-B).

Ce manque de contraste apparaît aussi à la Figure 10.3-2 où sont comparées par classe physiologique $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ et $\Phi_{\alpha s1}$. Alors que les physiologies dénudées se concentrent autour de $0^\circ \pm 20^\circ$ sur l'axe $\phi_{hh} - \phi_{vv}$, indiquant une rétrodiffusion de surface, la gamme dynamique des objets correspondant sur l'axe $\Phi_{\alpha s1}$ est plus étendue occupant l'intervalle $[-90^\circ \leq \Phi_{\alpha s1} < 0^\circ]$. Tel que mentionné, la phase $\Phi_{\alpha s1}$ n'est pas dépendante d'une base de polarisation contrairement à $\phi_{hh} - \phi_{vv}$. De plus la phase $\Phi_{\alpha s1}$ ne caractérise pas le type de rétrodiffusion par le nombre de bonds impairs ou pairs mais plutôt par le décalage de phase entre les composantes triédrique (-90°) et diédrique (90°) du signal rétrodiffusé (voir chapitre 3). Mentionnons qu'il existe une relation linéaire entre $\Phi_{\alpha s1}$ et $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ lorsqu'il n'y a pas de bris de la symétrie de rotation (c.-à-d. $\psi = 0^\circ$). Notons que les marécages arborés (c181, c191) et les marais herbacés (c171) se démarquent bien dans l'espace $\Phi_{\alpha s1} - \phi_{HH} - \phi_{VV}$ (Figure 10.3-2).



Note 1 : Phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ traitée avec filtre médian 7x7 .

Note 2 : image B, $\phi_{hh} - \phi_{vv} \notin [-90, 90]$ attribuée à -90° ou 90° selon la situation.

Figure 10.3-1 : Images des phases $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ et de $\Phi_{\alpha 1}$ (novembre 2006)

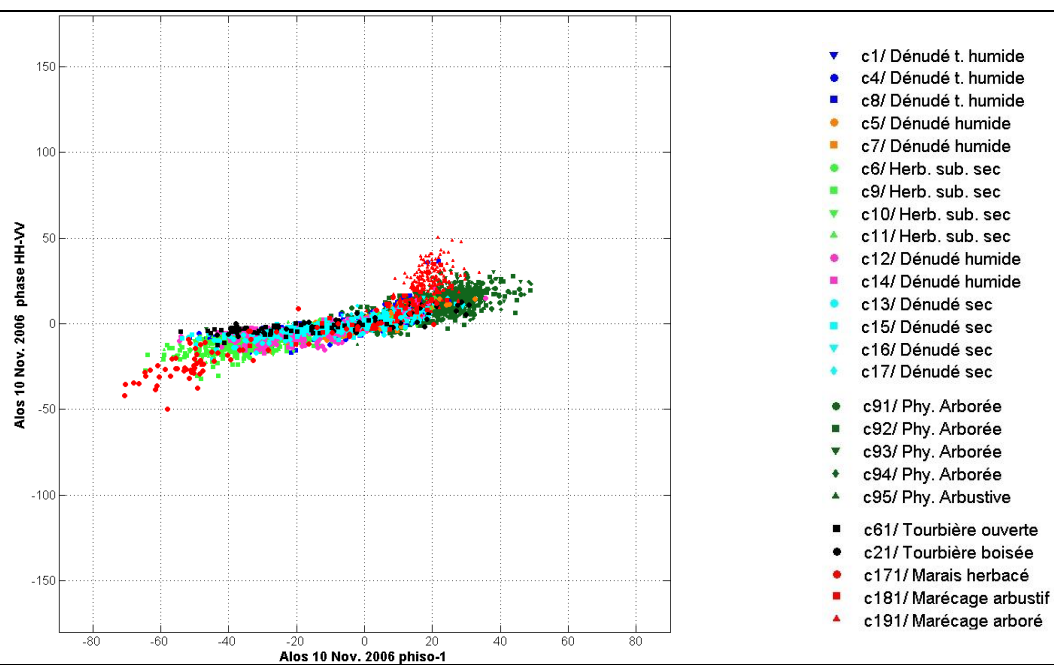


Figure 10.3-2 : Comparaison entre $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ et $\Phi_{\alpha 1}$ par classe phytosociologique

10.3.2. Le type dominant et la phase du type dominant de rétrodiffusion symétrique

La Figure 10.3-3-A montre que la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ contient une information complémentaire et originale par rapport à α_{s1} . Les physionomies herbacées (c171) qui étaient discriminables des autres physionomies sur la base du ratio $\sigma_{hh}^0/\sigma_{vv}^0$ et de α_{s1} le sont aussi dans l'espace $\alpha_{s1} - \Phi_{\alpha_{s1}}$ (zone D). Les objets qui ont été identifiés dans les sections précédentes par leur «comportement polarimétrique» atypique, se démarquent également dans l'espace $\alpha_{s1} - \Phi_{\alpha_{s1}}$ (zone E). Comparée à α_{s1} , c'est $\Phi_{\alpha_{s1}}$ qui permet de discriminer l'ensemble des physionomies forestières des objets de la zone E alors que l'angle α_{s1} permet de discriminer la plupart des physionomies arborées des marécages de celles des milieux secs.

Si l'on compare la Figure 10.3-3-A à Figure 10.3-3-B, on remarque que $\Phi_{\alpha_{s1}}$ apporte une information qui en partie rappelle celle contenue dans σ_{hv}^0 . La Figure 10.3-3-B illustre la relation entre $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et σ_{hv}^0 au niveau des objets. Les sols peu rugueux des physionomies herbacées sur substrat sec (c6, c9, c10, c11) et de certaines physionomies dénudées sèches (surtout c13 et c15) sont dominés par une rétrodiffusion de surface donc elles sont caractérisées par un faible σ_{hv}^0 . Ces physionomies sont également celles pour lesquelles la composante triédrique est dominante donc une phase inférieure à zéro. Le canal σ_{hv}^0 augmente ensuite de pair avec la rugosité et l'humidité de surface ce qui se traduit pour $\Phi_{\alpha_{s1}}$ par l'introduction progressive d'une composante diédrique dans la rétrodiffusion totale. Après un passage par $\Phi_{\alpha_{s1}} \approx 0^\circ$, les interactions (bonds) multiples de l'onde rétrodiffusé qui dépolarisent le signal gagnent en importance ce qui correspond ici aux physionomies arborées. Les faibles valeurs observées pour $\Phi_{\alpha_{s1}}$ dans cette zone ($\Phi_{\alpha_{s1}} \approx 20^\circ$) confirment la faiblesse de la rétrodiffusion double bond, et ce même dans les marécages. Ainsi, la rétrodiffusion de ces physionomies en est une dipolaire provenant de la portion supérieure de la canopée avec la faible contribution d'une composante double bond (sol-tronc, tronc-sol, branches-troncs, etc.). Il est intéressant de rappeler ici que c'est l'angle α_{s1} et non la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ qui permet la discrimination entre marécages arborés (zone D) et forêts des milieux secs.

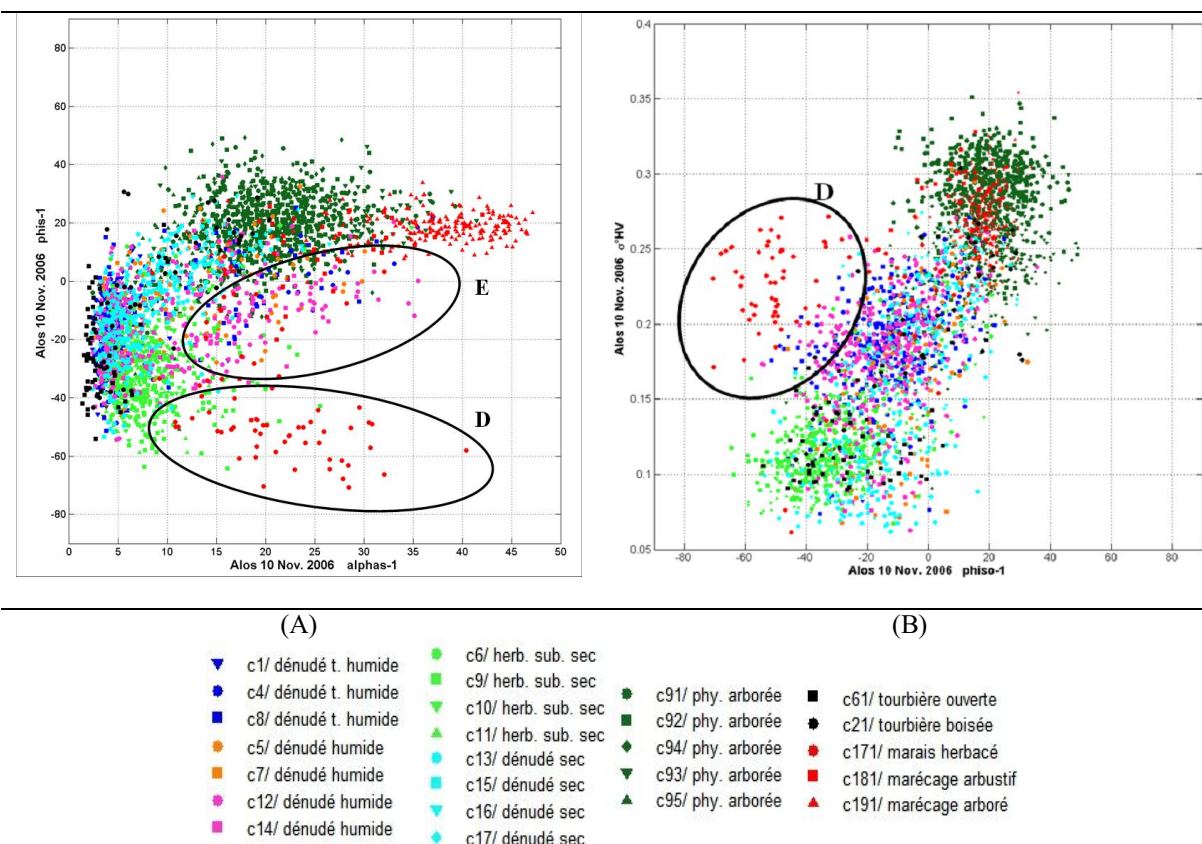


Figure 10.3-3 : Relation par classe phytosociologique entre (A) α_{s1} et $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et (B) entre $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et σ_{hv}^0 , novembre 2006

La différence de phase observée entre les polarisations HH et VV peut avoir différentes origines dont (Ulaby et *al.*, 1987): 1) une double réflexion à l'intérieur de la cible; 2) d'un parcours diélectrique de longueur différente entre les polarisations HH et VV lorsque les diffuseurs qui dominent la rétrodiffusion VV sont à une portée différente du radar de ceux dominant la rétrodiffusion HH; 3) d'un délai temporel entre les polarisations HH et VV provenant d'une vitesse de phase différente entre les composantes H et V à l'intérieur de la cible. La relation générale observée entre HH, VV et HV et la phase ($\Phi_{\alpha_{s1}}$ ou $\phi_{hh} - \phi_{vv}$) proviendrait surtout de la quantité plus ou moins importante de rétrodiffusion double bond qui a également un effet sur la radiométrie.

Dans le cas des tourbières ouvertes ([h1] et [A3], c61) et de certains sols dénudés, les variations observées de la phase ne se traduisent pas par une variation de la puissance rétrodiffusée et procure donc une information réellement indépendante. L'amplitude du signal incident est fortement atténuée lorsque ce dernier pénètre et voyage dans le volume de tourbe.

Bien que la présence d'eau sous la surface puisse influencer l'amplitude de l'onde, ces changements peuvent être trop faibles pour être détectés par le capteur. Le *noise floor* du radar contrôle en partie sa sensibilité et sa capacité à détecter des changements subtils. Imaginons par exemple un changement en amplitude liée au niveau d'eau sous la surface qui pourrait produire une rétrodiffusion de -45 dB contre -50 dB pour un niveau d'eau hors de portée du signal. Si le *noise floor* du radar est de -40dB, ce changement ne sera pas détecté. La phase par contre, étant une mesure de temps (équation 3.1-1), sera moins affectée par l'atténuation du signal et pourra demeurer sensible à ce changement. La partie VI traitera en détail de ce sujet.

10.4. Valeurs propres normalisées ($\lambda_{1N}, \lambda_{2N}, \lambda_{3N}$)

La section précédente a porté sur les paramètres α_{s1} et $\Phi_{\alpha s1}$ de la première composante de la décomposition de Touzi. Les paramètres α_{s1} et $\Phi_{\alpha s1}$ ne caractérisent pas l'entiereté de l'information disponible pour une cible (étendue ou ponctuelle) par cette décomposition pas plus que l'ensemble des paramètres de la première composante. Mais avant de s'intéresser au contenu de la seconde et troisième composante (section 10.5), il convient d'analyser les valeurs propres de chaque classe physiologique. Pour cette analyse, nous ferons aussi appel aux données ALOS acquises au mois de mai 2007. Nous examinerons également l'Anisotropie polarimétrique en fonction de la première valeur propre.

10.4.1. Distributions

Si l'on compare entre elles les valeurs propres par date d'acquisition des données ALOS (Figure 10.4-1) on observe un fort degré de corrélation sur l'ensemble des intervalles couverts ($\lambda_{1N} \approx 0.4$ à 1, $\lambda_{2N} \approx 0$ à 0.4 et $\lambda_{3N} \approx 0$ à 0.35) et pour l'ensemble des classes physiologiques. Cette corrélation se traduit surtout par une relation inverse entre λ_{1N} et λ_{2N} (ainsi qu'entre λ_{1N} et λ_{3N}). Deux exceptions sont cependant évidentes dans le cas des données de novembre : (a) un premier regroupement d'objets (zone 1 ; Figure 10.4-1-A) correspondant aux physiologies des milieux agricoles précédemment identifiées et appartenant aux classes

c5, c8, et c12 ; (b) quelques objets dispersés (zone 2 ; Figure 10.4-1-A) situés «sous» la relation inverse entre λ_{1N} et λ_{2N} .

Une analyse détaillée du sous-ensemble des objets des classes c5, c8 et c12 (voir annexe 2) basée en partie sur des images Landsat du 5 novembre 2006 et du 8 mai 2007 a montré que ces physionomies dénudées pouvaient en fait contenir des résidus de cultures ou encore une biomasse dressée mais sénescence de maïs (récolté tard dans la saison). La présence de sillons serait à la base de leur comportement distinct dont la dépolarisation observée. Cette conclusion est supportée par : (a) une corrélation pour une partie de ces objets entre l'axe principal des champs rectangulaires par rapport au LOS et la valeur de τ_1 ou ψ_1 (paramètres étudiés plus loin) et (b) le fait que ces propriétés aient presque complètement disparues en mai 2007 dû certainement à une réduction de la rugosité des champs agricoles (Figure 10.4-1-D). En effet, l'acquisition ALOS du 13 mai montre des valeurs moyennes de λ_{1N} plus fortes pour l'ensemble des physionomies agricoles accompagnées d'une forte diminution de la puissance du signal rétrodiffusé que ce soit avec σ_{hh}^0 , σ_{vv}^0 , σ_{hv}^0 ou le *span* (résultats non présentés).

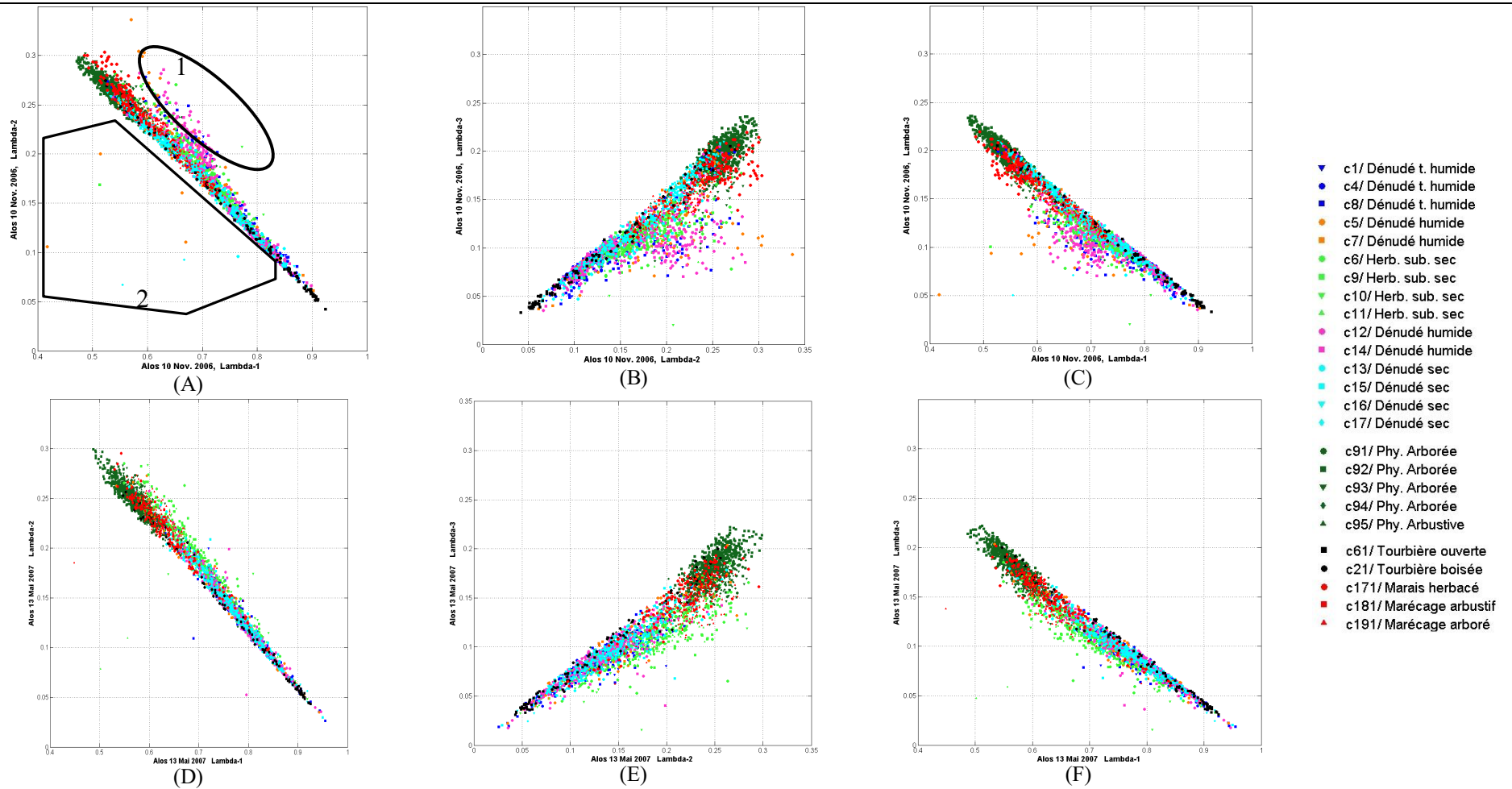


Figure 10.4-1 : Relations entre les valeurs propres normalisées λ_{1N} , λ_{2N} et λ_{3N} , par physionomie végétale : (1^{ère} rangée) 10 novembre 2006, (2^e rangée) 13 mai 2007

10.4.2. Anisotropie

L'anisotropie polarimétrique (A) a été introduite par Cloude et *al.* (2002) et elle implique la deuxième et troisième composante :

$$A = (\lambda_2 - \lambda_3) / (\lambda_2 + \lambda_3) \quad (10.4-1)$$

Une forte anisotropie ($\lambda_2 \gg \lambda_3$) indique la présence d'un second mécanisme de rétrodiffusion alors qu'une faible ou moyenne anisotropie indique une contribution significative de la troisième composante ($\lambda_2 \approx \lambda_3$) à la rétrodiffusion totale. Il n'existe cependant pas de valeur d'anisotropie au-delà de laquelle on peut affirmer qu'il y ait contribution significative d'un second mécanisme de rétrodiffusion.

L'Anisotropie calculée par objet est présentée sur l'axe des ordonnées de la Figure 10.4-2 avec λ_{1N} sur l'axe des abscisses pour les deux dates d'acquisition ALOS. Comme nous l'avons mentionné, la valeur exacte de l'anisotropie à partir de laquelle on peut affirmer qu'un second mécanisme de rétrodiffusion est présent n'est pas connue. Si l'on trace (arbitrairement) une ligne à $A=0.3$, ce n'est qu'une fraction des objets qui se démarquent par leur anisotropie. Les objets concernés possèdent pour la plupart un λ_{1N} moyen compris entre 0.58 et 0.82. Dans le cas des données de novembre (Figure 10.4-2-A) encore une fois, ce sont les mêmes objets associés aux classes c5, c8 et c12 qui ont été mis en évidence dans la majorité des graphiques des sections précédentes. Dans ce contexte, la segmentation de l'espace $\lambda_{1N} - \lambda_{2N}$ (Figure 10.4-1-A) ou encore de l'espace $\lambda_{1N} - A$ apparaît être plus appropriée pour détecter les objets présentant un second mécanisme de rétrodiffusion significatif que l'anisotropie utilisée seule.

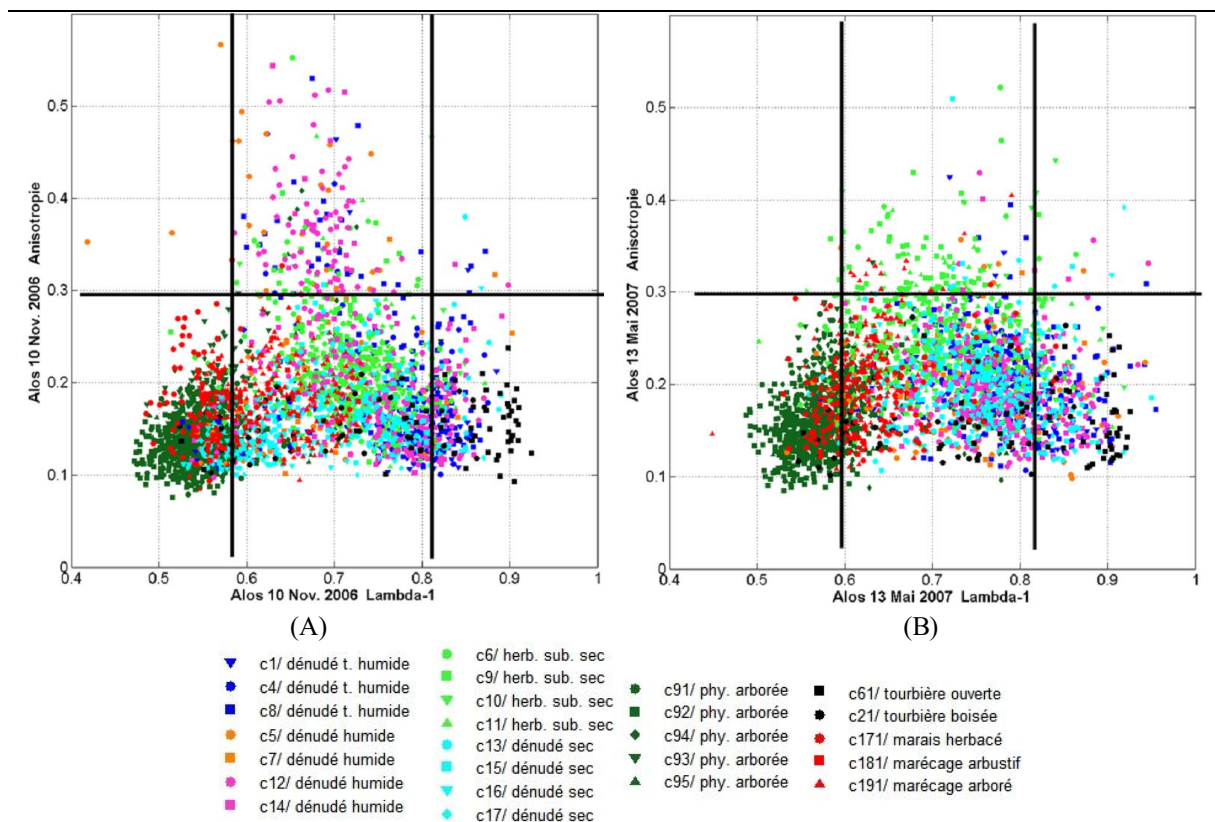


Figure 10.4-2 : Relation entre la première valeur propre (λ_{1N}) et l'Anisotropie (A) par physionomie végétale : (A) 10 novembre 2006 (B) 13 mai 2007

Si l'on se fie aux images des Anisotropies de la Figure 10.4-3, la surface d'eau libre du lac Saint-Pierre présente une forte anisotropie mais qui accompagnée d'une première valeur propre très élevée ($\lambda_{1N} > 0.9$). Avec un λ_{1N} élevé, λ_{2N} devient très faible et alors λ_{3N} avoisinera 0 ce qui donne, pour cet exemple, une Anisotropie comprise entre 0.1 et 0.6. À l'intérieur des terres, l'Anisotropie a augmenté légèrement en mai par rapport à novembre (Figure 10.4-3-B), phénomène surtout lié à une augmentation de la fraction de polarisation (Figure 10.4-4) qui indique la dominance de λ_1 , donc à une diminution de l'importance relative de λ_3 . Mais par rapport au 10 novembre, l'image du 13 mai présente surtout une disparition des valeurs «significatives» d'anisotropie associées aux classes physiologiques c5, c8 et c12 (Figure 10.4-3-B). Cela est attribuable à la disparition des sillons, causé par les récoltes et du travail mécanique des sols, qui ont été érodés par les vents et le ruissellement au cours de l'hiver 2006 et du printemps 2007.

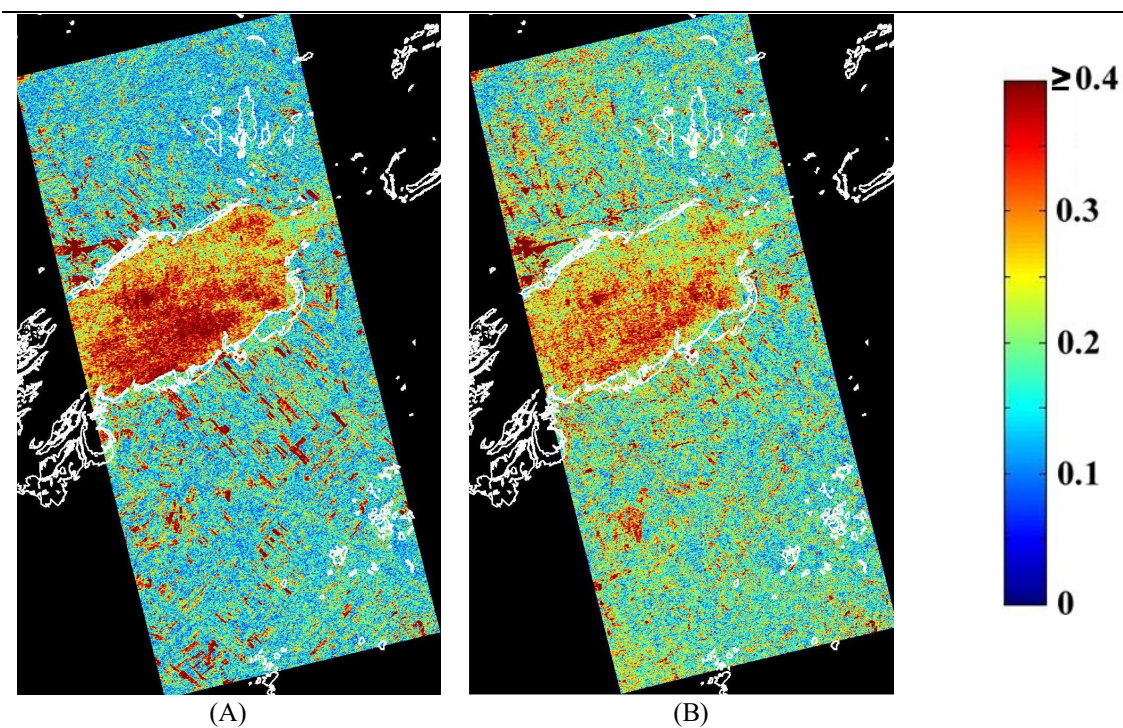


Figure 10.4-3 Anisotropie (A), (A) 10 novembre 2006 et (B) 13 mai 2007

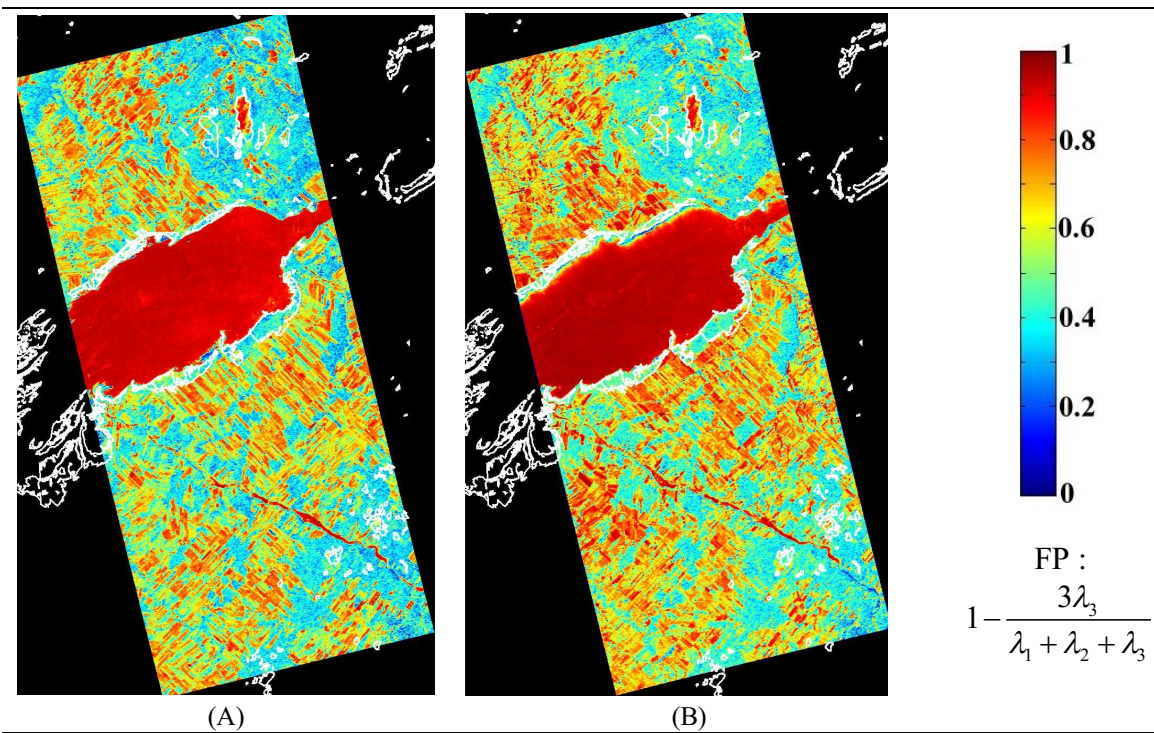


Figure 10.4-4 : Fraction de polarisation, (A) 10 novembre 2006 et (B) 13 mai 2007

10.4.3. Relation entre les composantes principales et la polarisation σ_{hv}^0

La polarisation croisée (σ_{hv}^0) est souvent utilisée comme une mesure de la dépolarisation du signal provenant de la rétrodiffusion volumique d'une canopée forestière. La décomposition de Freeman (Freeman et Durden, 1998) l'utilise aussi pour estimer la part de la rétrodiffusion volumique sous l'hypothèse d'une symétrie de réflexion. L'application de cette décomposition à une scène entière, originalement développée pour la description des milieux forestiers, pose problème lorsque σ_{hv}^0 n'est pas entièrement représentatif d'une diffusion volumique.

Si l'on considère d'abord l'acquisition du 10 novembre (Figure 10.4-5 A à C), il est clair qu'il est possible de retrouver, comme le prédit la théorie, une forte polarisation croisée σ_{hv}^0 pour différents degrés de polarisation représentés par λ_{1N} . Les physionomies arborées (c91 à c95) et les marécages (c181, c191) ne se distinguent que sur l'axe λ_{1N} alors que les marais herbacés (c171) ne sont discriminés des physionomies arborées qu'avec σ_{hv}^0 . Les tourbières ouvertes (c61) se distinguent des autres physionomies par une première valeur propre élevée ($\lambda_{1N} > 0.85$). On remarque cependant que le canal σ_{hv}^0 ne permet pas de séparer la classe c61 des physionomies herbacées sur substrats secs (c6, c9, c10, c11) et des physionomies dénudées sèches et peu rugueuses (principalement c13 et c15). Si l'on étend l'analyse à la seconde et troisième valeur propre, on ne remarque pas de reconfiguration majeure de la position des physionomies végétales, tout au plus nous notons un resserrement de la distance entre ces classes lorsque l'on passe de λ_{1N} à λ_{2N} puis à λ_{3N} (Figure 10.4-5 B et C).

La disparition des résidus de culture et l'aplanissement de la rugosité des champs par la pluie et les vents au printemps 2007 doit être à l'origine de la baisse générale de σ_{hv}^0 et de la réduction considérable de sa gamme dynamique pour les surfaces dénudées (Figure 10.4-5 D à F). À quelques exceptions près, l'ensemble des physionomies dénudées se caractérisent par un σ_{hv}^0 compris entre environ 0.04 et 0.12 (-27.9 à -18.4 dB). À l'opposé, la gamme dynamique de λ_{1N} reste la même pour ces physionomies. Les surfaces dénudées occupent l'ensemble de l'intervalle $0.55 < \lambda_{1N} < 0.9$ et peuvent atteindre des valeurs supérieures à celles de novembre. Comme avec les données de novembre on ne remarque pas de reconfiguration majeure de la position des physionomies végétales avec la deuxième et la troisième composante, tout au plus

un resserrement de la distance entre les classes lorsque l'on passe de λ_{1N} à λ_{2N} puis à λ_{3N} (Figure 10.4-5 E et F).

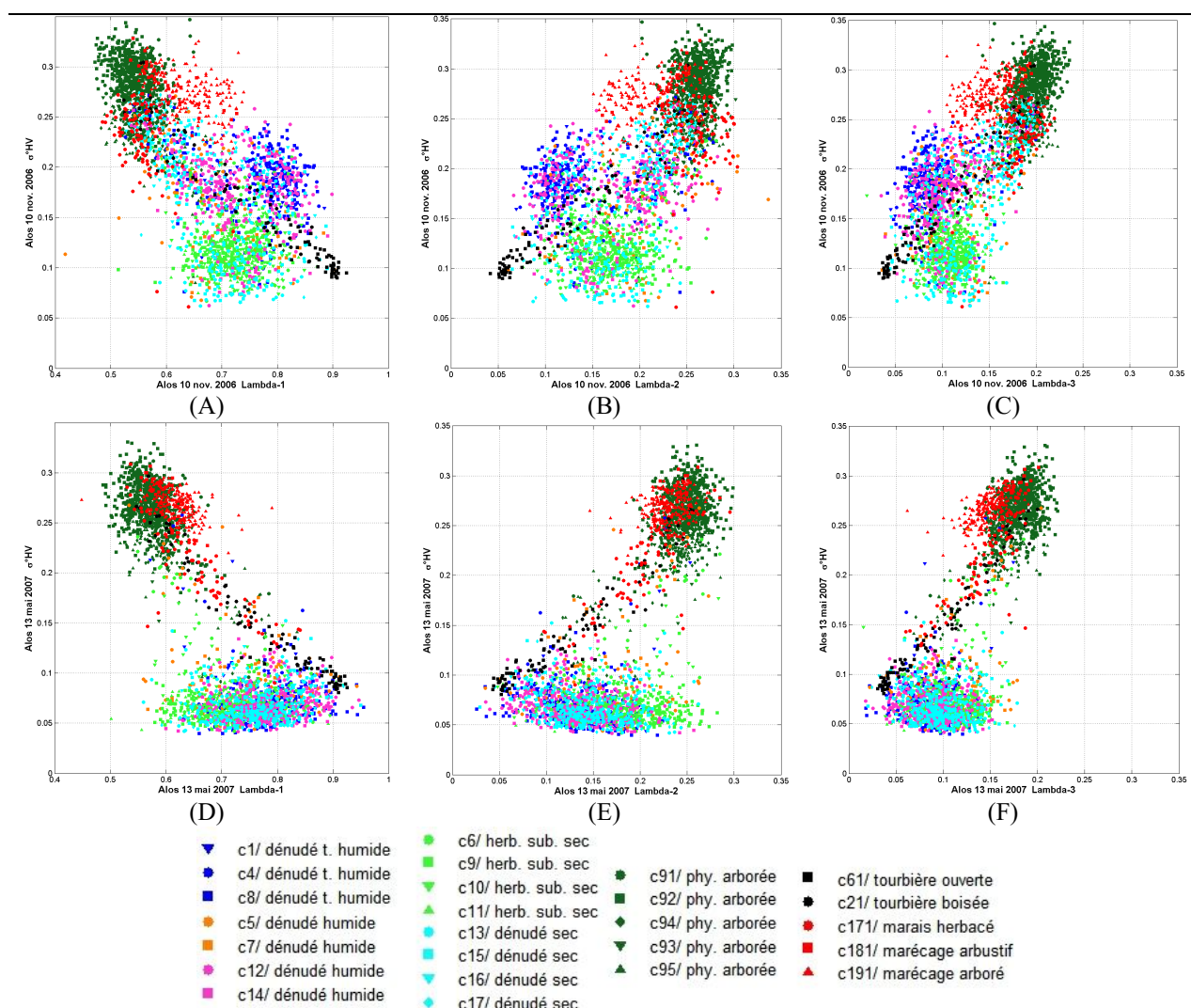


Figure 10.4-5: Relation entre valeurs propres λ_{1N} , λ_{2N} et λ_{3N} et le canal de polarisation σ_{hv}^0 , par physionomie végétale : (A) à (C) : 10 novembre 2006 ; (D) à (F) : 13 mai 2007.

10.5. Premier et second type de rétrodiffusion symétrique

10.5.1. Relations

La Figure 10.5-1 présente la répartition des objets dans l'espace α_{s1} et α_{s2} pour novembre 2006 et mai 2007 où trois axes sont visibles. On observe d'abord que les objets ayant de fortes valeurs pour λ_{1N} sont pour la plupart alignés le long de l'axe 1. Ici nous retrouvons les objets

dont la réponse est dominée par la rétrodiffusion de surface avec un $\approx \alpha_{s1} < 7^\circ$, comme les différentes physiologies dénudées humides ou sèches. Dans ce cas α_{s2} peut prendre en théorie n'importe quelle valeur dans l'intervalle $[0^\circ \text{ à } 90^\circ]$. Il faut se rappeler que si λ_{1N} est très élevée, λ_{2N} se retrouve proportionnellement diminuée avec une absence d'axe dominant lors du calcul de la seconde composante d'où ce caractère aléatoire observé pour α_{s2} . L'augmentation progressive de α_{s1} au-delà de 7° marque l'introduction d'un second mécanisme de rétrodiffusion qui se superpose à la rétrodiffusion de surface et qui va de pair avec la diminution de λ_{1N} (axe 2). Ici nous retrouvons alignées surtout les physiologies herbacées sèches ou humides. Une certaine forme de "couplage" entre α_{s1} et α_{s2} commence à apparaître et l'intervalle des valeurs possibles de α_{s2} se réduit à mesure qu'augmente α_{s1} jusqu'à la rétrodiffusion dipolaire où $\alpha_{s1} = 45^\circ$ (axe 3). Très peu d'objets ont des valeurs α_{s1} qui vont au-delà de 50° . L'observation de l'ensemble de données²³ nous a permis de constater que passé la rétrodiffusion dipolaire ($\approx \alpha_{s1} > 45^\circ$), α_{s1} et α_{s2} deviennent très couplées et évoluent alors en sens inverse à mesure que α_{s1} et λ_{1N} progressent vers une rétrodiffusion double-bond pure. Les pixels qui s'éloignent de la diagonale au-delà de $\alpha_{s1} = 45^\circ$ sont caractérisés pour la plupart par un λ_{1N} soit fort ou faible. On peut aussi observer dans la Figure 10.5-1 B une zone de faible densité d'objets (marquée 4) dans l'espace $\alpha_{s1} - \alpha_{s2}$ pour laquelle le découplage entre α_{s1} et α_{s2} est évident. Les marais herbacés (c171) précédemment mis en évidence, notamment par leur phase $\Phi_{\alpha s1}$ très négative, se trouvent pour la plupart dans cette «zone de découplage».

La répartition des objets dans l'espace α_{s1} et α_{s2} pour mai 2007 est présentée par la Figure 10.5-1 C et D. Des tendances similaires qu'en novembre sont évidentes, mais avec une répartition différente des mêmes objets dus aux changements des conditions de surface comme mentionné aux sections précédentes. Une densité plus faible d'objets présents dans la zone de découplage est aussi apparente.

²³ Correspondant à la totalité des pixels pour pour une image ALOS donnée, voir la Figure 10.5-4-A.

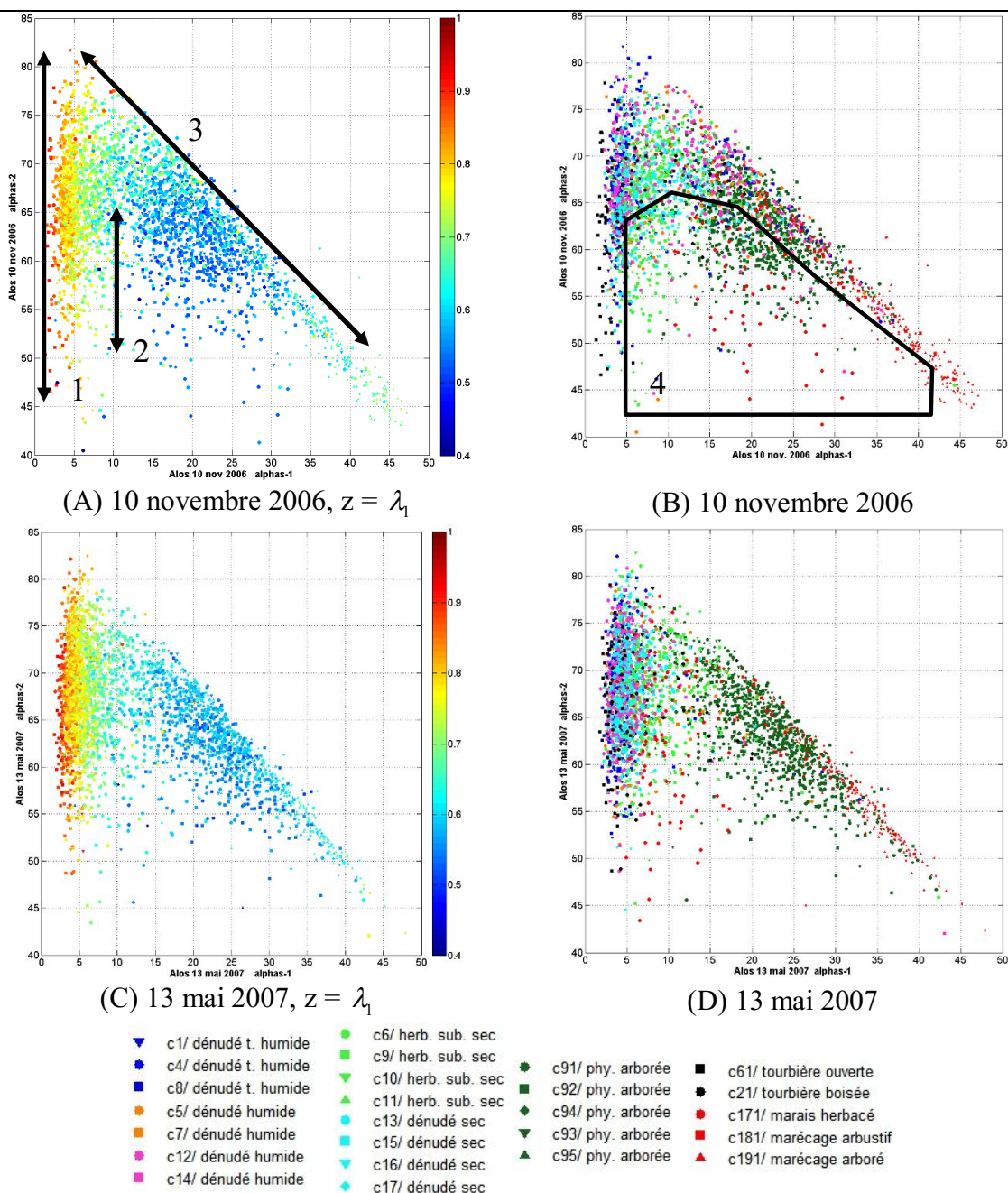


Figure 10.5-1 : Relation entre le type dominant (α_{s1}) et le second type de rétrodiffusion symétrique (α_{s2}) par classe physiognomique selon λ_{1N} , 10 novembre 2006 et 13 mai 2007

Saisir la signification de α_{s2} (et de α_{s3}) en termes de propriétés physiques des physiognomies végétales et non pas en termes mathématiques s'est avéré difficile. Pour approfondir l'interprétation de α_{s2} , une série de graphiques 3D entre α_{s1} - α_{s2} ont été produits pour lesquels la troisième dimension a été associée aux autres paramètres de la décomposition de Touzi. L'analyse de ces graphiques par pixel et par objet nous a démontré que c'est la

première hélicité (τ_1) qui semble être le facteur prépondérant pour expliquer la présence des pixels (ou des objets) découplés de la zone 4. L'hélicité dans ce cas montre des valeurs plus fortes que la moyenne avec $-4^\circ < \tau_1 > 4^\circ$. Physiquement, cela suggère que c'est avant tout un bris de la symétrie azimutale (peu importe la cause) par rapport au LOS du radar qui cause ce découplage. La Figure 10.5-2 présente comme exemple les variations des valeurs des objets en novembre 2006 en fonction de l'hélicité. Dans cet exemple, il est nécessaire d'abaisser le seuil de τ_1 à $\pm 2.5^\circ$ pour faire mieux ressortir les objets de la zone 4 (Figure 10.5-2-B). Cette valeur peut sembler faible mais, comme nous verrons à la section 10.6, τ_1 n'a pas besoin d'afficher des valeurs élevées pour être significatif. Nous verrons également dans la partie V qu'il y a une plus grande densité d'objets dans la "zone découplée" dans le cas des images RS2. Cela est attribuable à une plus grande diversité des physiologies végétales et à la présence d'eau dans les bas marais pour la période analysée (de mai à septembre). Cela a pour effet de "rehausser" la diversité des mécanismes de rétrodiffusion tout en favorisant l'apparition de bris de symétrie.

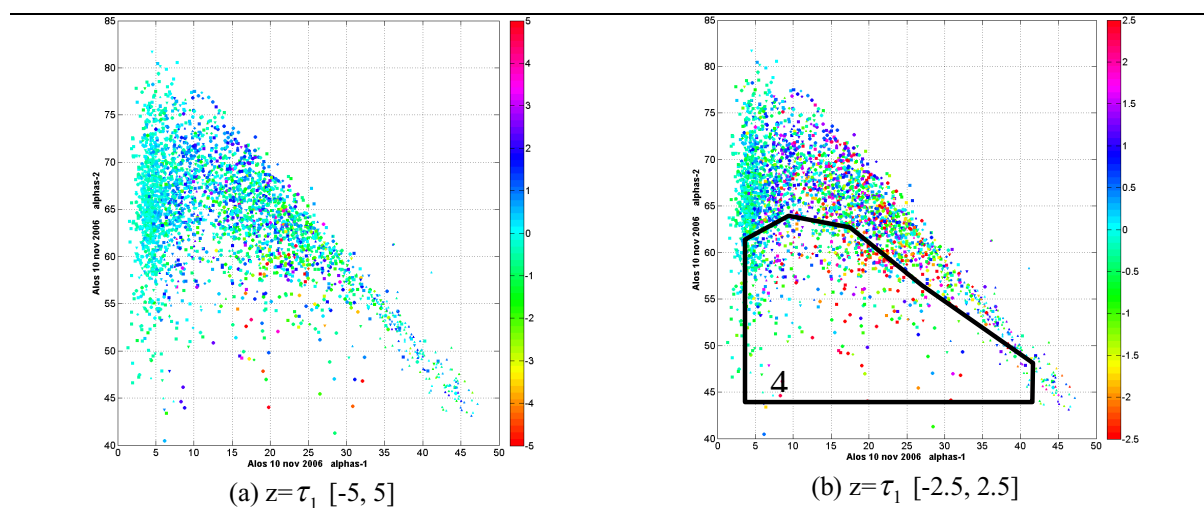


Figure 10.5-2 : Relation entre le type dominant (α_{s1}) et le second type de rétrodiffusion symétrique (α_{s2}) par classe physiologique selon τ_1 , données ALOS 10 novembre 2006,

10.5.2. Interprétation physique de α_{s2}

Dans la section précédente, nous avons identifié quatre types de relations : axes 1, 2 et 3, en plus de la zone 4 (Figure 10.5-1). Déjà pour la zone 4 nous avons mentionné que la manifestation d'un découplage entre α_{s1} et α_{s2} pour certains objets était explicable par la première hélicité (τ_1). Il reste donc à trouver une explication physique pour les autres relations.

«Axe 1» : Il a été mentionné que pour une rétrodiffusion de surface dominante, l'angle α_{s2} pouvait prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle $[0-90^\circ]$. En comparant à l'échelle du pixel la relation entre α_{s1} et α_{s2} pour les rétrodiffusions de surface ($\alpha_{s1} < 7^\circ$), il n'a pas été possible d'observer une forme quelconque de relation entre ces deux paramètres. En examinant des champs agricoles qui en novembre 2006 présentaient ce comportement, on a constaté que la distinction entre α_{s1} et α_{s2} tient à l'homogénéité locale des pixels du champ. Ainsi pour un champ dont la valeur moyenne de α_{s1} est représentative de l'ensemble du champ, α_{s2} varie d'un extrême à l'autre à l'intérieur du champ mais cette variabilité spatiale de α_{s2} n'apparaît pas être aléatoire comme le montre la Figure 10.5-3. Le seuillage de ce paramètre montre en effet que ce passage d'un extrême à l'autre (par exemple $\alpha_{s2} > 72^\circ$ ou $\alpha_{s2} < 60^\circ$) ne se fait pas d'un pixel à l'autre mais par groupement de pixels (Figure 10.5-3-F). Pour α_{s3} (non présenté), au contraire, ce passage est aléatoire. En gardant en mémoire que la première composante principale est très dominante, il n'a pas été possible d'identifier une cause physique expliquant le comportement de α_{s2} ce qui est d'autant plus difficile en l'absence de données terrain.

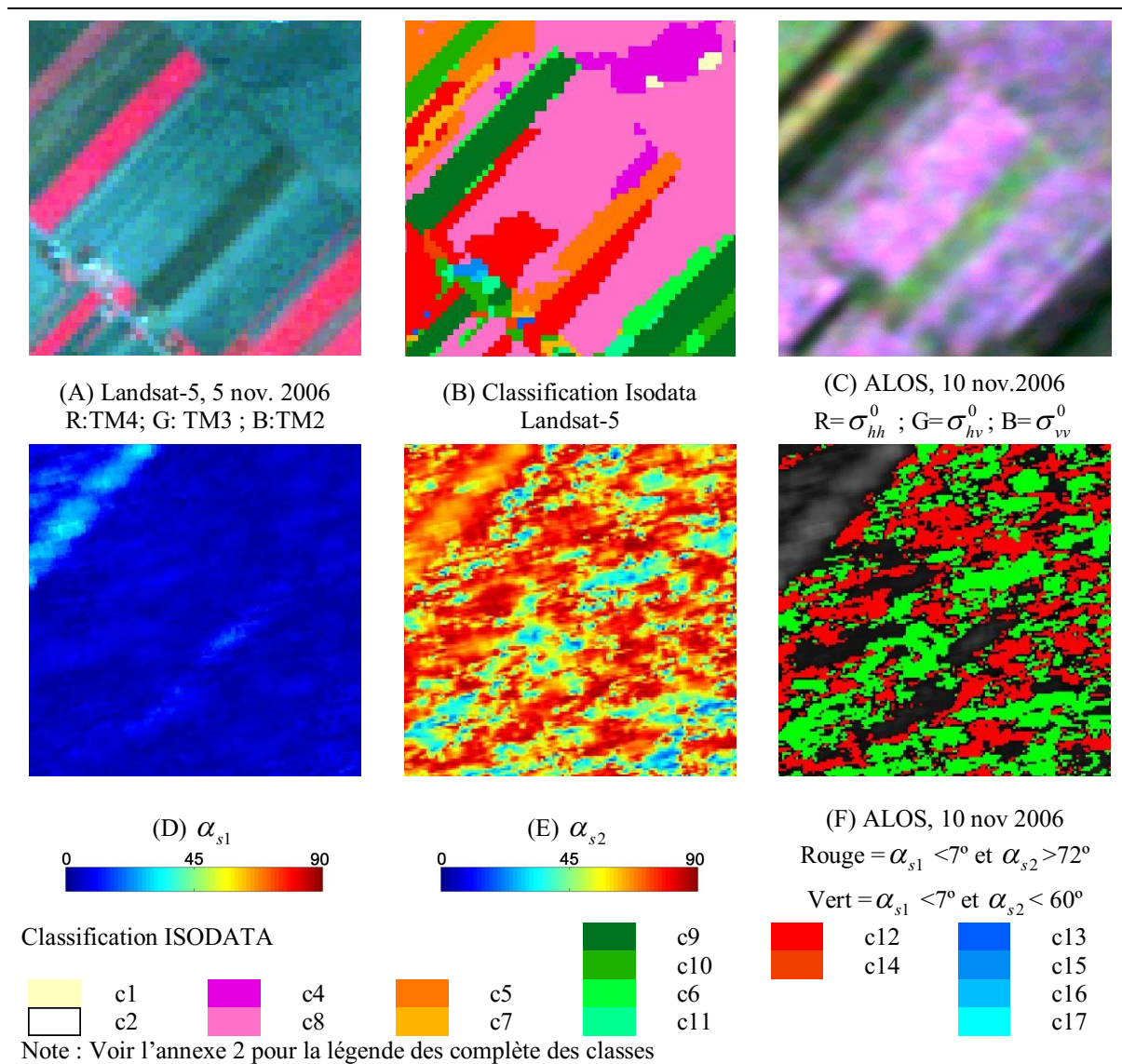
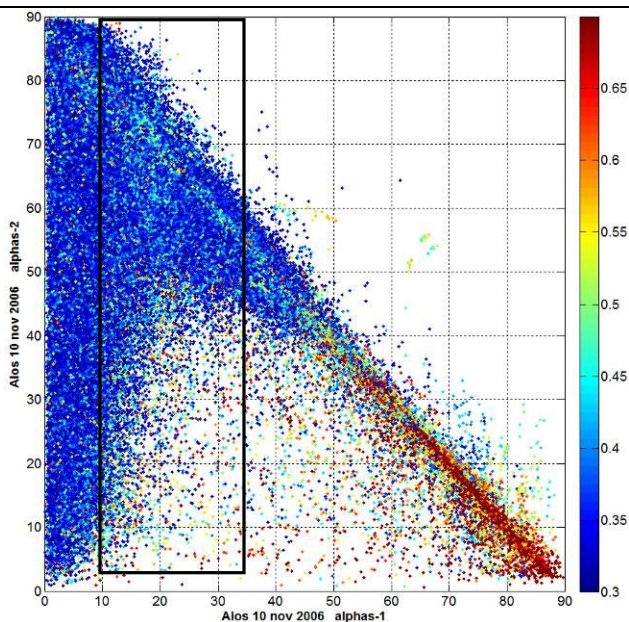


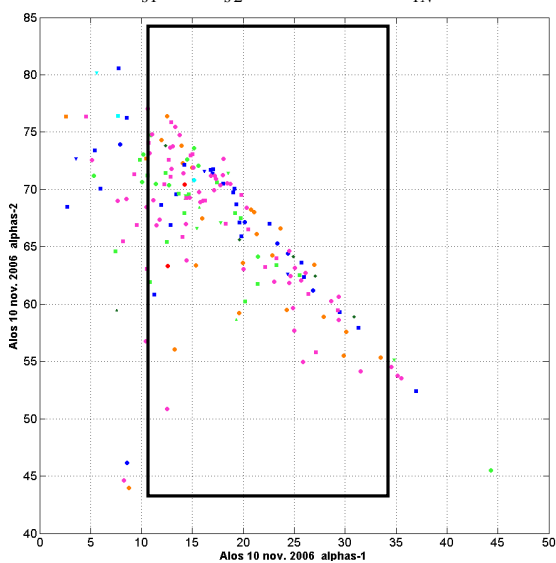
Figure 10.5-3 : Relation entre α_{s1} et α_{s2} où la rétrodiffusions de surface est le mécanisme dominant, ALOS 10 novembre 2006

«Axes 2 et 3». Pour expliquer le comportement des pixels (ou des objets) en α_{s2} lorsque α_{s1} croît au-delà de 7° nous avons analysé l'Anisotropie. En effet, les objets dont $10^\circ < \alpha_{s1} < 35^\circ$ étaient également ceux pour lesquels une anisotropie significative (fixée à $A > 0.3$) avait été identifiée. La relation entre α_{s1} et α_{s2} pour les pixels dont l'anisotropie est supérieure à 0.3 (et $\lambda_{1N} < 0.85$) ne suit pas un pattern particulier dans l'espace $\alpha_{s1} - \alpha_{s2}$ (Figure 10.5-4) mais mentionnons que :

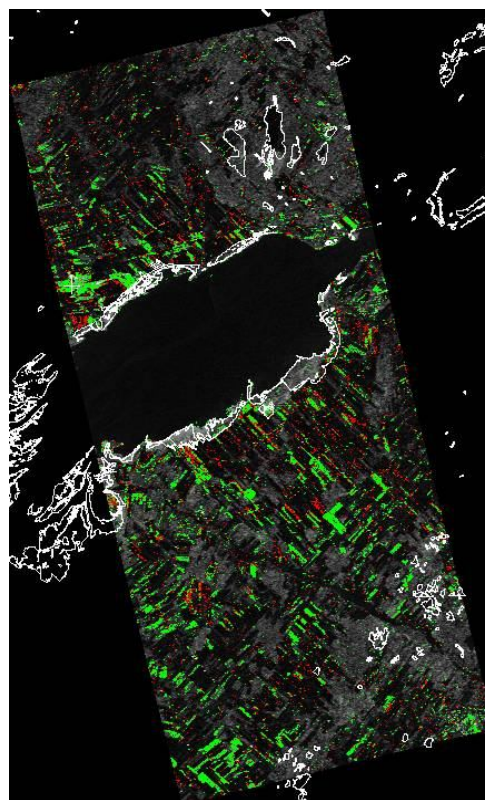
- i. Plus l'anisotropie est élevée, plus la valeur de α_{s2} tend à être l'opposée de α_{s1} (Figure 10.5-4-A) à l'exception des pixels «découplés» caractérisés par une valeur τ_1 élevée (Figure 10.5-3);
- ii. Les fortes valeurs d'Anisotropie sont regroupées spatialement ce qui est particulièrement évident pour les champs agricoles (Figure 10.5-4-C)²⁴.



(A) α_{s1} vs α_{s2} si $A > 0.3$ et $\lambda_{1N} < 0.85$, $z = A$



(B) α_{s1} vs α_{s2} si $A > 0.3$, par objet (181 objets)



(C) Rouge : $A > 0.3$ et $\alpha_{s1} < 10^\circ$ et $\lambda_{1N} < 0.85$

Vert : $A > 0.3$ et $\alpha_{s1} > 10^\circ$ et $\alpha_{s1} < 30^\circ$

Note 1 : Imagerie A, pour l'ensemble de l'image non géocodée (multi-vues 3x1) excluant le lac Saint-Pierre.

Note 2 $A > 0.3$ = 691 454 pixels
(sur 6 471 381)

$A > 0$ = 238 432 pixels
(sur 6 471 381)

(excluant le lac Saint-Pierre)

Figure 10.5-4 : Relation entre α_{s1} et α_{s2} pour les fortes valeurs d'Anisotropie (A), ALOS 10 novembre 2006 : (A) par pixel, (B) par objet, (C) localisation sur l'image

²⁴ Plusieurs de ces champs n'ont pas été inclus dans la base de données car localisés à une zone ennuagée de l'image Landsat-5 ayant servi de vérité terrain (Novembre 2006).

En résumé (Tableau 10.5-1), moins de 4.5% des objets (129/3053) possédaient une anisotropie significative le 10 novembre 2006 (c.-à-d. $A > 0.3$ et $\lambda_{1N} < 0.85$). Pour ces objets, la valeur de α_{s2} dépend fortement de la valeur de α_{s1} et particulièrement pour l'intervalle $15^\circ < \alpha_{s1} < 40^\circ$ pour lequel $\alpha_{s2} \approx 90^\circ - \alpha_{s1}$. Bien que la proportion des objets concernés soit faible, ces objets revêtent néanmoins une importance particulière car : 1) Ils ont un comportement polarimétrique intéressant et ; 2) ils sont représentatifs des physiologies que l'on retrouve dans les milieux humides et en particulier dans les hauts et bas marais herbacés (Scirpe, Typha, Zizanie...) comme nous le verrons dans la partie V avec les données RADARSAT-2.















classe	Nb_objets	classe	Nb_objets
 c1	2 / 59 (3.4 %)	 c6	6/90 (6.7%)
 c4	4 / 82 (4.9%)	 c9	12/185 (6.5 %)
 c8	17/194 (8.8%)	 c10	4/ 131 (3.0 %)
 c5	12/81 (14.8%)	 c11	3/ 160 (1.9 %)
 c7	1/43 (2.3%)	 c13	1/91 (1.1%)
 c12	41/ 190 (21.5%)	 c15	1/ 120 (0.83%)
 c14	21/ 146 (14.4%)	 c94	4/ 163 (2.5%)

Tableau 10.5-1 : Sommaire des objets par classes physiologiques avec une anisotropie supérieure à 0.3, 10 novembre 2006

Le faible nombre d'objets ayant une anisotropie significative et caractérisés par $15^\circ < \alpha_{s1} < 30^\circ$ est attribuable aux dates d'acquisitions des images ALOS situées hors de la période de croissance pour lesquelles la plupart des physiologies végétales étaient sénescentes ou absentes.

Si l'espace λ_{1N} et λ_{2N} a permis de déduire la présence d'un second mécanisme de rétrodiffusion significatif, l'interprétation de la nature de ce second mécanisme avec α_{s2} apparaît difficile et sujette à caution, comme le souligne par ailleurs Praks *et al.* (2009) en discutant en général des «angles alpha». C'est-à-dire qu'il faut être prudent à ne pas donner une interprétation physique à la valeur de α_{s2} dans le cas où sa valeur est avant tout le reflet d'une relation mathématique avec α_{s1} .

10.5.3. Type global de rétrodiffusion symétrique (α_{sg})

La question posée ici est si l'utilisation du type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) cause une perte d'information par rapport au type global de rétrodiffusion symétrique (α_{sg}). Mathématiquement, les objets peu affectés par la somme pondérée de α_{s1} , α_{s2} et α_{s3} sont ceux pour lesquels λ_1 est élevé. Dans cette situation l'ajout des valeurs de α_{s2} et α_{s3} ne contribue pas beaucoup à la somme globale des types de rétrodiffusion. Un second cas concerne les rétrodiffusions dipolaires ($\alpha_{s1}=45^\circ$) puisque, comme nous l'avons mentionné, α_{s2} tend fortement à être le complément de α_{s1} pour les valeurs moyennes de λ_{1N} . Par exemple, si $\alpha_{s1}=45^\circ$ alors $\alpha_{s2} \approx 90^\circ - \alpha_{s1}$, soit 45° et α_{sg} se maintiendra alors dans la région des rétrodiffusions dipolaires.

La Figure 10.5-5 présente la relation entre α_{s1} et α_{sg} pour les diverses classes physiologiques. Sauf exception, l'ensemble des objets des physiologies dénudées (peu importe leurs conditions de surface) se répartit dans une zone de l'espace $\alpha_{s1}-\alpha_{sg}$ (axe 1) où la valeur de α_{sg} augmente plus rapidement que α_{s1} et où la différence est proportionnelle à λ_1 (Figure 10.5-6-A). Pour ces physiologies dénudées, l'utilisation de α_{s1} ou de α_{sg} relève donc de l'objectif visé. Si l'objectif consiste à classifier les surfaces dénudées en une seule classe alors α_{s1} est avantageux. Si au contraire on veut procéder à une analyse de sensibilité (humidité, rugosité) il est avantageux d'utiliser α_{sg} qui tiendra compte des contributions de λ_2 et λ_3 . Mais dans les deux cas, aucun des deux paramètres ne permet de discriminer certains champs très rugueux (c17 principalement) d'une partie des objets des physiologies arborées (Figure 10.5-5, zone C). Pour les physiologies arborées et arbustives (c91 à c95, c181 et c191), la gamme dynamique de α_{s1} est plus grande que celle observée pour α_{sg} . Ainsi peut-on entrevoir qu'avec α_{s1} on obtient une meilleure caractérisation de la rétrodiffusion en nombre impair de réflexions que l'on peut associer à la profondeur optique des canopées. Les effets de la rétrodiffusion volumique (et multiple), qui affecteront principalement λ_{2N} et λ_{3N} , contribueront à "homogénéiser" la rétrodiffusion de ces dernières d'où une réduction de la

gamme dynamique de α_{sg} incluant même une portion appréciable des marécages arborés ($\alpha_{sg} < 45^\circ$).

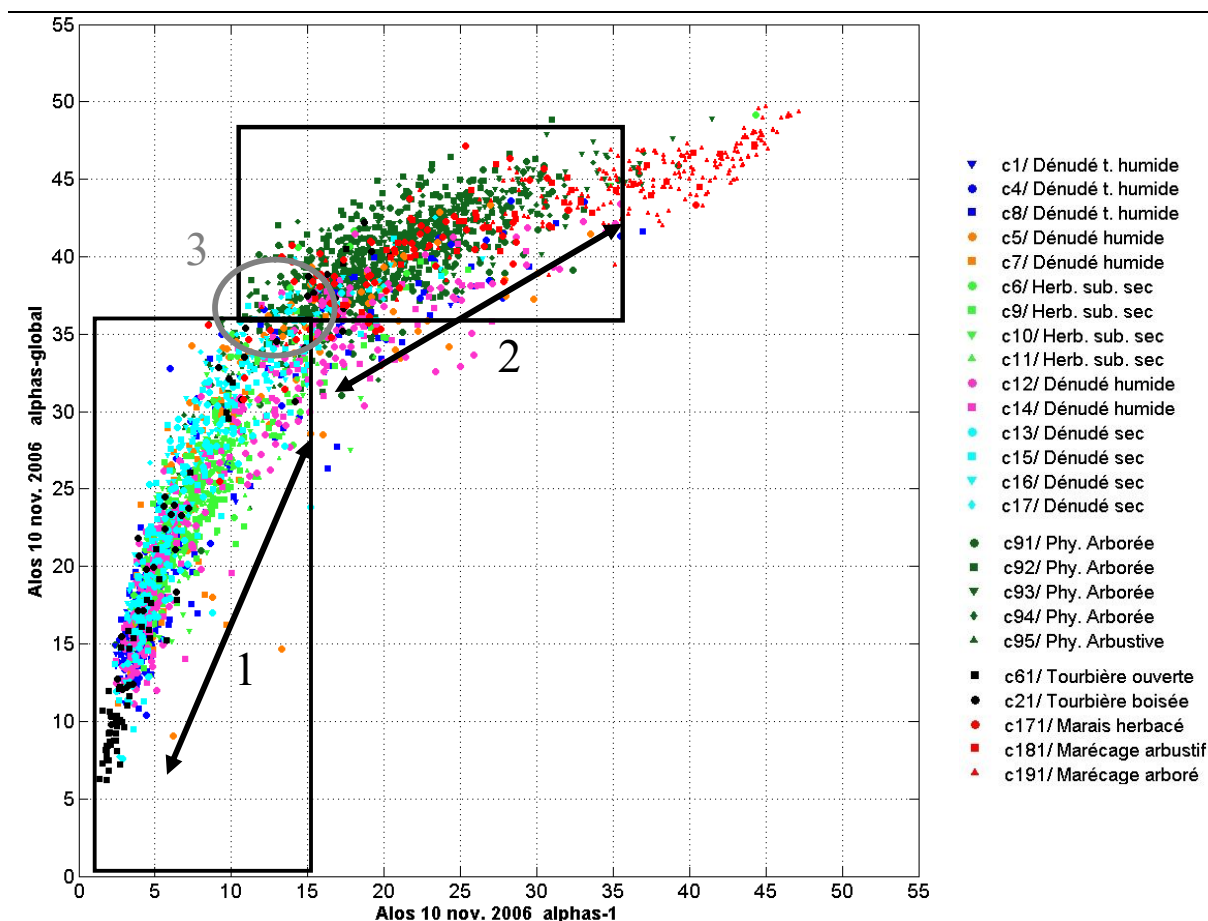


Figure 10.5-5 : Relation entre le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) et le type global de rétrodiffusion symétrique (α_{sg}), par phytionomie végétale, 10 novembre 2006

Les objets comportant une Anisotropie significative (Figure 10.5-6 B) constituent une classe particulière de la relation entre α_{s1} et α_{sg} . Pour ces objets, l'absence d'une troisième valeur propre et la propension de α_{s2} à être le complément de α_{s1} entraîne un centrage de α_{sg} vers 45° . Cette observation sera mise en évidence dans le cas de RADARSAT-2 (chapitre 14) pour diverses phytionomies pour lesquelles un "aplatissement" des signatures saisonnières de α_{sg} et de $\bar{\alpha}_c$ (décomposition de Cloude) sera observée comparativement à celles de α_{s1} et α_{s2} .

Ainsi, ayant vu que la relation entre le premier et le second type de rétrodiffusion symétrique est souvent de nature mathématique plutôt que physique, il apparaît prudent de considérer

individuellement ces paramètres, réflexion qui s'étend aussi aux autres paramètres de la décomposition de Touzi. Il est donc préférable de considérer individuellement les trois vecteurs de rétrodiffusion plutôt que leur version pondérée par les valeurs propres. Praks et *al.* (2009) abondent également en ce sens.

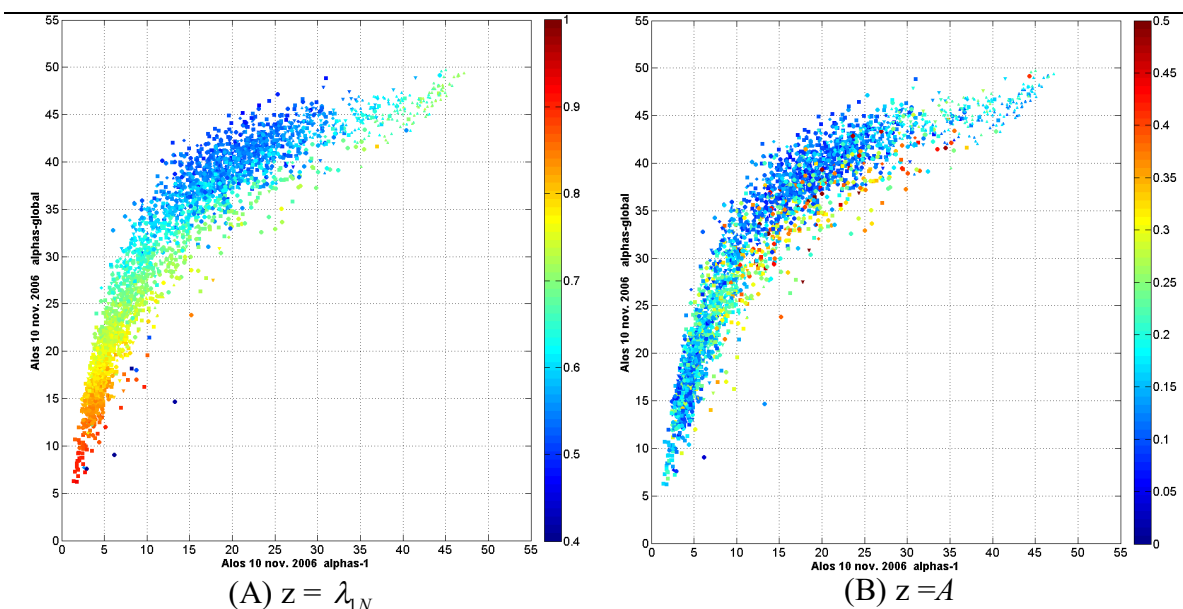


Figure 10.5-6 : Relation entre le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{sl}) et le type global de rétrodiffusion symétrique (α_{sg}), en fonction de la première valeur propre (λ_{1N}) et de l'anisotropie (A), 10 novembre 2006

10.6. L'hélicité (τ)

Pour cette analyse, nous considérerons dans un premier temps l'ensemble des pixels des images ALOS (sous-section 10.6.1) pour ensuite examiner le comportement des classes physiologiques à l'échelle de l'objet (sous-section 10.6.2). La dernière sous-section (10.3.3) se penchera sur l'analyse d'un sous-ensemble d'objets similaires à ceux des classes c5, c8 et c12 pour lesquels un comportement polarimétrique distinct a été précédemment identifié.

10.6.1. Analyse par pixel à l'échelle de la scène

La région du Lac Saint-Pierre couverte par les données ALOS est majoritairement constituée de cibles distribuées possédant une forte symétrie azimutale tel que prédit par la théorie. C'est donc sans surprise que la distribution normalisée de τ_1 , pour les deux acquisitions ALOS, est

très étroite et centrée sur 0° (Figure 10.6-1). À l'exception de quelques cibles ponctuelles isolées, la distribution du paramètre τ_1 se concentre entre -10° et 10° avec une forte densité dans l'intervalle -2.5° à 2.5° . La seconde (τ_2) et troisième (τ_3) hélicité possèdent à l'opposée une distribution très étendue et quasi rectangulaire.

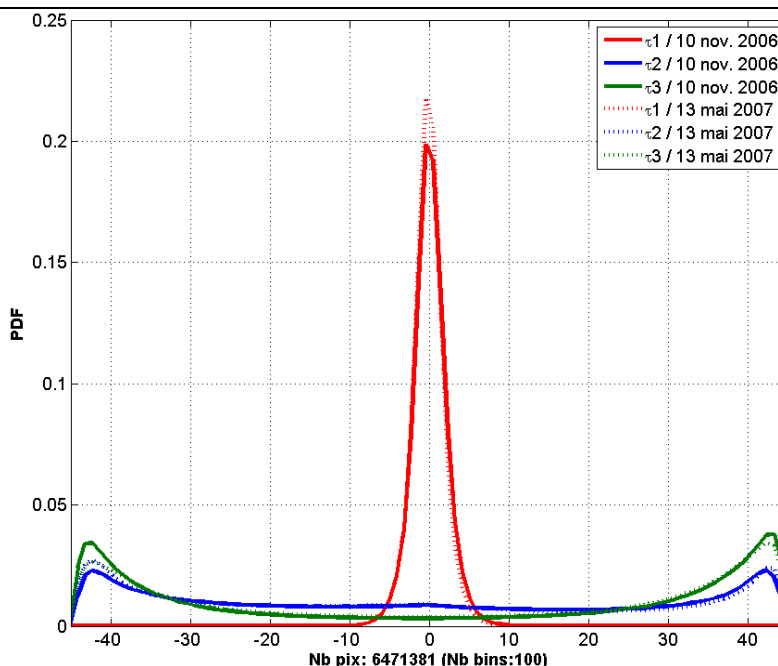


Figure 10.6-1 : Distribution normalisée de la première (τ_1), seconde (τ_2) et troisième (τ_3) hélicité (scènes compètes excluant les pixels d'eau libre du Lac Saint-Pierre), 10 novembre 2006 et 13 mai 2007

L'espace formé des paramètres τ_1 et τ_2 est présenté à la Figure 10.6-2 et quatre zones de cet espace seront brièvement décrites pour mieux circonscrire la relation entre ces deux paramètres.

Zone 1

La première zone correspond à la situation où les deux hélicités sont nulles ou près de zéro (Figure 10.6-2-A). Les pixels compris dans la zone définie par $-1^\circ \leq \tau_1 \leq 1^\circ \cup -1^\circ \leq \tau_2 \leq 1^\circ$ sont isolés et très dispersés sur l'image du 10 novembre à l'exception de quelques regroupements de pixels situés dans la seule ville présente dans le secteur. En termes de densité, cette zone ne concerne que 1.2% des pixels de la scène du 10 novembre. En élargissant le seuil $-1^\circ \leq \tau_1 \leq 1^\circ \cup -5^\circ \leq \tau_2 \leq 5^\circ$ on ne constate pas de changements dans la répartition spatiale des pixels mis à

part une augmentation de la densité des pixels isolés tout autant dans les secteurs agricoles que forestiers. Ainsi, à l'exception des rassemblements de pixels qui correspondent à des cibles ponctuelles, il s'agit ici de bruit.

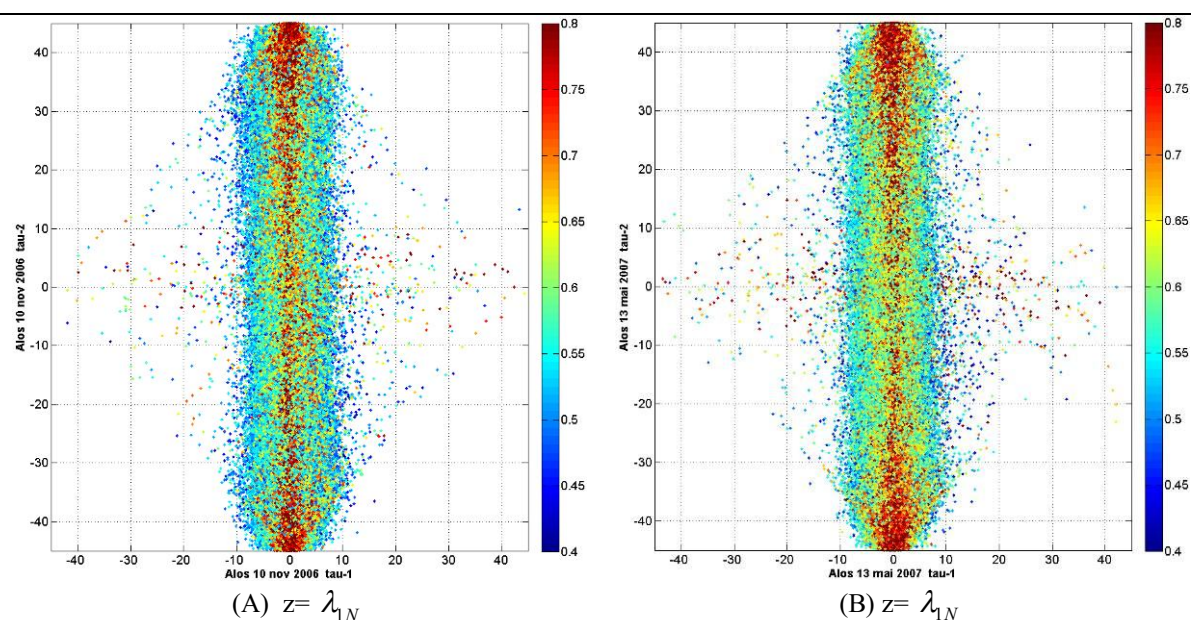


Figure 10.6-2 : Relation entre la première (τ_1) et la seconde hélicité (τ_2) par pixel (excluant les pixels d'eau libre du Lac Saint-Pierre) : (A) ALOS 10 novembre 2006 ; (B) ALOS 13 mai 2007

Zone 2

La deuxième zone correspond à la situation où τ_1 est nulle alors que τ_2 tend vers les extrêmes de sa distribution soit vers -45° ou 45° (Figure 10.6-3). Ce cas survient pour les rétrodiffusions de surface pures pour lesquelles α_{s1} se situe près de zéro et accompagné d'un λ_{1N} élevée (Figure 10.6-3). En seuillant l'espace $\tau_1 - \tau_2$ par $-1.5^\circ \leq \tau_1 \leq 1.5^\circ \cup -35^\circ \geq \tau_2 \geq 35^\circ$, on obtient en moyenne $\alpha_{s1} = 5.17 \pm 3.7$ et $\lambda_1 = 0.76 \pm 0.11$ ce qui correspond à 15% des pixels de l'image. Le secteur de tourbière ouverte (Bog à éricacées et Fen herbacé pauvre) de la Baie des Mines est presque entièrement compris à l'intérieur de cette zone contrairement aux champs agricoles qui, typiquement, sont à moitié couverts par un masque issu du seuillage précédent. En relaxant la contrainte sur la symétrie de rétrodiffusion de τ_1 en utilisant le seuil $-5^\circ \leq \tau_1 \leq 5^\circ \cup -35^\circ \geq \tau_2 \geq 35^\circ$, la valeur moyenne de α_{s1} passe à 5.74 ± 3.75 et de λ_1 à 0.74 ± 0.11 tandis que le pourcentage des pixels inclus dans ce seuil passe à 20.4%. Pour inclure la majorité de la surface d'eau libre du lac Saint-Pierre et des champs agricoles concernés inclus dans la Zone 2, il est nécessaire d'élargir le seuil de τ_2 à ± 20 et 55% des pixels est maintenant compris

dans ce seuil cet intervalle ($-5^\circ \leq \tau_1 \leq 5^\circ \cup -20^\circ \geq \tau_2 \geq 20^\circ$). Beaucoup de secteurs forestiers sont également inclus à l'intérieur du seuil précédent. En ce qui concerne l'eau libre, l'hélicité est presque nulle et la première valeur propre très forte de sorte que la valeur de τ_2 se répartisse dans ce cas dans l'ensemble de l'intervalle -45° à 45° ce qui concerne également la portion des champs agricoles très symétriques, c.-à-d pour lesquels $-0.25^\circ \leq \tau_1 \leq 0.25^\circ$ ($\alpha_{s1} = 7.31 \pm 6.9$ et $\lambda_{1N} = 0.84 \pm 0.14$).

Zone 3

Plus la valeur de τ_1 augmente, plus la gamme dynamique de τ_2 se réduit, ce qui est mis en évidence à la Figure 10.6-2 pour les valeurs à l'extérieur du seuil $-10^\circ \leq \tau_1 \leq 10^\circ$. Cette troisième zone concerne peu de pixels (0.09%) et correspond très clairement à des cibles ponctuelles qui, par leur orientation ou leur géométrie, ont causé une forte asymétrie de rétrodiffusion.

Zone 4

La quatrième zone concerne les valeurs d'hélicité "moyennes" que l'on définit approximativement par $-10^\circ \leq \tau_1 \leq -2.5^\circ \cup 2.5^\circ \leq \tau_1 \leq 10^\circ$ et pour lesquelles τ_2 varie inversement et en signe opposé. Il s'agit du cas le plus intéressant car il correspond à : 1) un sous-ensemble de champs agricoles des classes c5, c12 et c14 qui se sont distinguées à quelques reprises dans les divers espaces polarimétriques examinés jusqu'à maintenant ; 2) une situation observée pour les physionomies des milieux humides, la classe des marais herbacés (c171) pour les deux acquisitions ALOS examinées ainsi que les bas marais à Scirpes (voir chapitre 11).

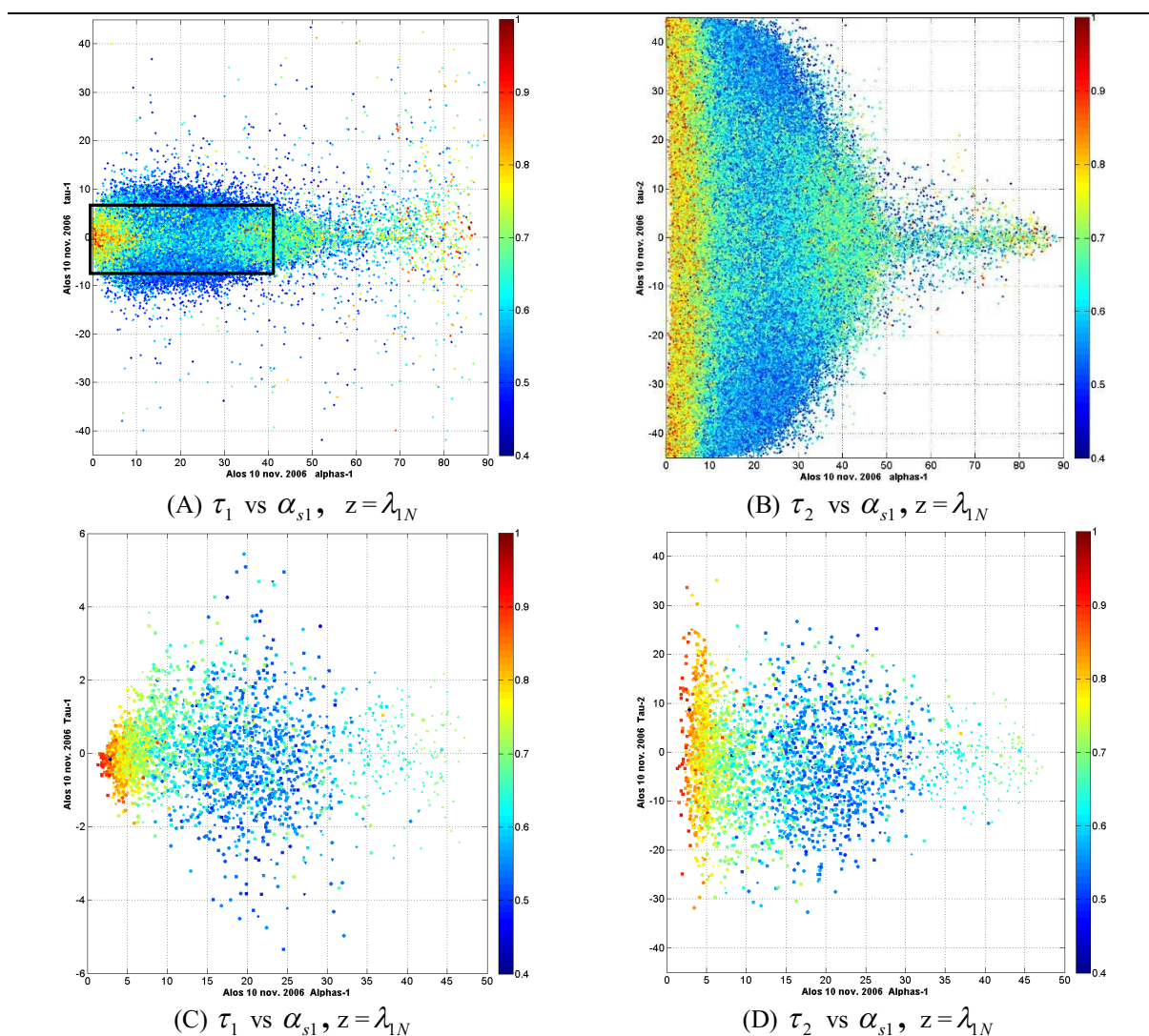


Figure 10.6-3 : Relation entre la première (τ_1), la seconde hélicité (τ_2) et le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}), scène complète (A et B), et par objets (C et D), 10 novembre 2006

10.6.2. Analyse à l'échelle des objets

Les Figure 10.6-4 A et B présentent la répartition des objets dans l'espace τ_1 - τ_2 (à comparer à la Figure 10.6-3). Il est évident que dans cet espace il est difficile de discriminer des ensembles de physiologies végétales au même titre que les espaces constitués des paramètres α_s - Φ_{α_s} et λ_i ou encore des canaux de polarisation (σ_{hh}^0 , σ_{hv}^0 et σ_{vv}^0). Tout comme l'Anisotropie, τ_1 permet de caractériser en détail un sous-ensemble d'objets mais n'appartenant nécessairement pas à une physiologie en particulier.

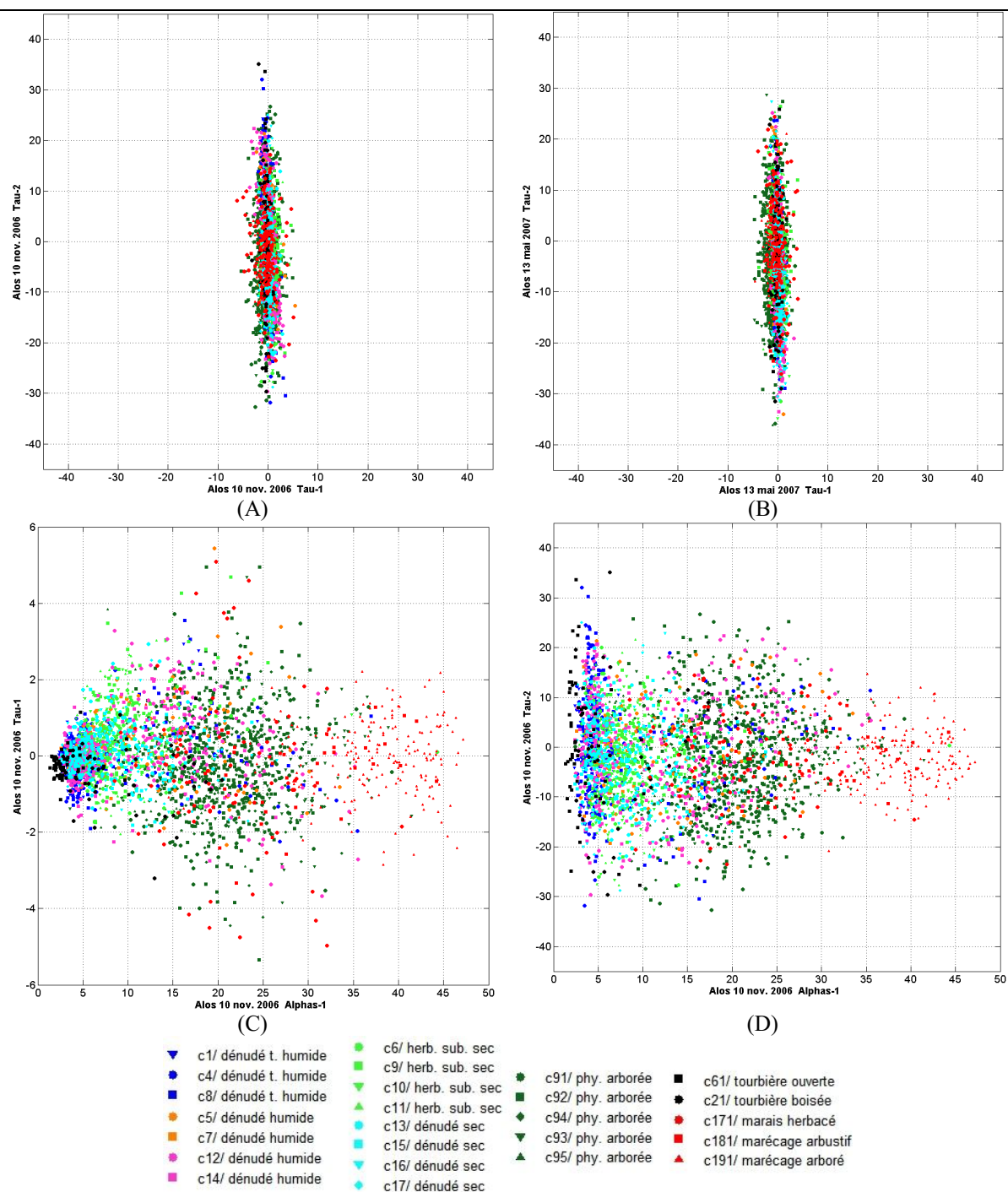


Figure 10.6-4 : Relation entre la première (τ_1) et la seconde hélicité (τ_2) par physionomie végétale : (A) ALOS 10 novembre 2006 ; (B) ALOS 13 mai 2007 ; (C) τ_1 vs α_{s1} novembre 2006 ; (D) τ_2 vs α_{s1} novembre 2006

À titre d'exemple, dans le cas de l'image de novembre 2006, 7.6 % des objets (233 /3054) possédaient une hélicité absolue moyenne supérieure à 2° ($|\tau_1| \geq 2^\circ$) et ce nombre chute à 3.4% (104/3054) si le seuil $|\tau_1| \geq 2.5^\circ$ est utilisé. Ainsi, comme dans le cas des autres

paramètres, l'analyse conjointe de τ_1 (et de τ_2) avec un autre paramètre polarimétrique offre un plus grand potentiel de discrimination des classes physiologiques comme le montre la Figure 10.6-5 (C et D) avec les données de novembre 2006 (à comparer à la Figure 10.5-3). Dans la sous-section qui suit nous analyserons plus en détail le comportement de l'hélicité et sa relation avec les autres paramètres polarimétriques ainsi que les canaux de polarisation.

10.6.3. Analyse de l'hélicité pour les objets présentant un bris de la symétrie azimutale

Si l'on se rapporte à la scène complète nous constatons effectivement que la première hélicité (τ_1) ne présente pas une grande variabilité spatiale en restant centrée autour de zéro, signe que la symétrie azimutale est répandue pour les cibles distribuées comme le veut la théorie. Pour identifier les objets où un bris de la symétrie azimutale est présent nous n'avons pas besoin de chercher dans les fortes valeurs comme c'est le cas avec l'Anisotropie. Ces faits sont illustrés par la Figure 10.6-5 avec un extrait de l'image ALOS de novembre 2006. Ainsi en utilisant des valeurs aussi faibles que -2.5 ou 2.5 comme seuils nous obtenons une démarcation nette de deux sous-ensembles de champs agricoles (Figure 10.6-5-F). Comme nous l'avons déjà signalé, ce sont ces objets qui présentent un grand intérêt car plusieurs physiologies des hauts et bas marais possèdent des caractéristiques similaires pour lesquelles la polarimétrie radar est particulièrement pertinente.

Si l'on revient à l'exemple de la Figure 10.6-5 on remarque que les deux catégories des champs rectangulaires reconnus après seuillage sont orientés différemment avec leur dimension la plus longue plus ou moins parallèle ou perpendiculaire au LOS du radar (ici de l'est vers l'ouest, orbite descendante). Ceux parallèles au LOS ont un τ_1 négatif tandis et les autres, un τ_1 positif. Tel que signalé par McNairn et *al.* (2002), pour les grandes cultures de maïs et de tournesol, la bande L interagit surtout avec le substrat tard à l'automne lorsque ces cultures sont sénescentes. Il est donc plausible que pour les champs récoltés, la présence de sillons créés par le travail mécanique des champs, nécessairement parallèle à leur axe le plus long, soit à l'origine de l'asymétrie de rétrodiffusion. Une autre cause souvent évoquée de ce bris de symétrie azimutale est la présence d'une pente du terrain dans la direction azimutale. Si dans ce cas précis une telle pente était présente nous aurions dû observer un comportement

particulier du ratio des polarisations circulaires $\sigma_{RR}^0 / \sigma_{LL}^0$. La similitude constaté entre τ_1 et le ratio ($\sigma_{RR}^0 / \sigma_{LL}^0$), la sensibilité de ces deux quantités à l'orientation de certains champs (Figure 10.6-5 C vs F) et l'absence de topographie significative dans le secteur permet d'écarter la pente comme facteur d'influence sur τ_1 ou $\sigma_{RR}^0 / \sigma_{LL}^0$.

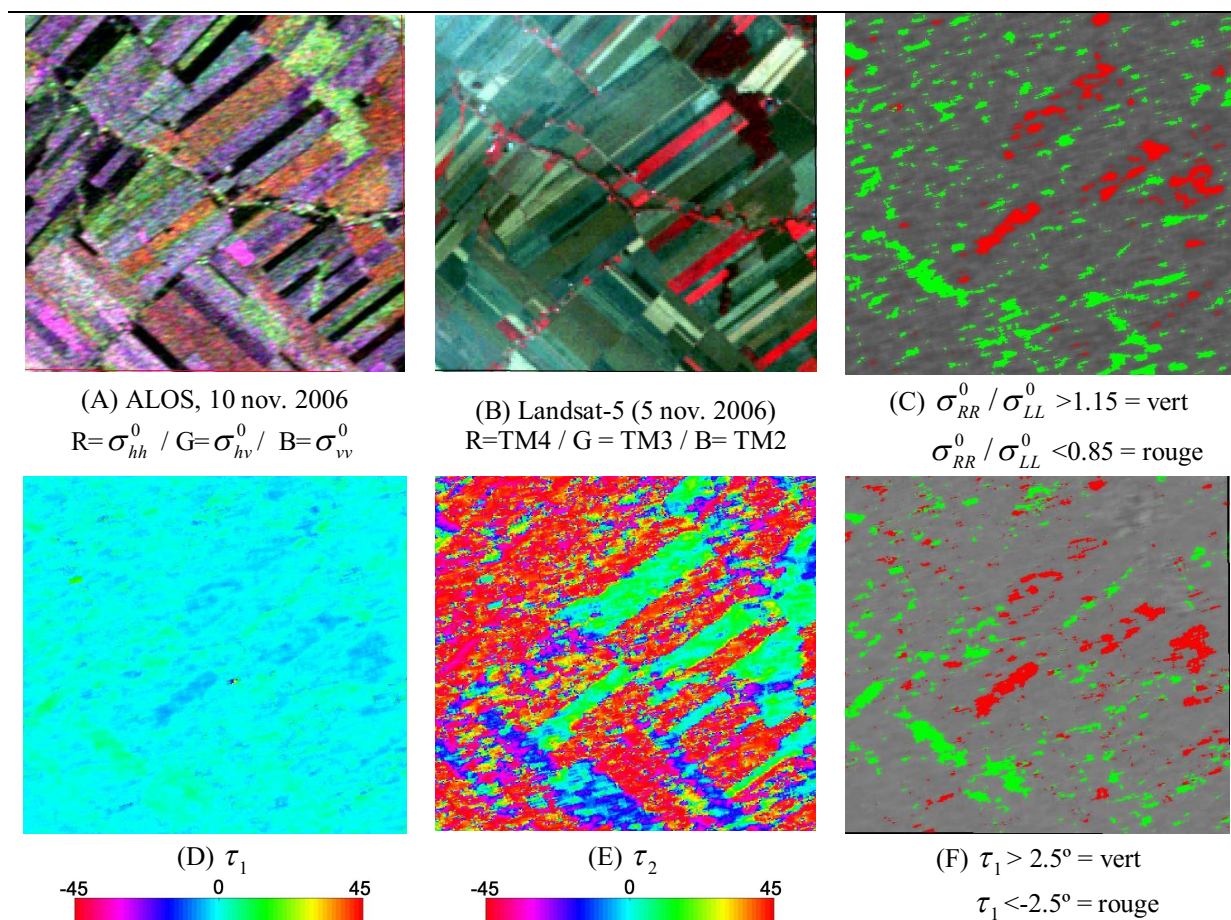
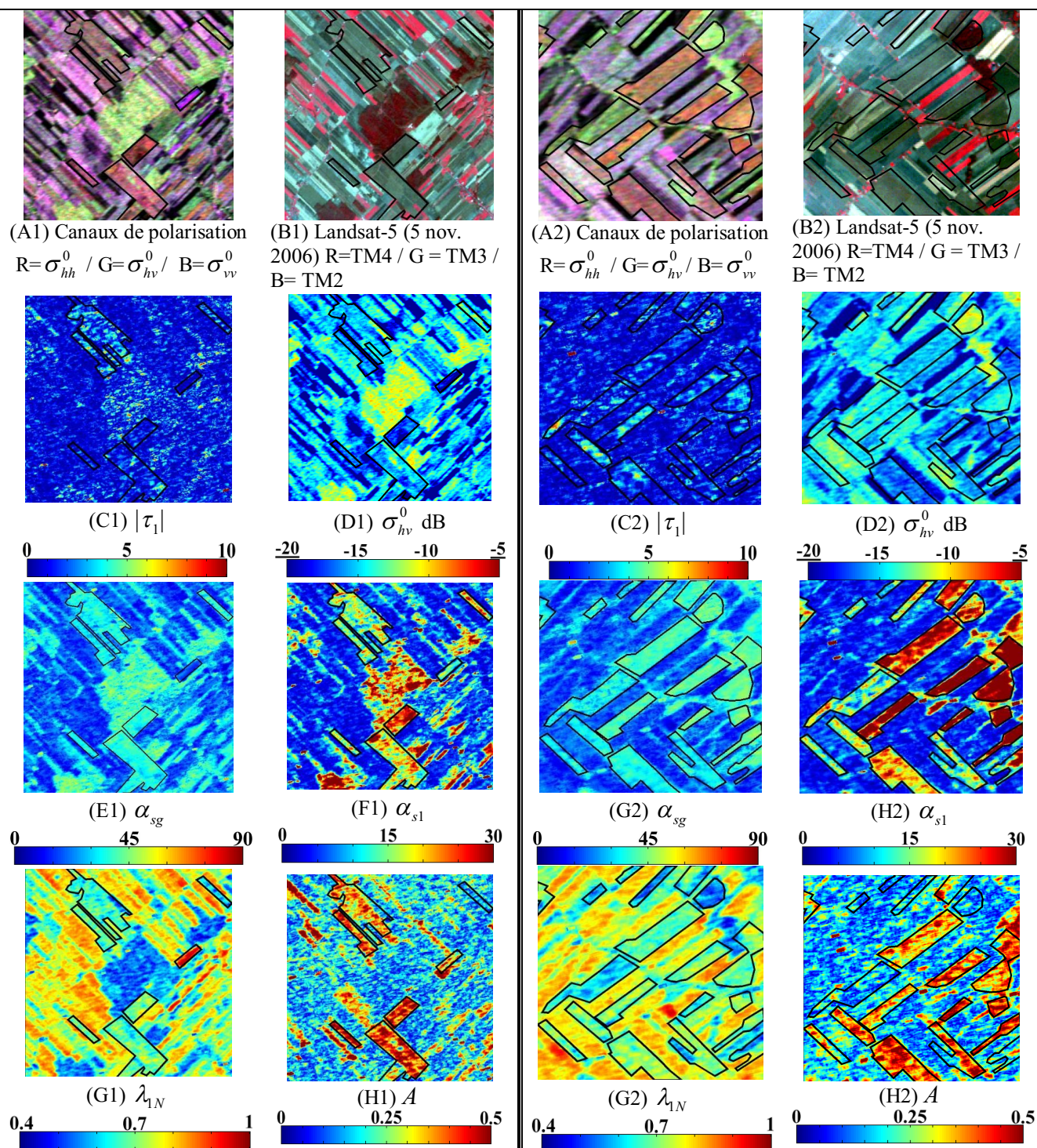


Figure 10.6-5 : Seuillage de la première hélicité (τ_1) et comparaison avec le ratio $\sigma_{RR}^0 / \sigma_{LL}^0$, 10 novembre 2006

Les deux exemples qui suivent illustrent avec des extraits de la scène ALOS de novembre 2006 les relations entre l'hélicité et divers paramètres polarimétriques ainsi que la polarisation σ_{hv}^0 (Figure 10.6-6). Nos analyses préliminaires nous ont en effet montré qu'une partie de l'information contenue dans τ_1 et τ_2 se retrouve dans leur distribution spatiale (c.-à-d. la texture) plutôt que dans leur valeur moyenne pour un objet donnée, notamment pour les physiologies arborées et arbustives. Ainsi les objets possédant une première hélicité significative (c.-à-d $|\tau_1| > 2.5^\circ$) se caractérisent généralement par une forte polarisation croisée

(Figure 10.6-6 C et D) se situant entre 0.15 (-16.5dB) et 0.25 (-12.0 dB). Une tendance à l'augmentation de $|\tau_1|$ et σ_{hv}^0 est observée, mais une asymétrie significative ne suffit pas à produire des valeurs de σ_{hv}^0 aussi élevée comme dans le cas d'une rétrodiffusion volumique ou multiple caractérisant les physiologies arborées (c91 à c95) et herbacées (c171) (Figure 10.6-6-D).

On note aussi qu'une structure qui brise la symétrie de réflexion crée une dépolarisation du signal notée par une baisse de λ_{1N} (Figure 10.6-6-G). Ce type de dépolarisation est déterministe au sens où elle peut être entièrement compensée lors d'une décomposition (Cloude, 2010, chap.2). Cela s'oppose à une dépolarisation du signal par les physiologies forestières (clairement visibles sur les images Landsat de la Figure 10.6-6-B1) qui, selon l'hétérogénéité du milieu, se caractérisent par un λ_1 plus faible ainsi qu'une quasi-absence d'Anisotropie (Figure 10.6-6-H1). Ici la forte valeur de polarisation croisée provient de la section radar des physiologies arborées beaucoup plus grande que celles des champs agricoles et l'ambiguïté de σ_{hv}^0 tient justement à l'amalgame des diverses sources de dépolarisation du signal et de la radiométrie des objets.



Note 1 : α_{s1} , A , $|\tau_1|$ et $|\tau_2|$, λ_1 et σ_{hv}^0 , borne supérieure à interpréter comme supérieur ou égal à (\geq)

Note 2 : λ_1 et σ_{hv}^0 , borne inférieure à interpréter comme inférieur ou égal à (\leq)

Note 3 : Le contour de certains champs a été tracé pour faciliter l'interprétation des imagettes

Figure 10.6-6 : Relation entre la première et la seconde hélicité absolue ($|\tau_1|, |\tau_2|$) en fonction des paramètres α_{s1} , α_{sg} , λ_{1N} et du canal σ_{hv}^0 , exemple 1 : A1 à H1, exemple 2 : A2 à H2, 10 novembre 2006

10.7. L'angle d'orientation ψ

L'angle d'orientation (ψ) permet en théorie de mesurer l'angle de rotation de certaines cibles canonique par rapport au LOS du radar (voir la section 3.3.1). La question posée ici consiste à savoir si on peut appliquer ce principe aux cibles distribuées. Pour les cibles symétriques où $\tau_1=0^\circ$, ψ devient égal à l'angle Beta de la décomposition de Cloude (Touzi, 2007a). L'angle d'orientation est sensible à la pente azimuthale et a également été relié à la rugosité des champs (Hajnsek et *al.*, 2003).

Tel que montré par la Figure 10.7-1, la distribution de ψ_1 est aplatie (maximum de 3% des pixels à 0°) comparativement à celle de τ_1 , de plus ψ_1 et ψ_2 possèdent approximativement la même distribution contrairement à τ_1 et τ_2 qui avaient des distributions opposées (voir la Figure 10.6-1).

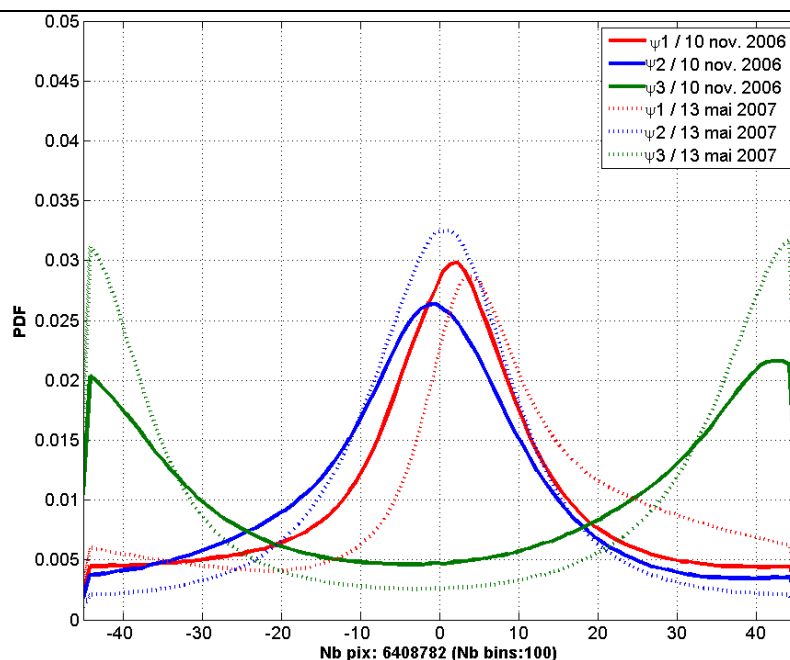


Figure 10.7-1 : Distributions normalisées du premier (ψ_1), second (ψ_2) et troisième (ψ_3) angle d'orientation, scènes complètes, 10 novembre 2006 et 13 mai 2007

Lorsqu'examiné à l'échelle du pixel, l'espace $\psi_1 - \psi_2$ est entièrement occupé (Figure 10.7-2A et B) contrairement à ce qui a été observé jusqu'à maintenant avec les autres paramètres. Observée à l'échelle de l'objet, la relation entre ψ_1 et ψ_2 se précise un peu mieux (Figure

10.7-3 A et B). Pour l'ensemble des objets, toutes physionomies confondues, pour lesquelles λ_{1N} n'est pas fort, ψ_1 et ψ_2 se centrent vers 0° ($\psi_1=0^\circ$, $\psi_2=0\pm 10^\circ$). De plus, un objet qui possède une valeur absolue ψ_1 élevée aura tendance à avoir également une valeur absolue ψ_2 élevée ce qui se vérifie autant pour l'image de novembre que celle de mai. Les fortes valeurs de ψ_1 sont associées aux classes physionomiques dénudées dominées par une rétrodiffusion de surface ($\alpha_{s1} < 10^\circ$) dominante ($\lambda_{1N} \approx > 0.75$) (Figure 10.7-3 E et F).

En mai 2007, on observe une augmentation généralisée de la pureté de la rétrodiffusion de surface que l'on déduit par l'augmentation de λ_{1N} (Figure 10.7-3 D). Cette augmentation de ψ_1 n'est cependant pas accompagnée d'une augmentation de ψ_2 qui, au contraire, connaît une diminution par rapport à novembre, c'est-à-dire un centrage vers 0° . Ce centrage vers 0° est généralisé pour toutes les physionomies. Il est difficile d'identifier si cette évolution est attribuable à une cause physique (par ex., réduction de la rugosité des sols) où à une cause mathématique (faiblesse de λ_2) surtout que l'on observe dans l'espace ψ_1 et ψ_2 , à l'échelle du pixel, des zones où la densité de points est très faible le long d'axes bien définis entre ces deux angles (Figure 10.7-2 C et D, le long des flèches).

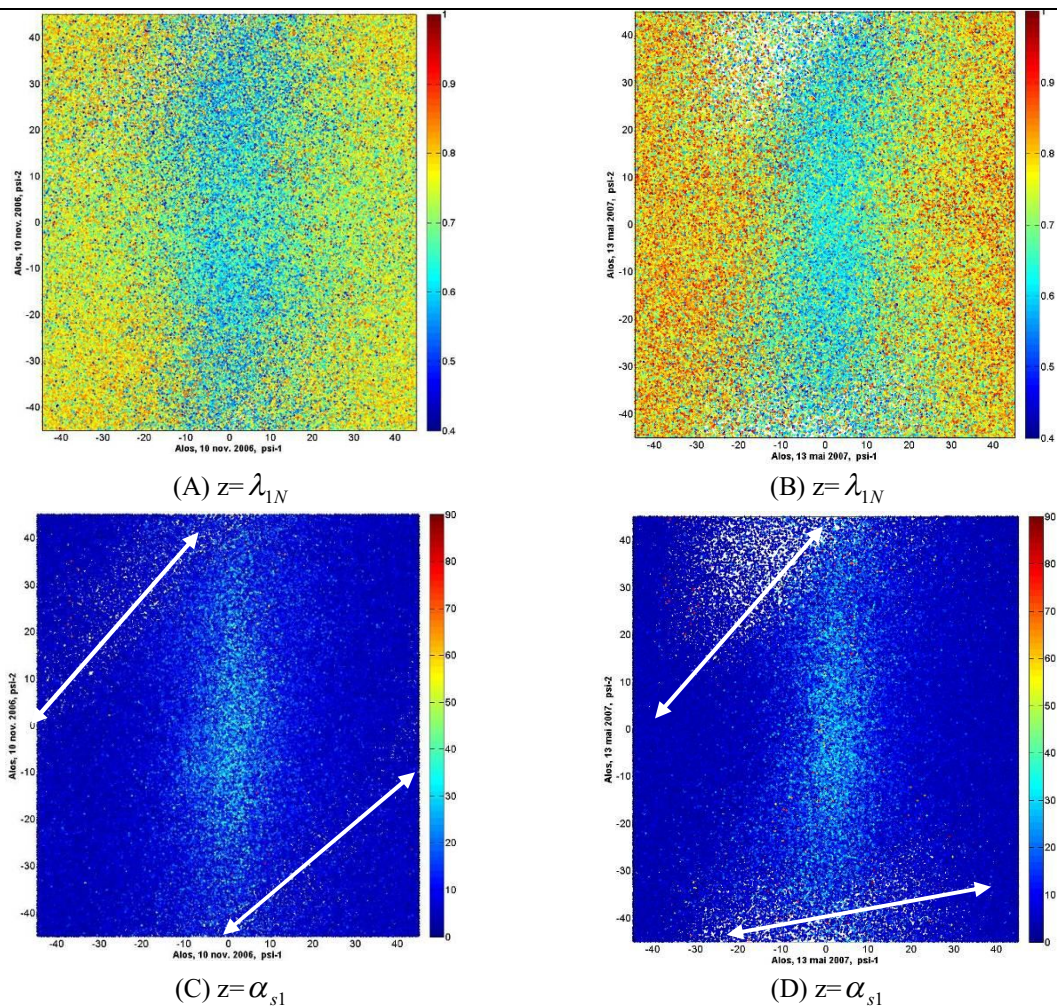


Figure 10.7-2 : Relation par pixel entre le premier (ψ_1) et second (ψ_2) angle d'orientation en fonction de λ_{1N} et α_{s1} , 10 novembre 2006 et 13 mai 2007

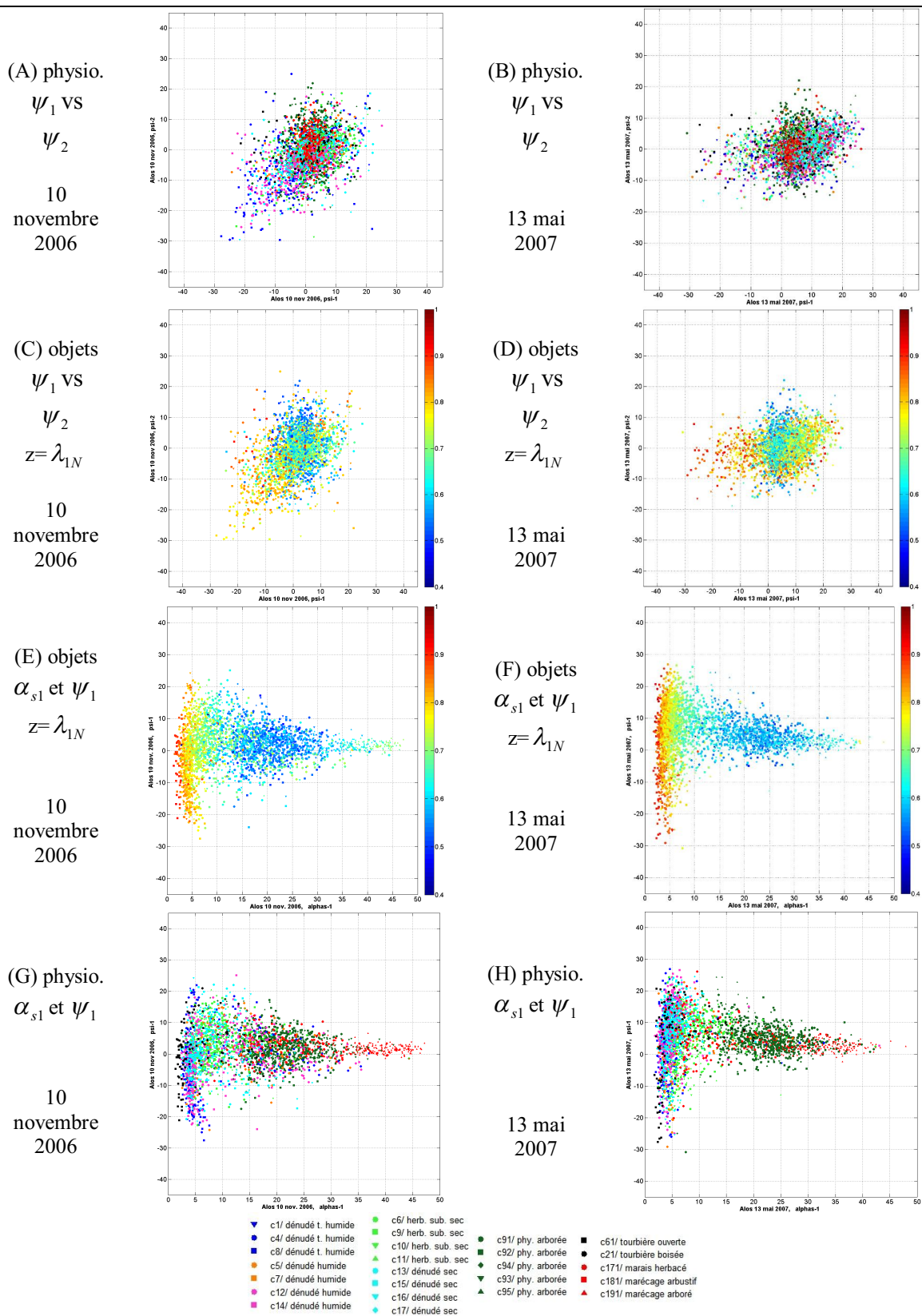
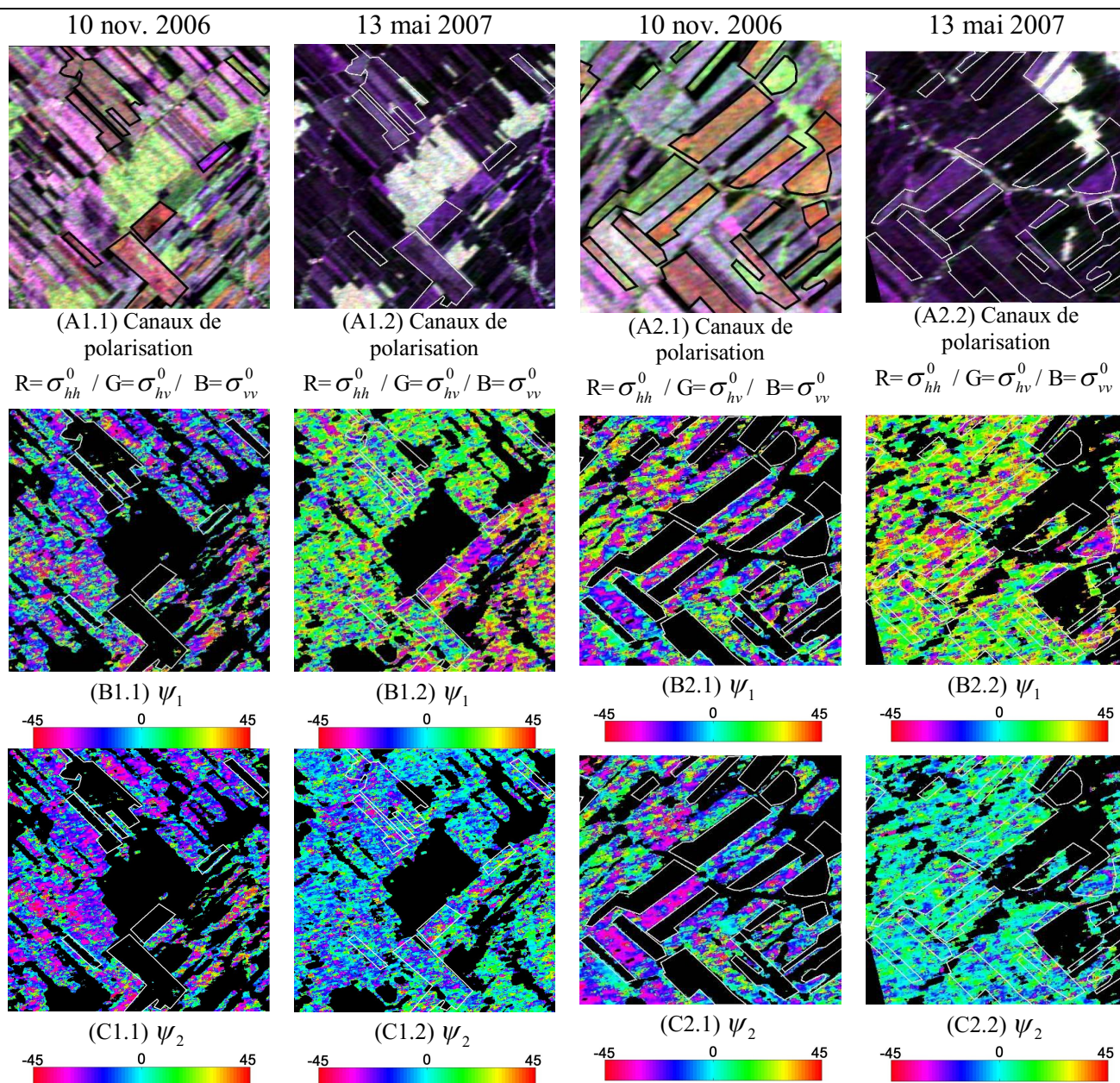


Figure 10.7-3 : Relation entre le premier (ψ_1) et second (ψ_2) angle d'orientation par classe phytosociologique et en fonction de λ_{1N} et α_{s1}

Le paramètre ψ_1 semble donc être rattaché à une propriété physique des physionomies dénudées peu rugueuses (absence d'Anisotropie ou encore si σ_{hv}^0 est faible). Mais cette propriété physique, nous l'avons mentionné, est difficile à identifier. D'une part, car le signe de ψ_1 n'est pas rattaché de près ou de loin à l'orientation des champs concernés et de l'autre, car la valeur de ψ_1 pour un même champ ne se maintient pas entre les deux acquisitions ALOS. Contrairement à la disparition des champs avec une forte hélicité, ce qui a pu être expliqué, la disparition de la rugosité de surface et l'augmentation de la pureté de la rétrodiffusion de surface entre novembre et mai aurait dû, si l'on se fie à l'interprétation de novembre, soit conserver l'angle l'orientation (meilleure estimation de la topographie locale par exemple), où pousser la distribution de ψ_1 vers les valeurs extrêmes.

La Figure 10.7-4 présente deux extraits des acquisitions ALOS où les paramètres ψ_1 et ψ_2 ont été masqués pour tout type de mécanisme de rétrodiffusion autre que les rétrodiffusions de surfaces (c.-à-d. $\alpha_{s1} > 10^\circ$ et $\lambda_{1N} < 0.72$). Les objets pour lesquels τ_1 se démarquait de 0° se situaient surtout dans l'intervalle $10^\circ < \alpha_{s1} < 30^\circ$ (Figure 10.6-6) alors que les fortes valeurs de ψ_1 se retrouvent clairement dans les rétrodiffusions de surface «pures», c'est-à-dire caractérisées par $\alpha_{s1} < 10^\circ$ et $\lambda_{1N} > 0.75$. Il faut aussi expliquer pourquoi ψ_1 passe des valeurs négatives ($\approx -20^\circ$) en novembre aux valeurs positives ($\approx 20^\circ$) en mai pour de nombreux champs (Figure 10.7-4). Sur la Figure 10.7-5, on remarque qu'il existe un lien entre ψ_1 et le ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ pour lequel ψ_1 est positif lorsque $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 > 1$ et négatif lorsque $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 < 1$ en présence d'une rétrodiffusion de surface dominante. La réduction de la rugosité de surface en mai entraîne une diminution de σ_{vv}^0 par rapport à σ_{hh}^0 et ainsi une augmentation du nombre d'objets pour lequel $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 > 1$ d'où un ψ_1 positif en mai (Figure 10.7-5 A1).



Note : Cette figure est en lien avec la Figure 10.6-6, les contours des champs ayant servi à identifier les objets une forte hélicité ou une rétrodiffusion de surface anisotropique ont été conservés

Figure 10.7-4 : Vue générale des paramètres ψ_1 et ψ_2 , exemple 1 : 10 novembre 2006 (A1.1 à C1.1) et 13 mai 2007 (A1.2 à C1.2) ; exemple 2 : 10 novembre 2006 (A2.1 à C.1) et 13 mai 2007 (A2.2 à C2.2)

Il est donc possible de retrouver avec le signe ψ_1 une information similaire à $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ (à savoir si $\sigma_{hh}^0 > \sigma_{vv}^0$ ou inversement) ce qui permet de compléter la description d'une rétrodiffusion de surface. Par contre, la relation entre ψ_1 et $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ n'est pas unique pour les

rétrodiffusions de surface pures. La Figure 10.7-5 montre qu'en novembre il y a deux relations de part et d'autre de $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 = 1$ pour la zone $\psi_1 < 0^\circ$ que ni α_{s1} ou λ_{1N} ni la classe physiologique ne peut expliquer. Cette «double relation» disparaît en mai.

L'introduction du ratio $\sigma_{135}^0 / \sigma_{45}^0$ permet de mieux comprendre cette «double relation» (Figure 10.7-6) de même que l'on retrouve une relation forte avec le signe de ψ_1 pour les rétrodiffusions autres que les rétrodiffusions de surface. Dans la base H-V une rétrodiffusion de surface pure (ou un nombre impair de réflexions) entraîne la même rétrodiffusion pour toutes les polarisations linéaires. Le ratio des polarisations linéaires $\sigma_{135}^0 / \sigma_{45}^0$, situées à mi-chemin entre les polarisations HH et VV, permet de manière non optimale de repérer les objets pour lesquels il y a un bris de symétrie tout comme pour le paramètre τ_1 et le ratio $\sigma_{RR}^0 / \sigma_{LL}^0$. Mentionnons aussi que les cas extrêmes du ratio $\sigma_{135}^0 / \sigma_{45}^0$ (c.-à-d. si $\sigma_{135}^0 \gg \sigma_{45}^0$ ou inversement) correspondent à une rétrodiffusion d'un dipôle orienté à 135° ou 45° dans la base H-V. En l'absence de données terrain détaillées, il n'est pas possible d'aller au-delà des constatations, mais il apparaît que le paramètre ψ_1 peut être autant influencé par la rugosité des physiologies dénudées (qui modifie le rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$) que par la structure des physiologies végétales.

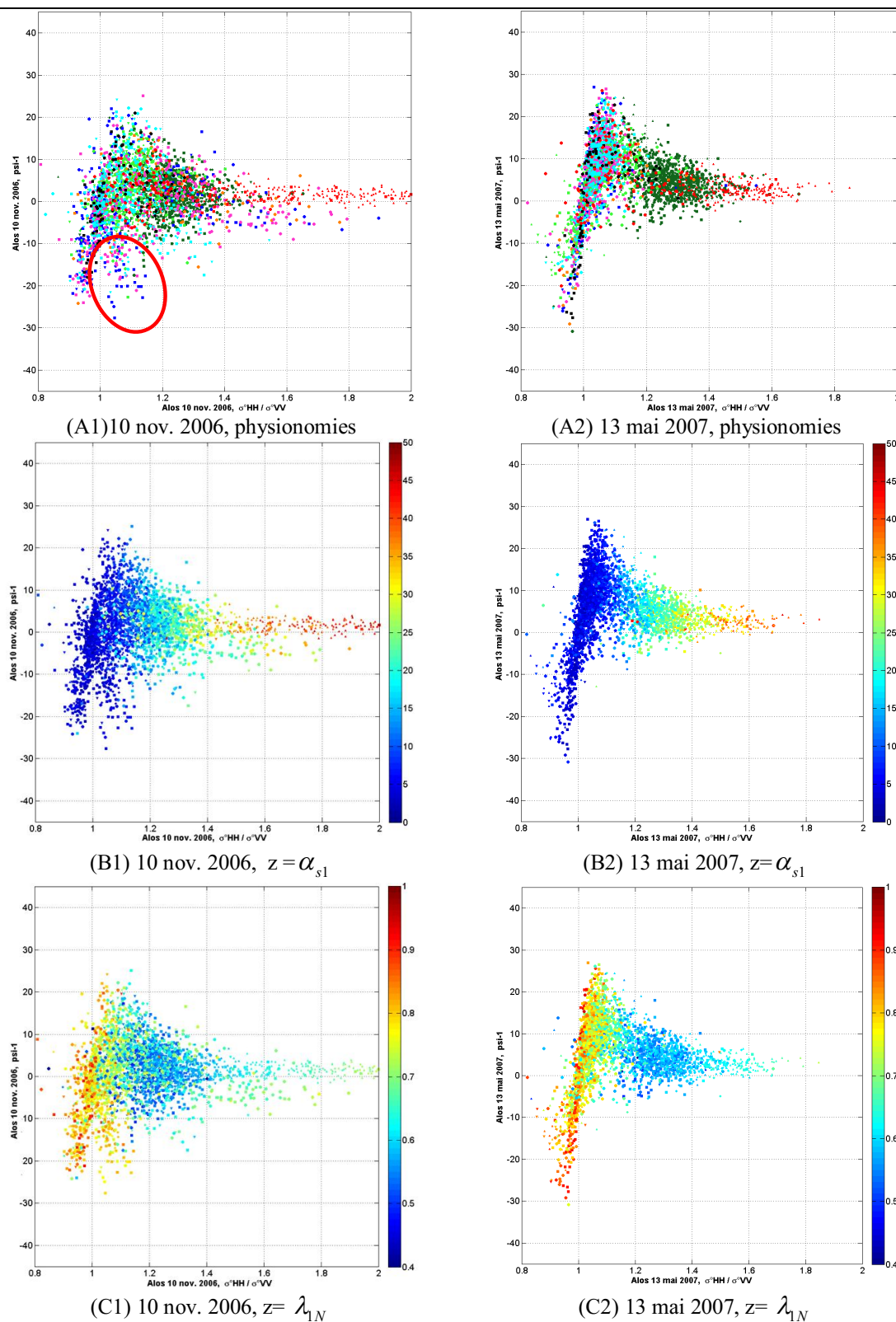


Figure 10.7-5 : Relation entre l'angle d'orientation (ψ_1) et le ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ en fonction de α_{s1} , λ_{1N} et des physionomies végétales, 10 novembre 2006 et 13 mai 2007

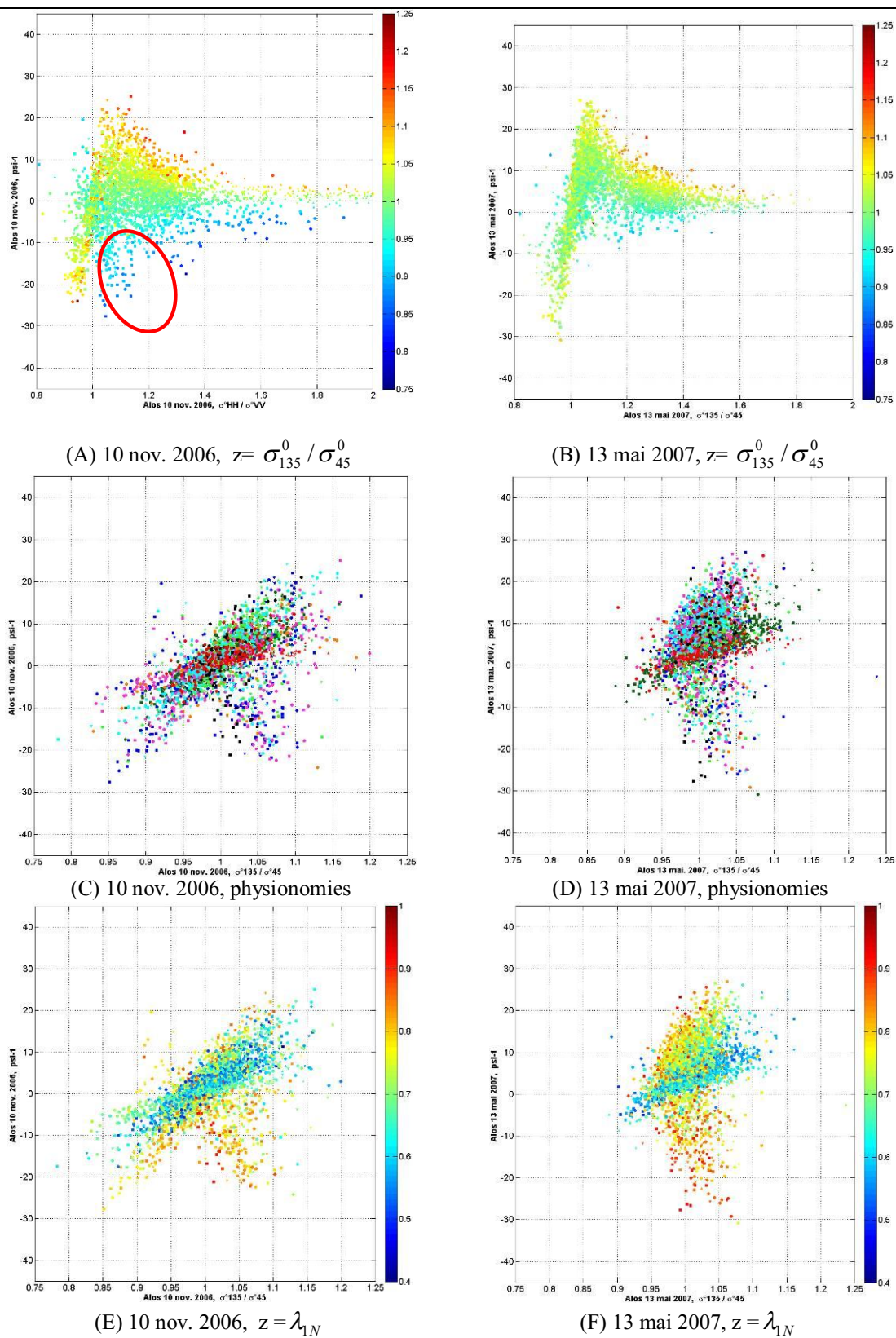


Figure 10.7-6 : Relation entre l'angle d'orientation (ψ_1) et le ratio $\sigma_{135}^0 / \sigma_{45}^0$ en fonction de α_{s1} , λ_1 et des physionomies végétales, 10 novembre 2006 et 13 mai 2007

10.8. La radiométrie

Il a été mentionné que l'information contenue dans la puissance du signal rétrodiffusé (σ_{vv}^0 σ_{hh}^0 σ_{hv}^0) est complémentaire à celle contenue dans les paramètres polarimétriques. Cependant, une large part de l'information contenue dans les canaux de polarisation est également contenue dans les paramètres α_{s1} et α_{sg} . L'utilisation conjointe de ces canaux de polarisation avec α_{s1} et α_{sg} apporte donc une information redondante. Le *span* apparaît être le meilleur choix pour récupérer l'information radiométrique. La Figure 10.8-1 illustre l'avantage d'utiliser à la fois l'information radiométrique et polarimétrique (représentée ici par α_{s1} et α_g) où chaque axe permet de séparer des groupes de physiologies confondues sur l'autre axe. Le chapitre 11 montrera d'ailleurs que la séparabilité des classes est toujours améliorée lorsque l'on utilise le *span* conjointement aux paramètres polarimétriques.

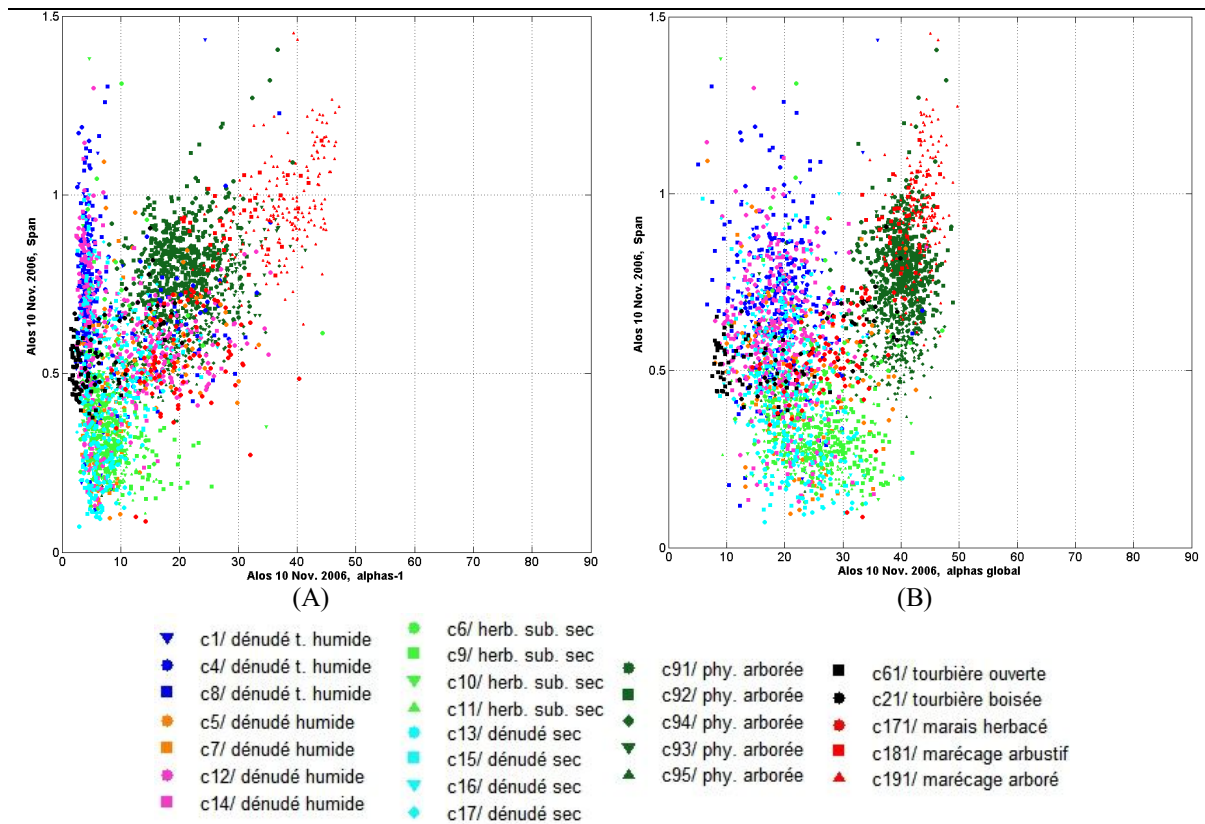


Figure 10.8-1 : 10 novembre 2006, relation entre α_{s1} et le *span*, (A), α_{sg} et le *span* (B)

Le canal σ_{hv}^0 , qui est souvent utilisé pour une estimation rapide de la biomasse aérienne et apprécié pour les classifications de l'occupation du sol, apporte une information qui peut être facilement récupérée par les paramètres polarimétriques, notamment par λ_3 (Figure 10.8-2-B).

De plus λ_3 est moins affecté que σ_{hv}^0 par l'effet d'un bris de symétrie (dépolariation déterministe), effet compensé lors de la décomposition (Figure 10.8-2 C et D). Les différents objets qui s'éloignent de part et d'autre de la relation entre λ_3 et σ_{hv}^0 (indiquées par des flèches) correspondent à une situation pour laquelle les paramètres τ_1 ou ψ_1 ou A sont significatifs (Figure 10.8-2, C, D et E). L'avantage d'utiliser λ_1 et λ_2 pour les classifications par rapport à λ_{1N} et λ_{2N} sera également démontré au prochain chapitre.

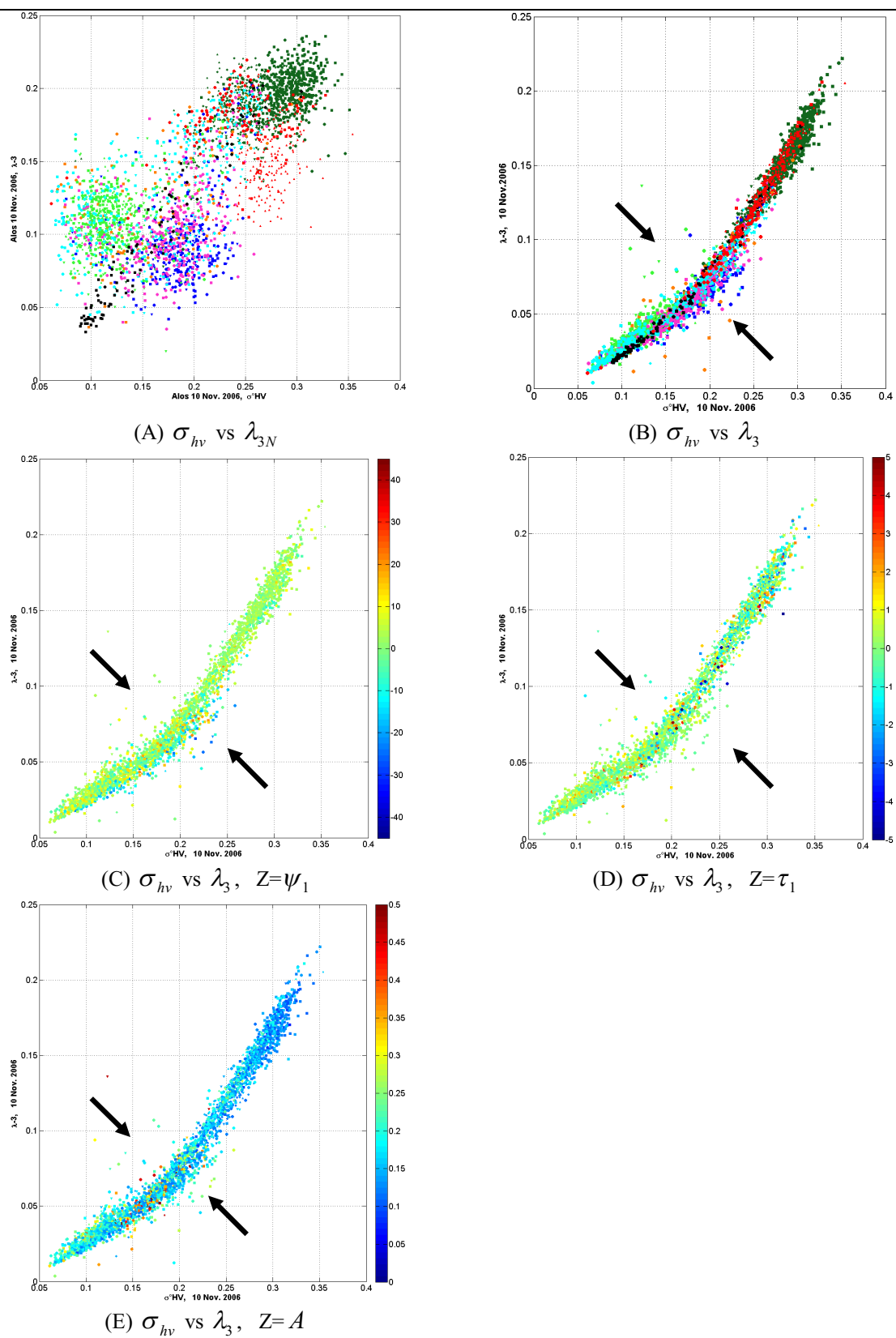


Figure 10.8-2 : Relation entre la troisième valeur propre (λ_{3N} et λ_3) et σ_{hv}^0

10.9. Résumé

Plusieurs notions ont été acquises au cours de ce chapitre et les notions suivantes seront particulièrement utiles pour les prochains chapitres. **(Section 10.1)** Une combinaison des canaux de polarisation HH et VV ou HH et HV n'est pas suffisante pour caractériser et discriminer la majorité des classes physiologiques (Figure 10.1-1). ■ Les canaux HH et VV ne permettent pas de discriminer plusieurs classes dénudées humides ([D], c5, c7, c12 et c14) des physiologies dénudées sèches. Il est également impossible de discriminer les classes physiologies de tourbières ([A2], [h1] et [A2]) des autres classes physiologiques. Les hauts marais à Phalaris ([H2], c171) sont également confondus avec les physiologies dénudées sèches et une partie des physiologies arborées sur substrat sec ([A1], [A2]). ■ Les canaux HH et HV permettent de distinguer les tourbières ouvertes ([A3]) des autres physiologies, mais les hauts marais à Phalaris sont encore confondus avec les physiologies dénudées sur substrats secs ([D]) et une partie des physiologies arborées ([A1], [A2]). ■ Les canaux HH, HV et VV utilisés simultanément sous forme de ratios (Figure 10.1-1) permettent d'améliorer la séparabilité entre les classes physiologiques en général tout en permettant d'identifier un sous-ensemble d'objets des physiologies dénudées ([D]), appartenant en majorité aux classes c5, c8 et c12) présentant un "comportement polarimétrique distinct". On constate cependant que la rugosité des sols peut avoir autant d'effets sur les canaux de polarisation (notamment HV) que la structure de certaines physiologies ce qui est une limitation majeure. ■ La nécessité d'utiliser trois canaux de polarisation constitue un argument en faveur de la polarimétrie en quadrature par rapport à la polarimétrie duale.

(Section 10.2) Une forte relation linéaire est observée entre α_{s1} et $|\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0|$ pour la majorité des physiologies. Utilisé seul, α_{s1} ne permet pas une description satisfaisante du type de rétrodiffusion des physiologies végétales (tout comme α_{sg} et $\bar{\alpha}_C$). L'utilité de α_{s1} pour la caractérisation du type de rétrodiffusion a cependant été souligné par deux sous-ensemble d'objets qui se démarquent de la relation linéaire soit un sous ensemble de physiologies dénudées ([D], c5, c8 et c12) et les hauts marais à Phalaris ([H2], c171). Ces classes se caractérisent respectivement par une structure liée à l'orientation des sillons et à une phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ négative distincte de celles des autres physiologies. Les autres paramètres de la

décomposition de Touzi sont nécessaires pour une meilleure compréhension du type de rétrodiffusion. **(Section 10.3)** ■ L'indépendance de $\Phi_{\alpha_{s1}}$ face à une base de polarisation permet une extraction optimale de l'information polarimétrique, observée empiriquement par un meilleur contraste (meilleure gamme dynamique) comparativement à $\phi_{hh} - \phi_{vv}$, en particulier pour les marais herbacés ([H2], c171) et les marécages arborés ([A1], [A2]). La différence entre $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ s'observe surtout pour les classes où σ_{hv}^0 est élevé. $\Phi_{\alpha_{s1}}$ recoupe d'ailleurs en partie l'information contenue dans HV (Figure 10.3-3). ■ Il est essentiel d'utiliser conjointement α_{s1} et $\Phi_{\alpha_{s1}}$ pour une caractérisation plus complète du type de rétrodiffusion (Figure 10.3-3). La phase ne doit pas être ignorée dans l'analyse des physiologies végétales.

(Section 10.4) ■ Les valeurs propres normalisées sont beaucoup plus utiles pour la compréhension de la rétrodiffusion des physiologies végétales que pour leur classification. Cela est observé par le peu de dispersion entre les classes dans les espaces formés des paramètres λ_{1N} et λ_{2N} , λ_{2N} et λ_{3N} ou encore λ_{1N} vs λ_{3N} (Figure 10.4-1). ■ Cependant, les espaces précédents sont très utiles pour identifier les objets caractérisés par un second mécanisme significatif de rétrodiffusion. L'Anisotropie n'apparaît pas être un paramètre fiable pour l'identification des objets caractérisés par un second mécanisme significatif de rétrodiffusion. De fortes anisotropies ont été observées pour les objets caractérisés par un mécanisme de rétrodiffusion très dominant ($\lambda_{1N} > 0.85$), une faible valeur de λ_{2N} peut alors résulter en une forte Anisotropie si $\lambda_{3N} \approx 0$. **(Section 10.5)** ■ Quelques relations typiques ont été observées entre α_{s1} et α_{s2} en fonction surtout de la valeur de λ_{1N} . Cette relation peut-être aléatoire (lorsque $\alpha_{s1} < 7^\circ$ et $\lambda_{1N} \approx > 0.75$) ou couplée signifiant que $\alpha_{s2} \approx 90^\circ - \alpha_{s1}$. ■ Pour les valeurs de λ_{1N} moyennes ($\lambda_{1N} \approx 0.6$ à 0.7), certains objets apparaissent être découplés pour la région des rétrodiffusions de surface anisotropiques notées par $\alpha_{s1} \approx 10^\circ$ à 40° et se caractérisent souvent par une hélicité (τ_1) significative. En dehors de ces relations mathématiques existant entre α_{s1} et α_{s2} , il n'a pas été possible de donner une interprétation physique à la valeur observée de α_{s2} . Il est donc prudent de considérer individuellement ces deux paramètres (ainsi que α_{s3}) plutôt que leur somme pondérée représenté par α_{sg} et $\bar{\alpha}_C$.

Cela sera observé par "l'aplatissement" des signatures saisonnières de plusieurs classes physiologiques pour α_{sg} et $\bar{\alpha}_C$ et réduisant l'écart pour ces dernières comparativement à α_{s1} (Partie V).

(Section 10.6) ■ Au même titre que λ_{iN} et ψ_1 , la première hélicité τ_1 permet une meilleure compréhension (caractérisation) de la rétrodiffusion de certains objets, mais pas la discrimination entre les grands ensembles de classes physiologiques à l'instar des canaux de polarisations ou encore de α_s et Φ_{α_s} . ■ Dans un contexte de cible distribuée, de faibles valeurs pour τ_1 ($\approx |\tau_1| > 2.5^\circ$) suffisent à indiquer un bris de symétrie azimutale. → Aucune corrélation forte n'a été observée entre τ_1 et σ_{hv}^0 au sens où un bris de symétrie azimutale entraînerait une forte dépolarisation du signal noté par une augmentation de σ_{hv}^0 . → τ_1 s'est montrée sensible à la structure de certaines physiologies dénudées causées par la présence de sillons, et le signe τ_1 est lié à l'orientation de ces sillons par rapport au LOS tout comme le rapport $\sigma_{rr}^0 / \sigma_{ll}^0$. De plus, τ_1 est lié aux "objets découplés" de l'espace $\alpha_{s1} - \alpha_{s2}$. ■ Aucun avantage liés à l'utilisation de τ_2 n'a été trouvé pour la caractérisation des physiologies végétales), pas plus que sa valeur absolue ou son écart type (résultats non présentés) contrairement à ce qui a été observé dans Touzi et al. (2009). **(Section 10.7)** ■ Pour les rétrodiffusion de surface dominantes ($\alpha_{s1} < 10^\circ$ et $\lambda_{iN} \approx > 0.75$), il est possible de retrouver avec le signe de ψ_1 une information similaire à $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$: ψ_1 est négatif lorsque $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 < 1$ et ψ_1 est positif lorsque $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 > 1$. Il est donc possible en combinant α_{s1} et ψ_1 de retrouver l'information contenue dans le ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$, important pour la caractérisation des physiologies dénudées. ■ Aucun lien entre ψ_1 et la pente locale a été trouvée pour l'ensemble des classes physiologiques dénudées pas plus que ψ_2 s'est révélée intéressante pour la caractérisation des classes physiologiques en général. **(Section 10.8)** ■ Il est essentiel d'utiliser le *span* pour récupérer l'information radiométrique qui a été normalisée lors de l'estimation des paramètres polarimétriques. Le *span* est préféré aux canaux de polarisation HH et VV afin d'éviter une redondance de l'information. ■ Les valeurs propres non normalisées (λ_1 , λ_2 et λ_3) sont également utiles pour caractériser l'information radiométrique du signal, λ_3 permet par exemple de récupérer l'information contenue dans σ_{hv}^0 .

CHAPITRE 11

11. POTENTIEL DES PARAMÈTRES DE LA DÉCOMPOSITION DE TOUZI POUR L'IDENTIFICATION DES CLASSES PHYSIONOMIQUES

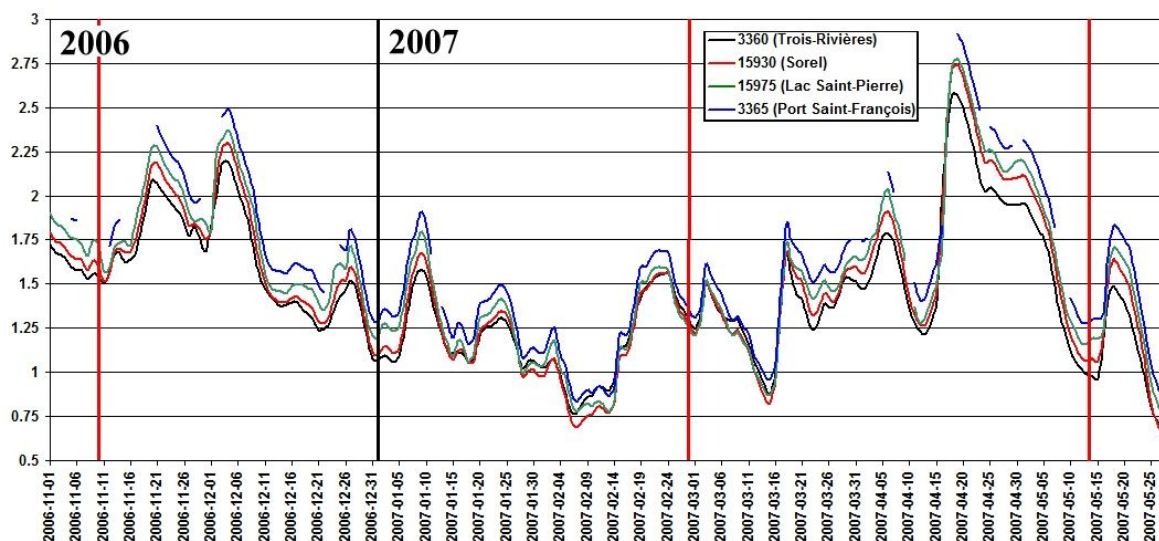
Basés sur les observations et analyses présentées dans le chapitre précédent, trois applications concernant la caractérisation des milieux humides seront présentées soit : 1) la cartographie des marécages arborés et arbustifs (section 11.1) ; 2) la caractérisation des marais herbacées (section 11.2) et 3) la caractérisation des tourbières (section 11.3). Ce chapitre se conclura par une analyse de la séparabilité des classes (section 11.4) dans laquelle la performance des paramètres de décomposition de Touzi sera évaluée pour la discrimination des classes physionomiques.

11.1. Détection des marécages arborés et arbustifs ([A1], [A2])

Au début du printemps, la détection des marécages est souvent basée sur leur fort signal, particulièrement en polarisation HH, dû à la présence d'une rétrodiffusion double bond créée par la présence d'eau (Hess et *al.*, 1990; Kasischke et *al.*, 1997). Tel qu'observé au chapitre précédent, les marécages de la région du lac Saint-Pierre présentent plutôt une rétrodiffusion de surface dominante (α_{s1}) à tendance dipolaire (α_{sg}). La diminution en mai du type dominant ou global de rétrodiffusion (Tableau 11.1-1) par rapport à novembre s'accompagne d'une diminution du niveau de l'eau (Figure 11.1-1) entre ces deux dates ainsi que d'un assèchement généralisé des sols suite aux conditions météorologiques sèches du mois de mai.

	date	α_{s1}	α_{sg}	$\bar{\alpha}_C$
c181	11. Nov 2006	28.74±7.31	42.53±2.62	46.52±1.51
	13 mai 2007	21.55±8.37	38.86±2.99	43.16±3.32
c191	11. Nov 2006	37.15±6.75	44.98±2.50	48.03±1.41
	13 mai 2007	31.61±5.96	43.27±2.78	45.81±2.05

Tableau 11.1-1 : Différence des paramètres α_{s1} , α_{sg} et α_C pour les classes physionomiques de marécages arbustifs (c181) et arborés (c191)



Note 1 : Barres verticales noires : séparation des années période. Note 2 : Barres verticales rouges : acquisitions ALOS. Note 3 : Le "niveau 0" correspond au zéro hydrographique, c.-à-d. à la position de la basse mer inférieure de grande marée

Figure 11.1-1 : Variations du niveau d'eau dans la région du Lac St-Pierre entre novembre 2006 et fin mai 2007

Source (données brutes): Archives canadiennes des données sur les marées et niveaux d'eau, Pêches et Océans Canada. Données téléchargées le 31 mars 2011.

L'utilisation de la technique du seuillage, accompagnée d'une analyse des erreurs de commission et d'omission, est ici utilisée pour évaluer si les paramètres de décomposition de Touzi permettent la détection des marécages à la fin de la période végétative (novembre 2006) ou à ses débuts (mai 2007). Une erreur de commission inférieure à 20% pour une erreur d'omission de 15% est utilisée comme indicateur de la performance des différents paramètres. À titre de comparaison, la performance des divers canaux de polarisations sera également analysée. C'est la relation entre ces deux types d'erreur plus que la valeur du paramètre seuil qui sera ici étudiée. Le Tableau 11.1-2 résume la performance d'une sélection de paramètres pour les deux acquisitions ALOS alors que la Figure 11.1-2 présente l'évolution des erreurs de commission et d'omission en fonction du seuil utilisé pour la détection des marécages arborés et arbustifs. Un examen du Tableau 11.1-2 met en évidence qu'aucun paramètre ou canaux de polarisation ne permet d'atteindre le maximum acceptable d'erreur de commission (20%) pour une erreur d'omission fixée à 15%. De plus l'erreur de commission ne semble pas être tributaire du niveau d'eau pour certains paramètres ou polarisations.

	α_{s1}	α_{sg}	$\bar{\alpha}_C$	σ_{hh}^0	σ_{vv}^0	$\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$	σ_{hv}^0	λ_3	λ_1
10 Nov. 2006 $\bar{x}=1.81m$	41.7	40.05	43.26	67.29 62.43*	74.6 61.34*	74.32 48.51*	56.73 43.2*	40.02	72.29
13 mai 2007 $\bar{x}=1.12m$	44.19	45.58	51.19	35.37 21.55*	40.03 30.04*	74.06 46.86*	34.23 31.81*	32.41	30.09

Note 1 : * Analyse avec image filtrée au préalable par un filtre moyenneur (7x7); Note 2 : \bar{x} = niveau d'eau au moment de l'acquisition (Figure 11.1-1).

Tableau 11.1-2 : Détection des zones de marécages arborés par seuillage, erreurs de commission pour une erreur d'omission fixée à 15%

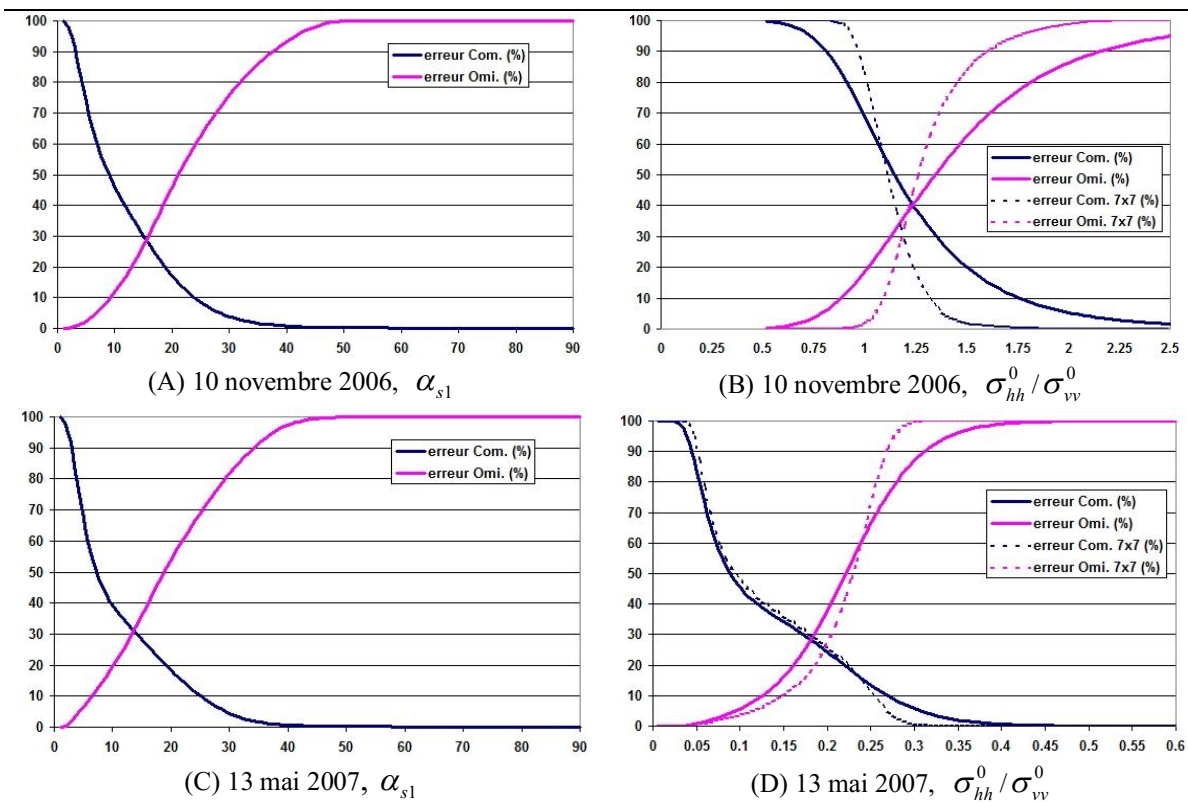
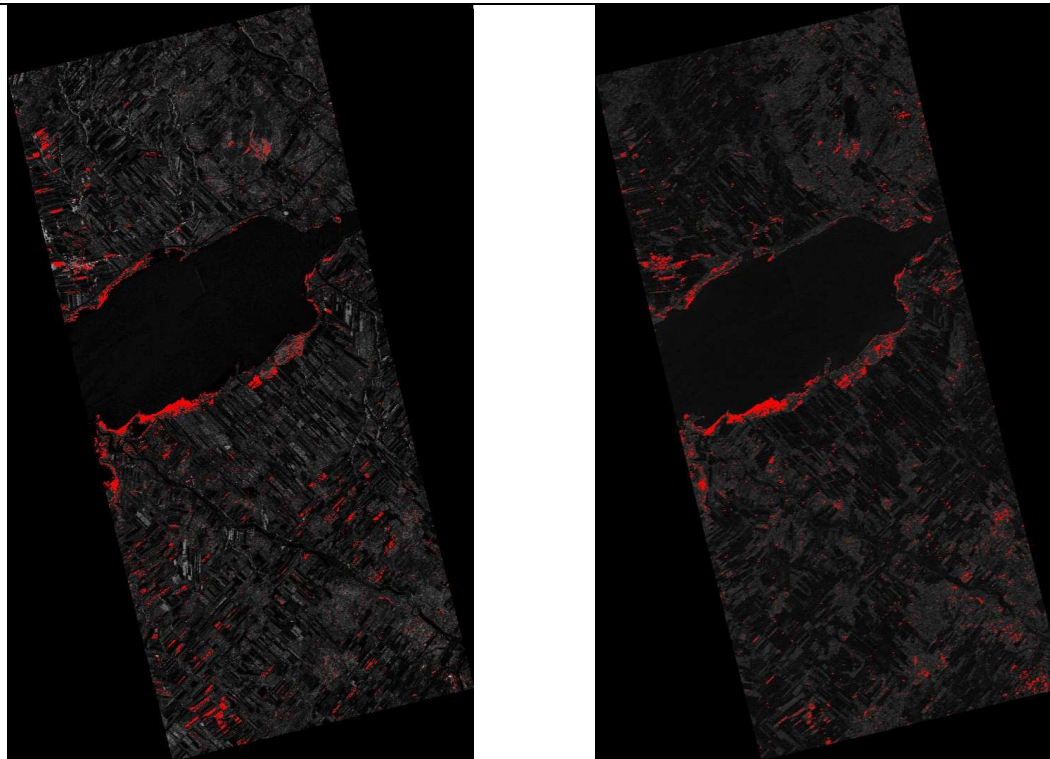
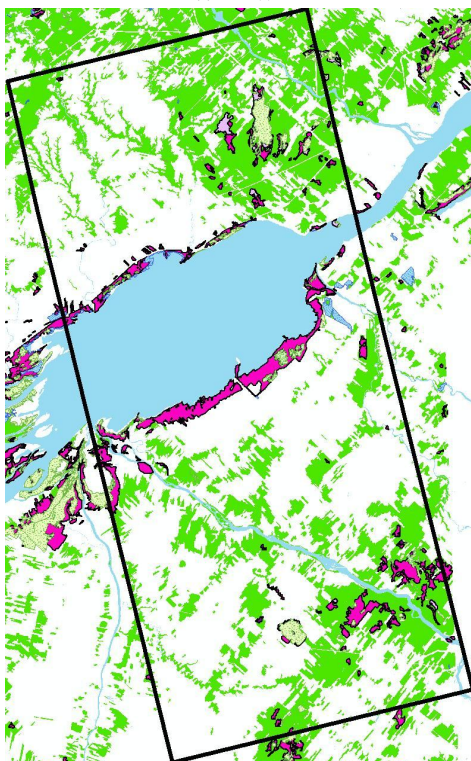


Figure 11.1-2 : Détection des marécages par seuillage du paramètre α_{s1} et du ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$, erreurs d'omissions et de commissions

En novembre, c'est surtout le type de rétrodiffusion (α_{s1} , α_{sg} et $\bar{\alpha}_C$) qui permet d'obtenir les plus faibles erreurs de commission comparativement aux paramètres liés à la puissance rétrodiffusée. La performance mitigée des canaux de polarisation σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 peut s'expliquer par la présence des champs agricoles classés dans les physionomies dénudées humides (ou avec peu de végétation). Ces champs produisent une forte rétrodiffusion accompagnée d'une pureté de rétrodiffusion (λ_{1N}) qui est comparable à celle des marécages arbustifs et arborés.

La normalisation de la puissance rétrodiffusée permet aux paramètres α_{s1} , α_{sg} et $\bar{\alpha}_C$ de mieux performer en rehaussant la composante dipolaire présente dans le signal provenant des marécages. La présence d'une rétrodiffusion pure expliquerait aussi la contre-performance du paramètre λ_1 . Dans ce cas, la pureté de la rétrodiffusion compense une plus faible puissance rétrodiffusée comparativement aux physionomies arborées pour lequel le *span* peut être plus élevé mais dont λ_1 est plus faible lorsque le niveau d'eau est bas. Par analogie, le ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ permet aussi d'obtenir une performance similaire à condition que ce ratio soit traité avec un filtre (ici moyennneur) dont la taille est approximativement équivalente à celle de la fenêtre de décomposition (Figure 11.1-2-B). Les fortes rugosités de surface observées en novembre pour certains champs dénudés (c16 et c17) peuvent aussi causer une forte rétrodiffusion volumique ou multiple. Pour ces physionomies, la valeur σ_{hv}^0 avoisine alors les valeurs observées pour une partie des objets composant les classes de physionomies arborés des milieux secs (c91 à c95) et des marécages (c181, c191). Cette contribution de la composante volumique/multiple présente dans le signal des champs agricoles est à la base des plus fortes erreurs de commission observées en novembre et contribuent à augmenter l'erreur de commission pour σ_{hv}^0 et λ_3 . La Figure 11.1-3 illustre bien la commission de plusieurs champs agricoles à la physionomie des marécages arborés ou arbustifs.

(A) $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 > 1.58$ (B) $\alpha_{s1} > 36^\circ$ 

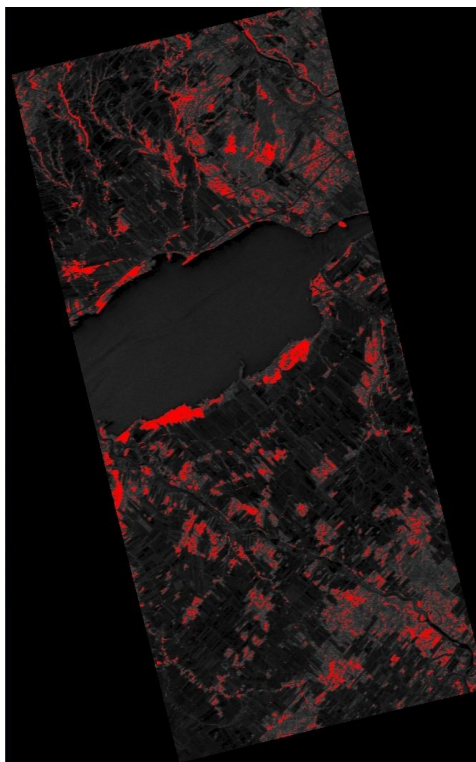
-  Tourbière ouverte
-  Aulnaies
-  Tourbière boisée
-  Marécage pauvre
-  Marécage riche
-  Zone inondable
-  Eau
-  Forêt sur substrat sec

(C) Milieux humides de la région du lac Saint-Pierre

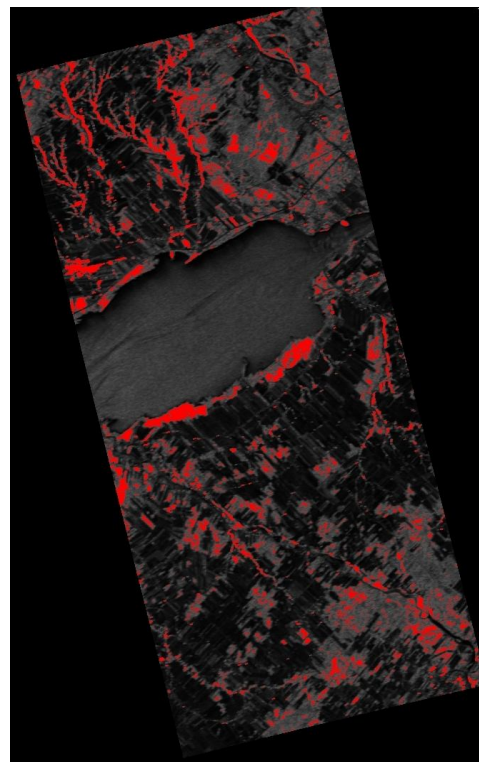
Figure 11.1-3 : Extraction par seuillage des secteurs des marécages arborescents et arbustifs, 10 novembre 2006

En mai, tous les paramètres et presque toutes les polarisations atteignent une erreur de commission comparable qui se situe entre 30% et 50%. Le rapport $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ est l'exception avec une erreur de plus de 70% mais une nette amélioration de sa performance est obtenue après filtrage (Tableau 11.1-2). Les conditions sèches et la disparition des résidus de cultures ont fait en sorte que les confusions avec les champs agricoles ont presque disparu. L'erreur de commission s'est cependant déplacée vers les peuplements forestiers des milieux secs (Figure 11.1-4) car en l'absence d'eau ou de sols saturés il est nécessaire de seuiller plus bas α_{s1} , α_{sg} et $\bar{\alpha}_c$ pour obtenir une détection satisfaisante des marécages. Lorsque le niveau d'eau est bas, il faut donc se baser sur les canaux de polarisation σ_{hh}^0 ou σ_{vv}^0 pour assurer la détection des marécages plutôt que sur une détection du mécanisme de rétrodiffusion (dipolaire ou double-bond). Si l'on combine la pureté de la polarisation (λ_1) à la puissance totale rétrodiffusée par les cibles (*span*) sous l'hypothèse qu'un marécage aura, en général, un signal plus pur qu'une forêt sur substrat sec (ne serait-ce qu'à cause d'un sous-étage plus clairsemée et d'un substrat plus humide) l'erreur de commission ne diminue pas. Bien que d'un côté on obtienne effectivement une meilleure séparabilité entre marécages et forêts sur substrat sec, l'inclusion des petites vallées dont un des versants est perpendiculaire au LOS vient au final maintenir l'erreur de commission stable (environ 30%). L'amélioration des résultats obtenus avec le canal σ_{hv}^0 et λ_3 est due simplement à la diminution de la rugosité de surface des champs agricoles en mai et l'erreur de commission observée avec les autres physiologies forestières reste forte.

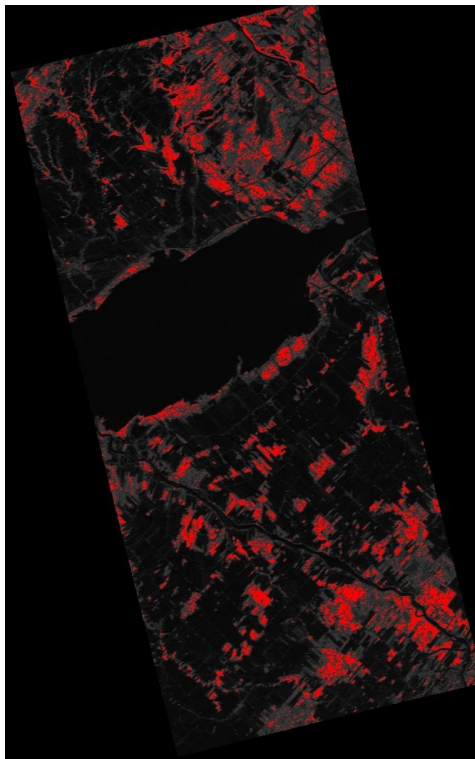
Ces analyses simples montrent qu'il est nécessaire d'avoir recours à plusieurs paramètres pour l'identification précise des marécages lorsque les conditions d'acquisition ne sont pas optimales. Il est donc important d'avoir simultanément une information sur la structure (HH et VV), la pureté de la polarisation et sur la composante volumique ou multiple (HV) pour assurer une bonne détection des marécages ce qui n'est possible qu'en mode polarimétrique. Ce n'est qu'avec ces informations qu'une approche plus sophistiquée que le simple seuillage pourra offrir des résultats acceptables. L'analyse de la séparabilité des classes (section 11.4) ainsi que la partie dédiée à RADARSAT-2 fourniront d'autres exemples concrets de l'avantage à exploiter l'information contenue dans les données polarimétriques.



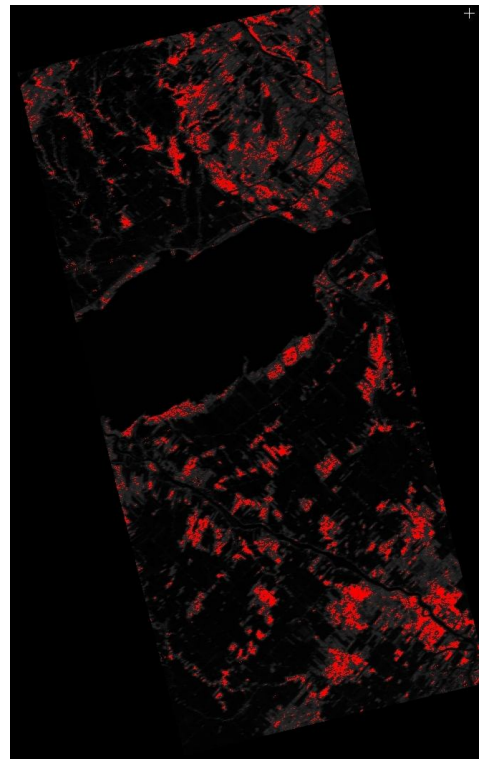
(A) $\sigma_{hh}^0 > 0.63$ (-4.0 dB)



(B) $\lambda_1 > 0.5$ (-6.0dB)



(C) $\sigma_{hv}^0 > 0.26$ (>-11.7dB)



(D) $\lambda_3 > 0.26$ (>-11.7dB)

Figure 11.1-4 : Extraction par seuillage des secteurs de marécages arborescents et arbustifs, 13 mai 2007

11.2. Les marais herbacés (c171)

Tel que mentionné, la classe de marais herbacés (c171) est la seule classe physionomique des hauts et bas marais qu'il a été possible d'étudier compte tenu des dates d'acquisitions ALOS. La classe c171 correspond plus spécifiquement aux hauts marais à *Phalaris arundinacea* ([H2-88]) selon la classification du Centre Saint-Laurent (Létourneau et Jean, 2006). L'identification du *Phalaris arundinacea* (l'Alpiste roseau) revêt d'une importance particulière, car il s'agit, au même titre que le *Phragmites australis* (Phragmite commun), d'une plante envahissante agressive et robuste qui tend à former de larges communautés mono-spécifiques en éliminant les autres espèces (Hudon et al., 2005; Lavoie et al., 2005; Dae Kim et al., 2006). La progression du Phalaris dans un marais est souvent perçue comme un signe de dégradation de ce dernier (Hatch, 2008).

La Figure 11.2-1 montre un secteur de la rive sud du Lac Saint-Pierre occupé par des hauts-marais dominés par le Phalaris. Comme on peut le constater à la Figure 11.2-1-A, le substrat est majoritairement composé de loams argileux (environ 20% d'argile, 50% de sable, 30% de limon) dont le drainage est imparfait à mauvais (IRDA, 2008). La présence d'argile dans ce type de substrat contribue à retenir l'eau près de la surface plus longtemps qu'un sol sableux ou organique, dû à sa plus faible conductivité hydraulique. La forte biomasse du Phalaris peut, au printemps, être encore dressée mais dans bien des cas aura été couchée et recouvrira le sol en formant un paillis. Cela donne aux hauts marais à Phalaris une teinte blanchâtre très caractéristique au printemps qui est aussi visible tard à l'automne. Les deux extraits d'images Landsat-5 présentées à la Figure 11.2-1-C et D, acquises au début du printemps et à la fin de l'automne, montrent cette teinte blanchâtre caractéristique des sites de Phalaris.

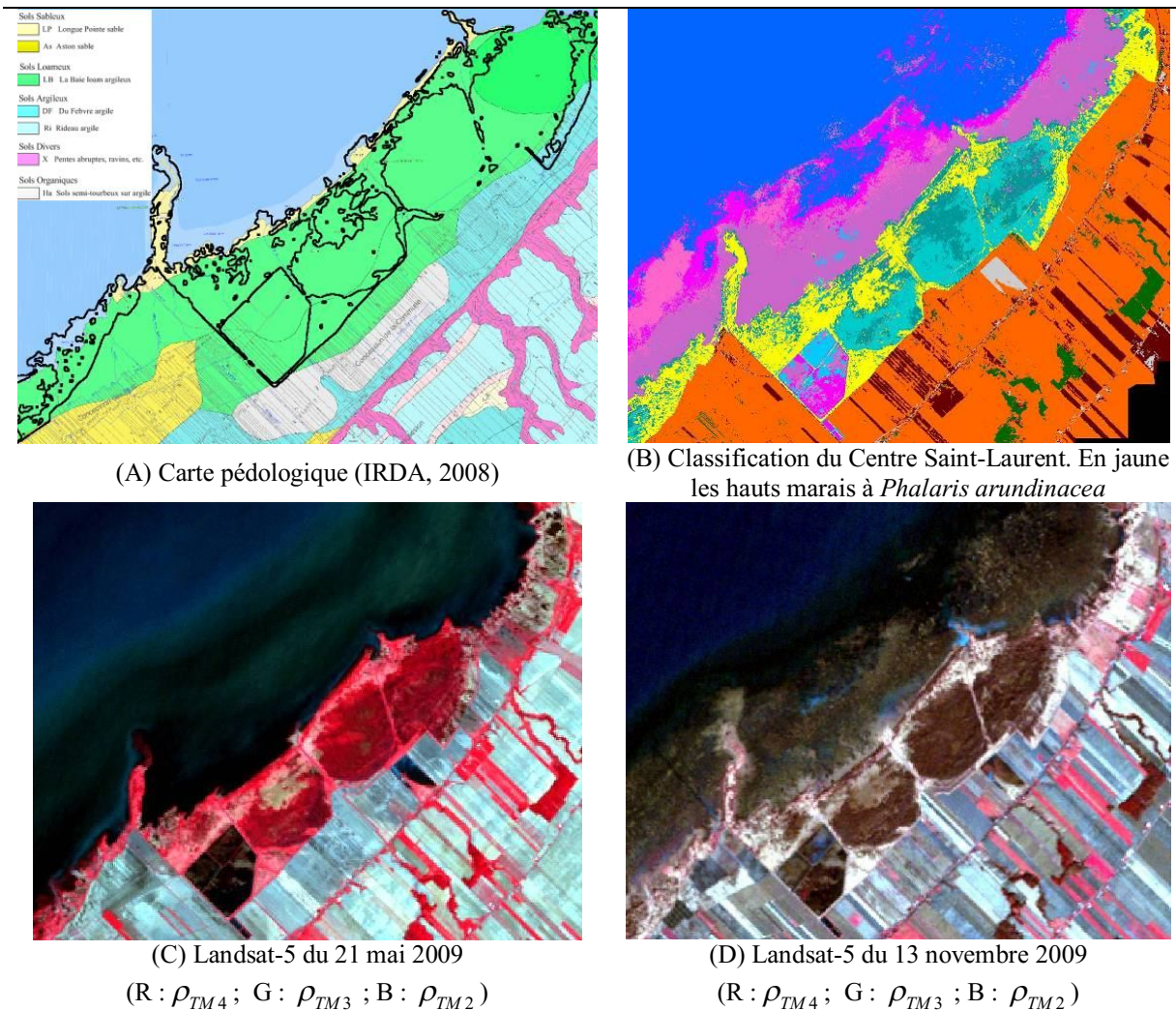


Figure 11.2-1 : Exemple d'un site de hauts marais à *Phalaris arundinacea*

La série d'images Landsat de 2009 (Tableau 8.4-1) nous permet d'établir quelques observations utiles à la compréhension des conditions des sites de Phalaris à travers une saison complète de croissance-sénescence (mai-novembre) ; observations qui nous seront utiles à l'interprétation des résultats des analyses des paramètres polarimétriques. Tel que montré par la Figure 11.2-2, au début du printemps (ici le 19 avril), la signature spectrale moyenne d'un site dense de Phalaris est typique d'un sol dénudé clair et sec tel qu'indiqué par la forte réflectance dans le vert (ρ_{TM2}), le rouge (ρ_{TM3}) ainsi que dans l'infrarouge à ondes courtes (ρ_{TM5}) et sa relativement basse réflectance dans le proche infrarouge (ρ_{TM4}). À la mi-mai, proche de la date d'acquisition ALOS en 2007, la contribution de la végétation commence à se faire sentir avec une signature moyenne constituée d'un mélange de la contribution du substrat et de la végétation. Plus on avance dans la saison, plus la signature spectrale rappelle celle

d'un site de végétation herbacée dense typique. On peut déduire une augmentation de la biomasse (tiges et feuilles) vers la fin de l'été (août et septembre) par la baisse de la réflectance dans le rouge et son augmentation dans le proche infrarouge. Au mois de novembre, proche de la date d'acquisition ALOS en 2006, nous observons une signature moyenne typique d'un site avec une végétation sénescente et où la contribution du substrat commence à se manifester.

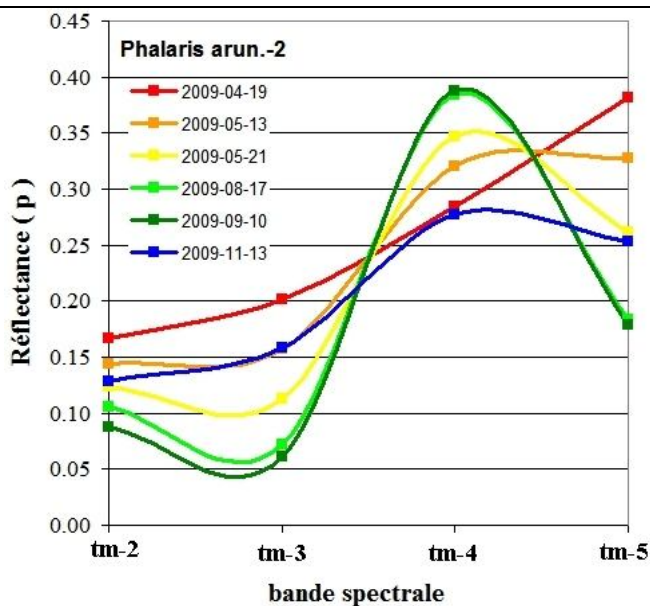


Figure 11.2-2 : Évolution saisonnière de la signature spectrale d'un site dense de *Phalaris arundinacea* ([H2-88]), images Landsat de 2009

La Figure 11.2-3 compare l'évolution saisonnière de la signature spectrale de cinq sites denses de *Phalaris* à quelques sites de physionomies arborés. On constate que contribution du substrat s'observe aussi pour les peuplements de feuillus mais cette influence disparaît au mois de mai contrairement au *Phalaris*. La forte réflectance du *Phalaris* observé dans ρ_{TM4} montre que le substrat contribue à la réflectance totale comme cela fut aussi observé pour les classes c6 et c9, c10 et c11 (Annexe 2). La canopée dense et compacte du *Phalaris* favorise également la diffusion de ρ_{TM4} contrairement à la canopée des physionomies arborées dont les éléments composant la canopée se projettent de l'ombre. La forme des signatures spectrales observée au cours de l'été 2009 est compatible avec ce qui a été publiée pour des physionomies similaires des milieux humides (voir Krankina et al., 2008).

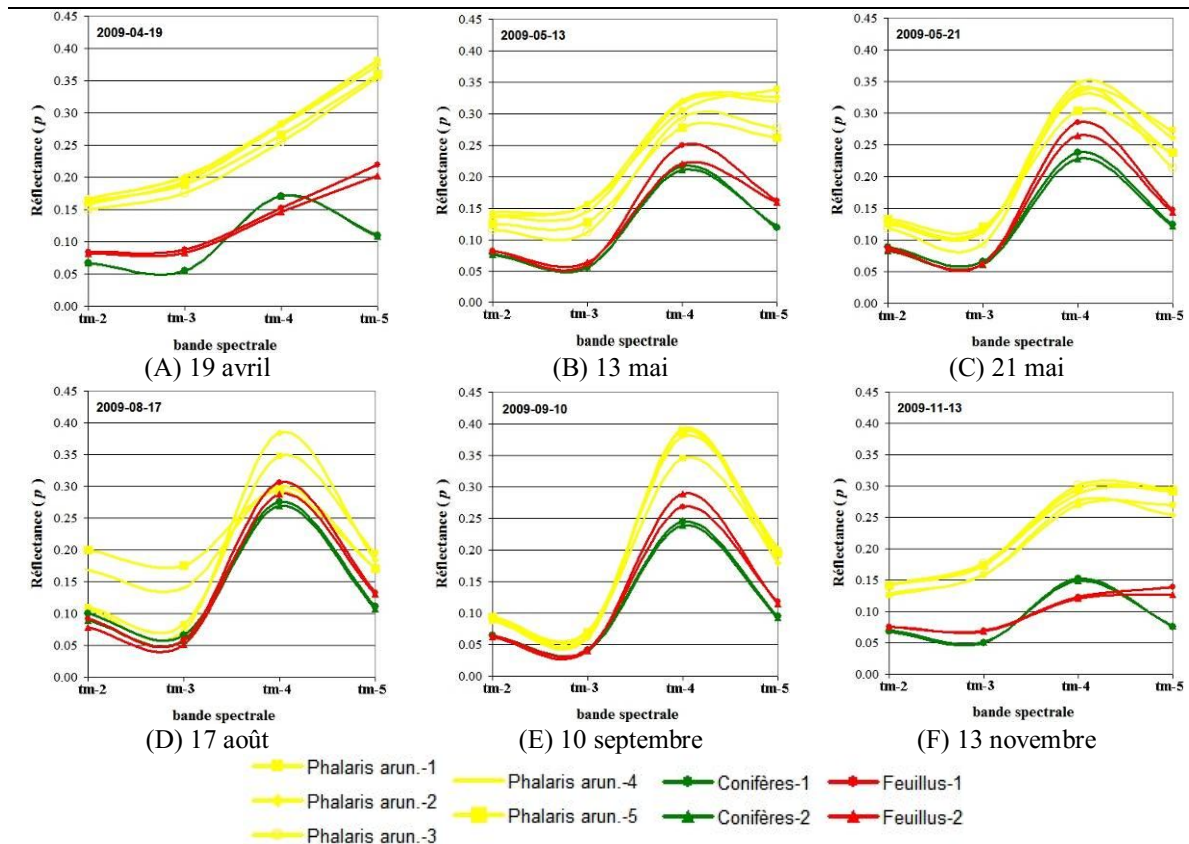


Figure 11.2-3 : Comparaison de l'évolution saisonnière de la signature spectrale du *Phalaris arundinacea* [H2-88] à celle des peuplements de feuillus et de conifères, année 2009

11.2.1. Caractérisation de la rétrodiffusion du Phalaris

Pour illustrer nos propos sur le comportement des paramètres polarimétriques, nous utiliserons le même exemple avec les sites de Phalaris de la Figure 11.2-1.

Les canaux de polarisation

La rétrodiffusion du Phalaris comporte une forte composante volumique en novembre avec un σ_{hv}^0 se situant à la jonction entre les classes physiologiques des champs et celles des physiologies arborées (section 10.4). Les données du mois de mai montrent que, par rapport au mois de novembre, σ_{hv}^0 enregistre une légère baisse (environ 1 dB) tandis que les polarisations σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 enregistrent une certaine augmentation (environ 1dB et 1.5 dB respectivement) (Figure 11.2-4). L'augmentation plus prononcée de σ_{vv}^0 fait que le

ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ passe de 1.13 ± 0.08 en novembre à 1.06 ± 0.07 alors la quantité de biomasse fraîche diminue fortement (démonstré par les signatures spectrales de la Figure 11.2-3). Le coefficient de rétrodiffusion radar diminue normalement avec la diminution de la teneur en eau de la plante (Paloscia, 2002). Mais la classe c171, représentant les sites de Phalaris, est la seule classe (à l'exception des physionomies arborées) qui a présenté une augmentation générale du coefficient de rétrodiffusion des canaux σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 entre novembre et mai. La diminution de l'écart entre σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 indique une influence accrue du substrat.

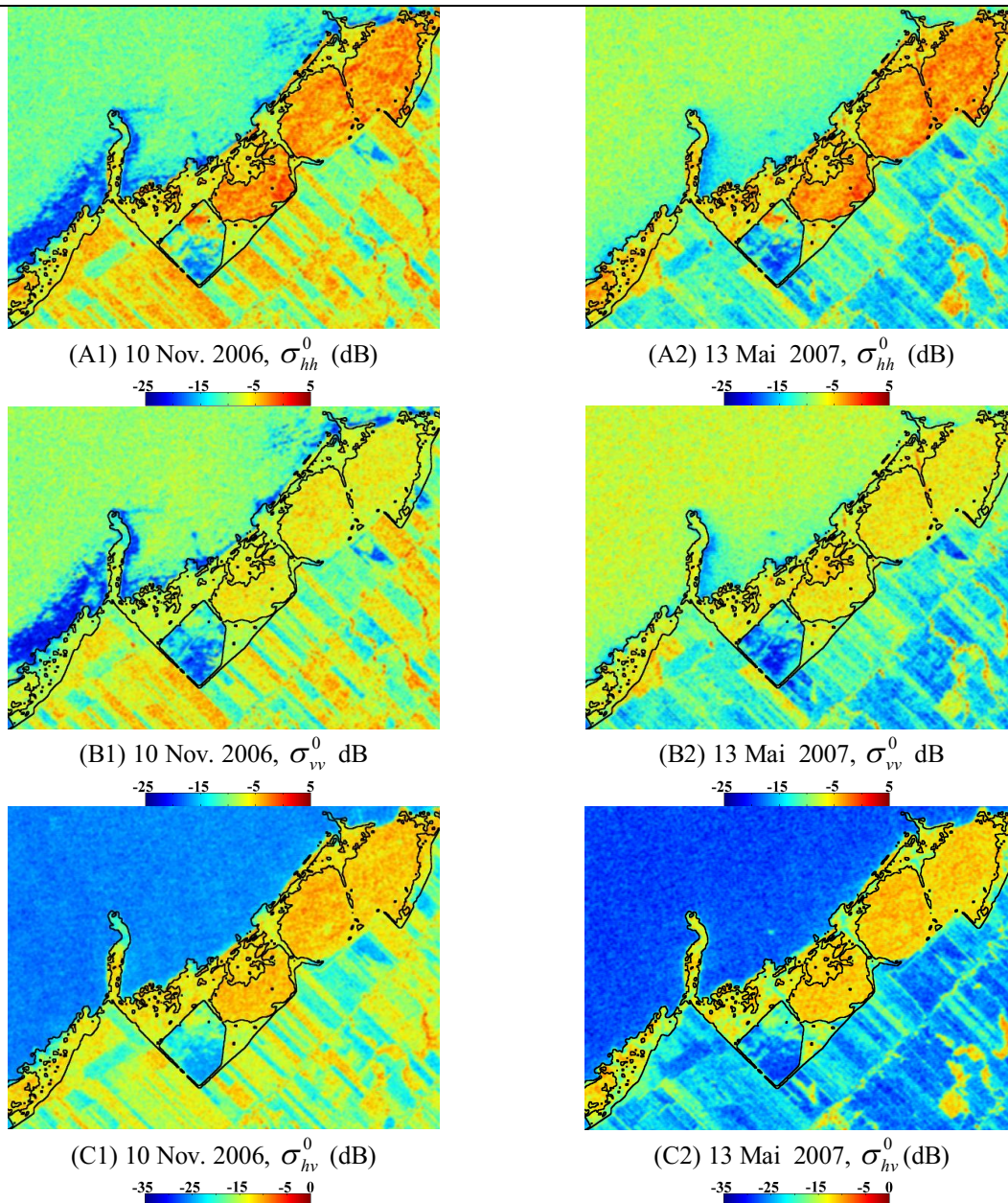


Figure 11.2-4 : Différences entre novembre 2006 et mai 2007 des canaux de polarisation

Paramètres de la décomposition de Touzi

La Figure 11.2-5 montre clairement ce qui a été observé par les analyses du chapitre précédent, à savoir qu'en mai 2007, la rétrodiffusion de surface domine dans les sites de la classe c171([H2]). En effet, on observe une nette diminution de α_{s1} qui passe en moyenne de 20° environ à 10° environ.

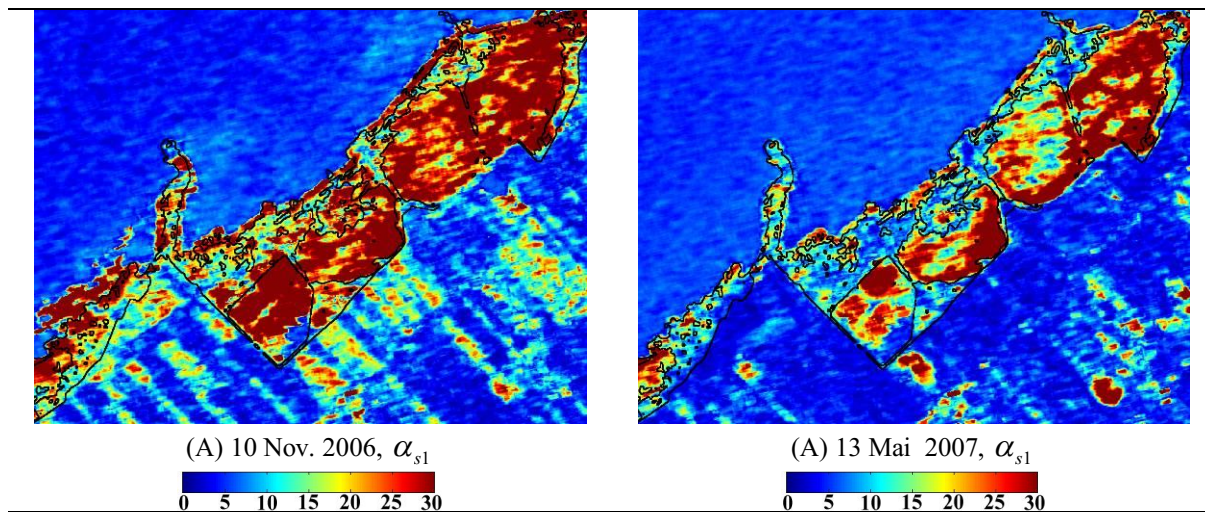
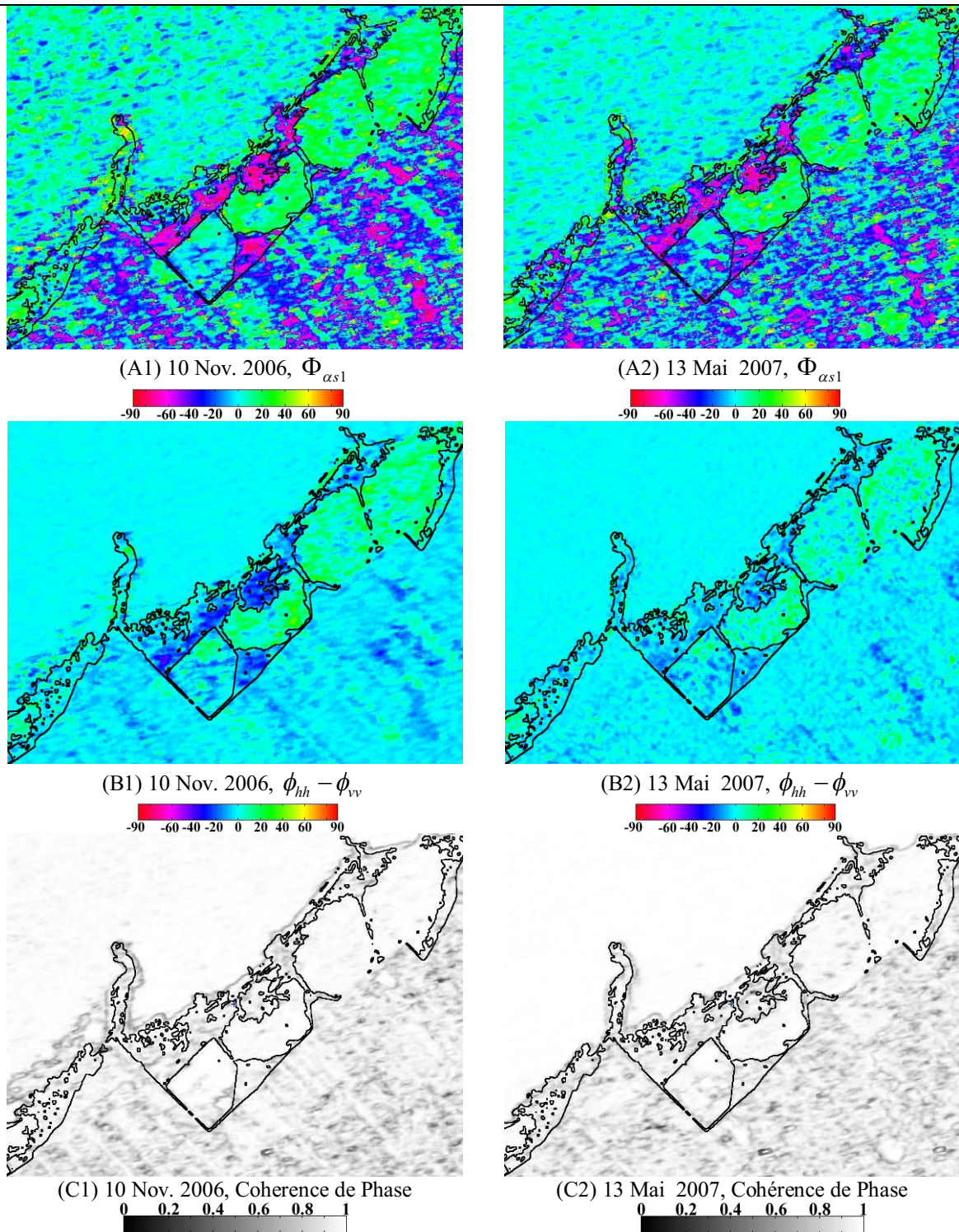


Figure 11.2-5 : Différences entre novembre 2006 et mai 2007, type dominant de rétrodiffusion symétrique

La phase Φ_{as1} , pour sa part, présente un comportement intéressant avec des valeurs qui restent clairement négatives en novembre et en mai. Ceci a été la caractéristique marquante pour la quasi-totalité des 73 objets composant la classe c171 tel que constaté dans le précédent chapitre. Nous le constatons aussi en examinant notre exemple des sites de Phalaris dans la Figure 11.2-6. Sur cette figure, on constate aussi que les marais herbacés sont à l'opposé des marécages arborés (c191), cernés par les marais herbacés (voir aussi Figure 11.2-1). Ces marécages présentent en effet des valeurs Φ_{as1} positives. Dans le cas des marécages, cela s'expliquerait par la présence d'une rétrodiffusion de type simple bond (ou nombre de bond impair) qui viendrait s'ajouter à une composante diédrique (double bond) mais sans être en phase. Dans le cas des marais herbacés, la présence d'un second mécanisme de rétrodiffusion qui viendrait s'ajouter à la rétrodiffusion de surface (surtout en mai) est difficile à déterminer. L'analyse des valeurs propres et de l'Anisotropie (section 10.4) a montré une différence pour λ_{1N} entre novembre et mai passant de 0.54 ± 0.03 à 0.66 ± 0.07 alors que λ_{2N} a diminué passant de 0.26 ± 0.02 à 0.20 ± 0.04 au cours de la même période. L'analyse des

valeurs propres a aussi montré que l'anisotropie de la classe c171 (comme celle des marécages) est faible et la contribution d'un second mécanisme de rétrodiffusion significatif pour ces classes reste faible²⁵.



²⁵ Un exemple contraire sera donné dans la partie V pour les bas marais à Scirpes ([h1]) et à Typha ([H1]) où des valeurs de Φ_{as1} , significativement différentes de zéro, s'expliqueraient par la présence de deux mécanismes de rétrodiffusion qui ne sont pas en phase.

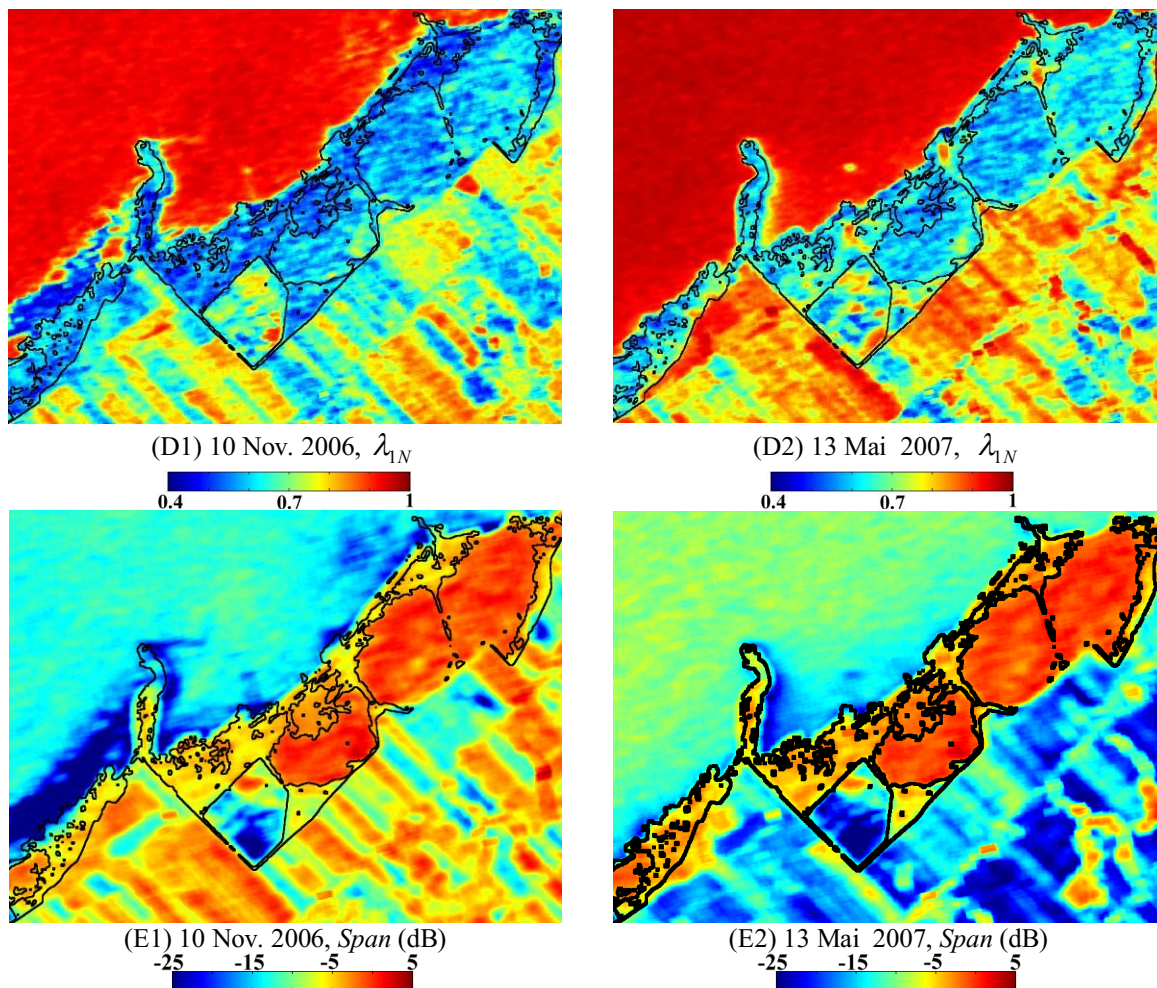


Figure 11.2-6 : Évolution temporelle des canaux de polarisation et des paramètres de la décomposition de Touzi (sélection) pour un secteur de haut-marais herbacé (H2-88, *Phalaris Arundinacea*)

L'évolution temporelle de la phase Φ_{as1} a aussi été comparée à celle de quelques autres paramètres pour tenter de comprendre ce qui a causé les variations de Φ_{as1} ou bien si l'information apporté par ce paramètre est indépendante. Si la valeur moyenne de Φ_{as1} a légèrement augmenté entre les deux acquisitions, passant de -37.42 ± 24.7 à -32.26 ± 11.5 dB (Figure 11.2-7-B), ce n'est que 51 objets sur 73 qui ont vu leur phase augmenter alors que 22 objets ont connus l'évolution inverse.

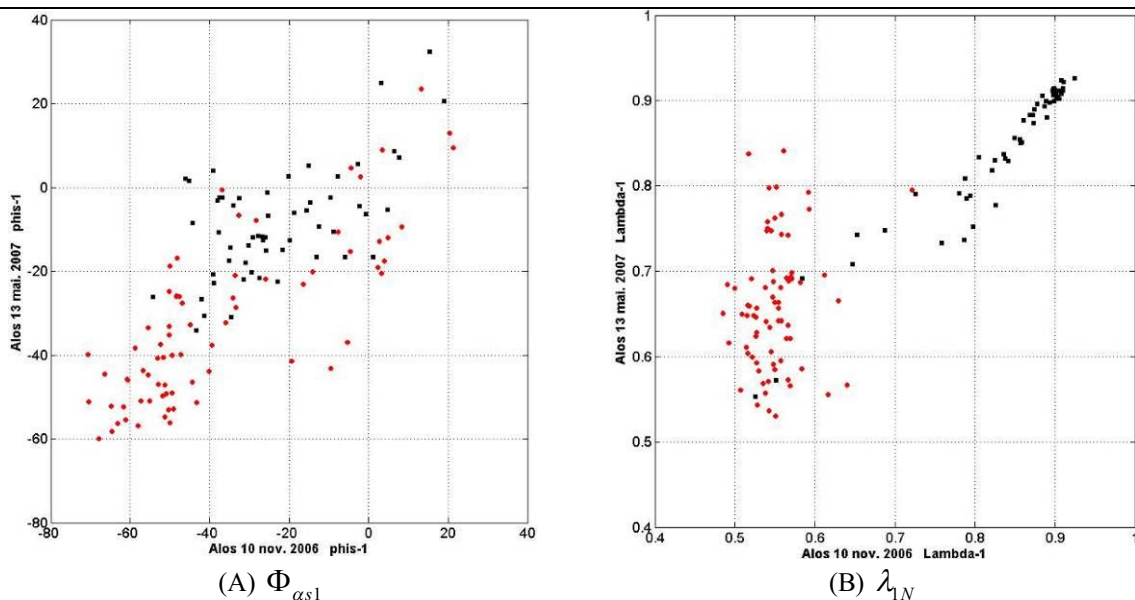
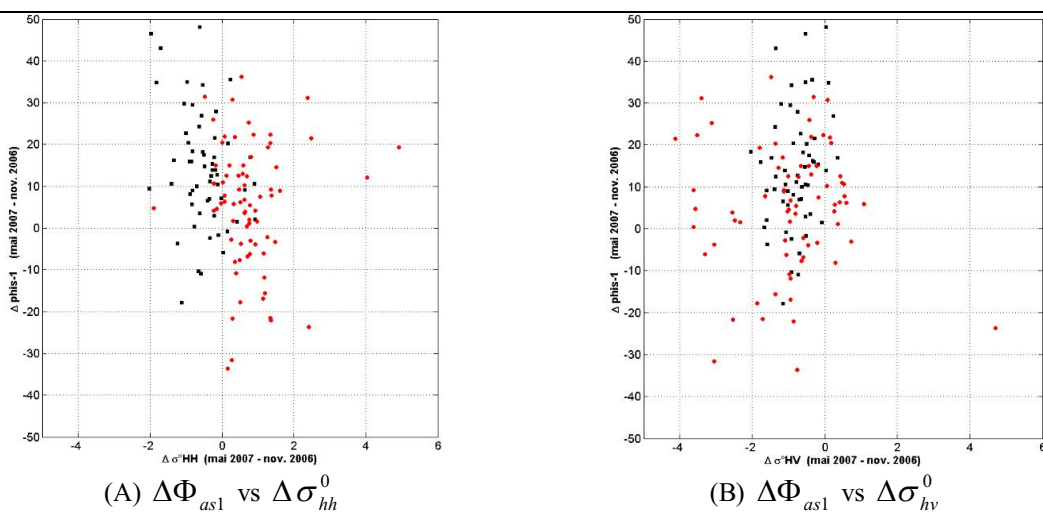


Figure 11.2-7 : Valeurs par objet des des marais herbacés ([H2], c171) et des tourbières ouvertes ([A3] [h1], c61) entre novembre 2006 et mai 2007 pour $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et λ_{1N}

La distribution des objets dans les différents espaces de la Figure 11.2-8 ne montre pas de relations fortes entre l'évolution temporelle de $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et celle d'un autre paramètre ou canaux de polarisation. Cela tend à démontrer que l'information contenue dans la phase est indépendante des autres paramètres. Par exemple, les paramètres α_{s1} et λ_{1N} sont ceux qui connus les plus fortes évolutions (Figure 11.2-8 E et G) mais aucune corrélation n'est notée avec l'évolution temporelle de $\Phi_{\alpha_{s1}}$.



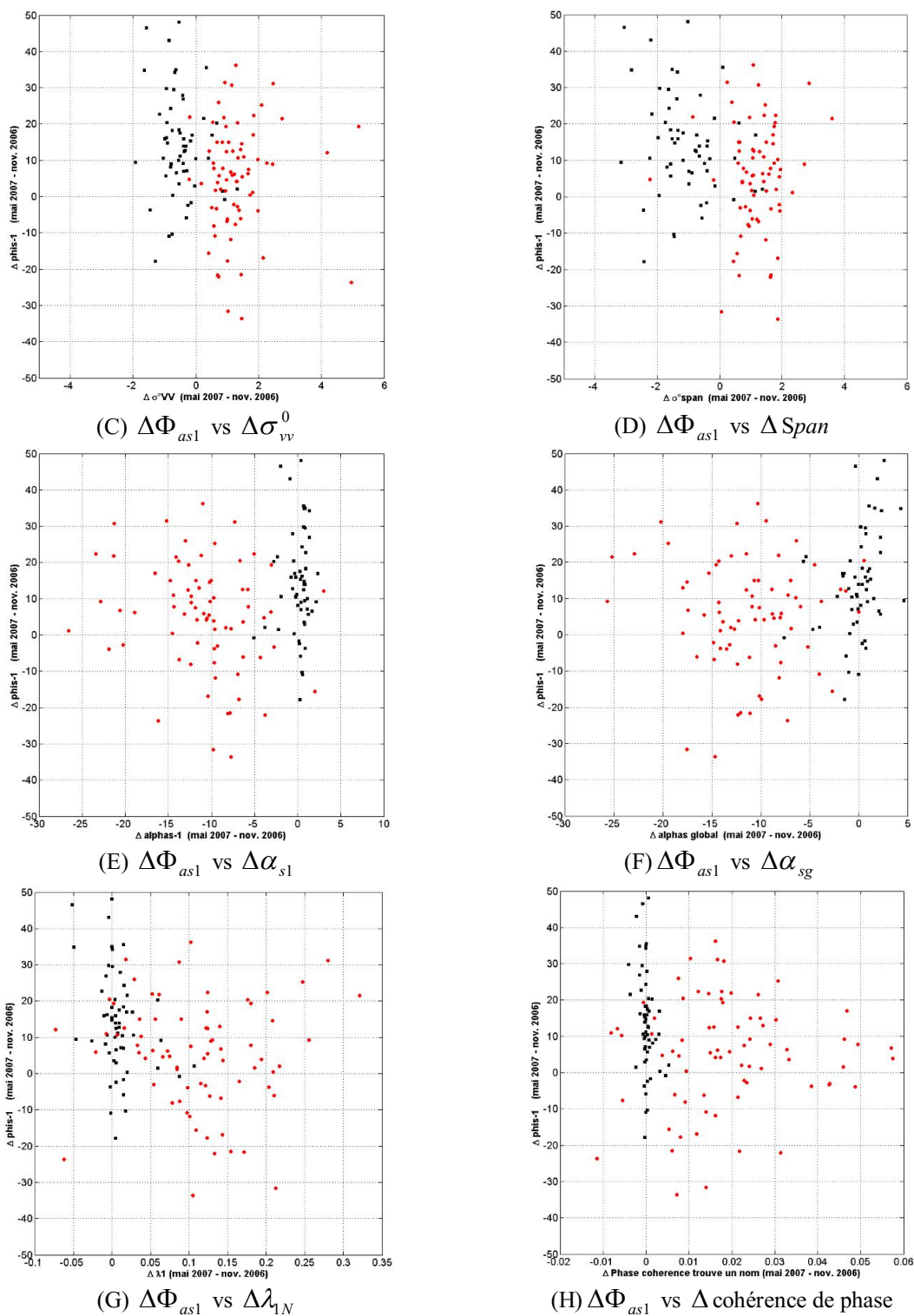


Figure 11.2-8 : Évolution temporelle par objets de la phase Φ_{as1} comparée à celle des canaux de polarisation et des paramètres de décomposition, marais herbacés (H2, c171) et tourbières ouvertes (A3, c61)

11.3. Les tourbières ouvertes ([A3], [h1])

La teinte blanchâtre des fens herbacés ([h1]), clairement perceptible sur l'image Ikonos (Figure 9.2-12), ne se traduit pas par des signatures spectrales significativement différentes de celle des bogs à arbrisseaux ([A3]) (Figure 11.3-1). L'évolution de ces deux classes pour l'année 2009 reste d'ailleurs similaire tout au long de la saison et ainsi leurs signatures spectrales respectives ne présentent pas une forte influence du substrat comme ce fut le cas pour le Phalaris. La stabilité saisonnière de ces signatures spectrales (Figure 11.3-1) est en partie due à la signature spectrale de la sphaigne, qui ressemble à celle des autres plantes vasculaires (Bubier et *al.*, 1997, Arkimaa et *al.*, 2005) et qui réfléchira moins que le substrat des marais herbacés pour ρ_{TM4} et ρ_{TM5} .

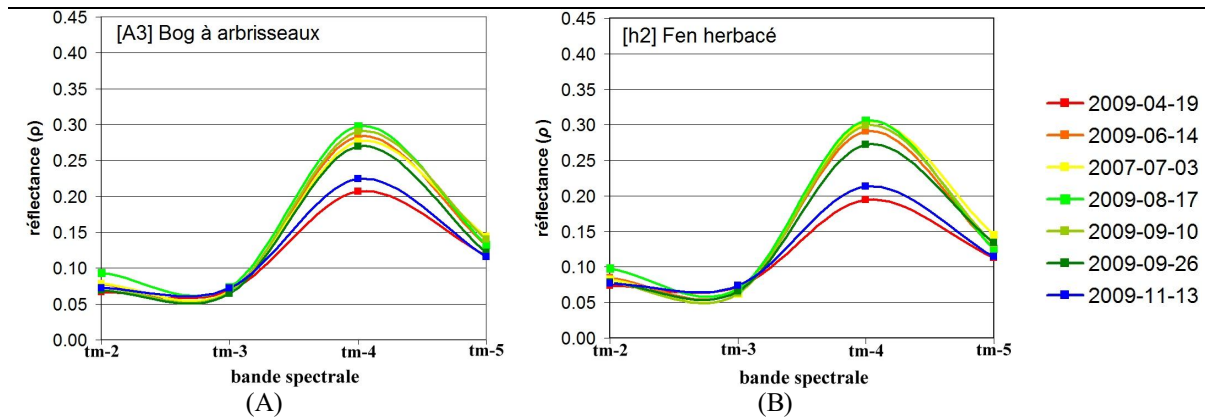


Figure 11.3-1 : Évolution saisonnière de la signature spectrale d'un site de bog à arbrisseaux et d'un site de fen herbacé, tourbière de la Baie des Mines

Il a été vu aux sections précédentes que les objets appartenant aux tourbières ouvertes ont surtout été caractérisés par une rétrodiffusion de surface et qui est demeurée stable entre les deux acquisitions ALOS. Pour les mois de novembre et mai, le type dominant de rétrodiffusion symétrique α_{s1} moyen est demeuré inférieur à 5^0 . La rétrodiffusion de surface est de plus demeurée pure avec un λ_{1N} moyen de 0.83 ± 0.09 et 0.84 ± 0.08 pour novembre et mai respectivement. Ainsi, en l'absence d'une contribution significative de λ_{2N} et λ_{3N} (Nov. $\lambda_{2N} = 0.09 \pm 0.05$, et Mai $\lambda_{2N} = 0.08 \pm 0.04$), le type global de rétrodiffusion α_{sg} est aussi demeuré faible avec une valeur moyenne de $13.4^\circ \pm 7.8$ et $13.6^\circ \pm 6.7$. Les canaux de polarisations ont aussi montré la même tendance temporelle pour laquelle la valeur moyenne

de l'ensemble des objets appartenant à la classe de tourbière ouverte (c61) est demeurée à l'intérieur d'une fourchette de 2dB : σ_{hh}^0 de -6.2 dB à -6.7 dB; σ_{hv}^0 de -17.7 dB à -18.4 dB; σ_{vv}^0 de -6.4dB à -6.9 dB et le *span* de -5.8dB à -6.8 dB entre novembre et mai respectivement (voir aussi la Figure 11.3-2).

Il est intéressant de noter que malgré une rétrodiffusion de surface pure le 13 mai 2007, les objets de tourbières ouvertes présentent un σ_{hv}^0 significativement supérieur à celui des sols lisses et peu rugueux pour la même période qui était de -20.9dB et de -24.4dB respectivement pour les classes c6 et c9. Ainsi, quelle que soit la cause, il existe dans les tourbières un mécanisme de rétrodiffusion qui a contribué au maintien d'une composante de rétrodiffusion volumique ou multiple entre novembre et mai et qui ne s'explique pas par les autres paramètres. Comme pour les paramètres relatifs à la radiométrie, les paramètres α_{s1} , α_{sg} , λ_{1N} et λ_{2N} (et par extension λ_{3N}) ne présentent pas non plus d'évolution temporelle significative pour l'ensemble de la section ouverte de la tourbière de la Baie des Mines (Figure 11.3-2).

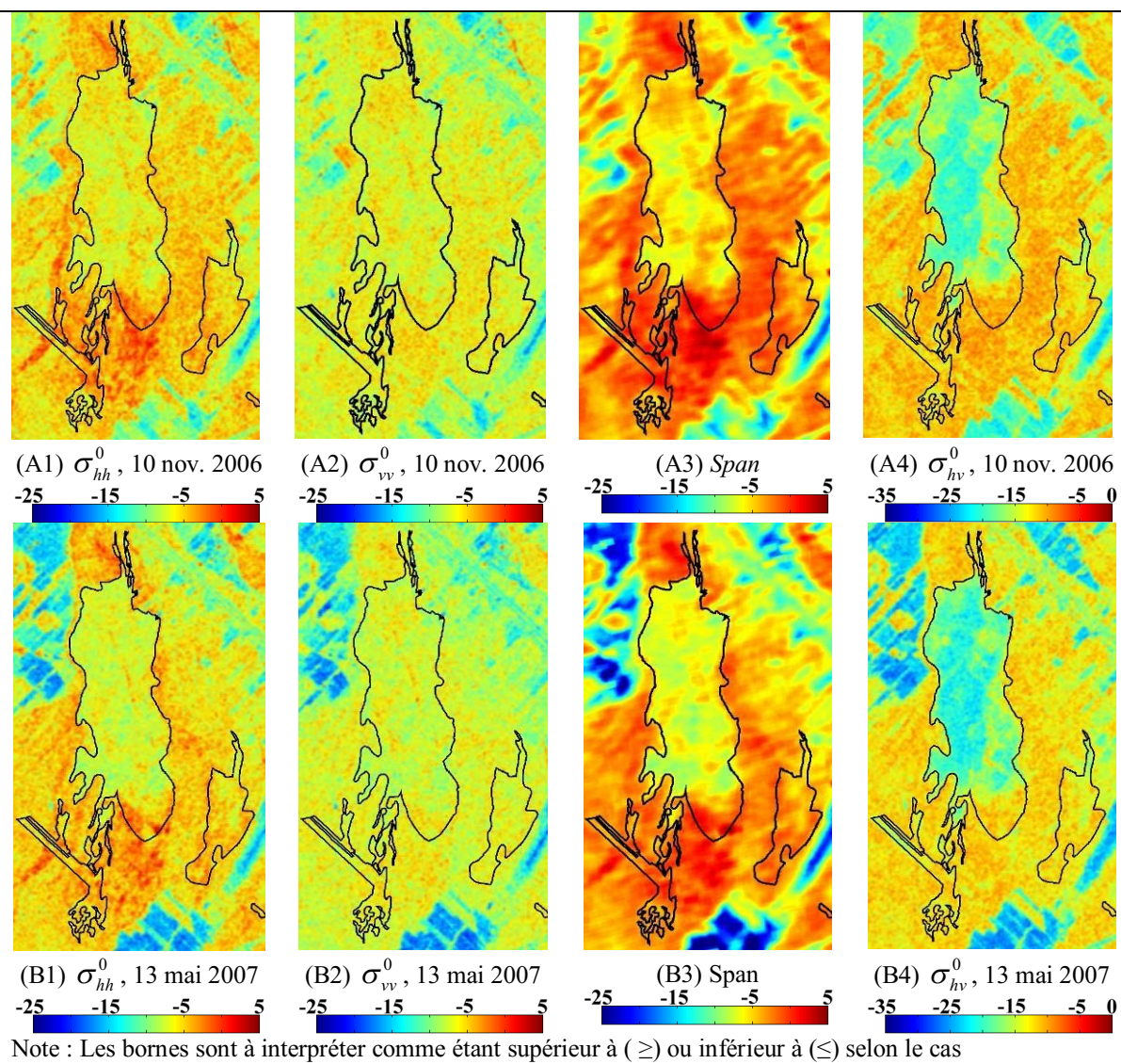


Figure 11.3-2 : Comparaison des canaux de polarisation et du *Span* entre les deux acquisitions ALOS

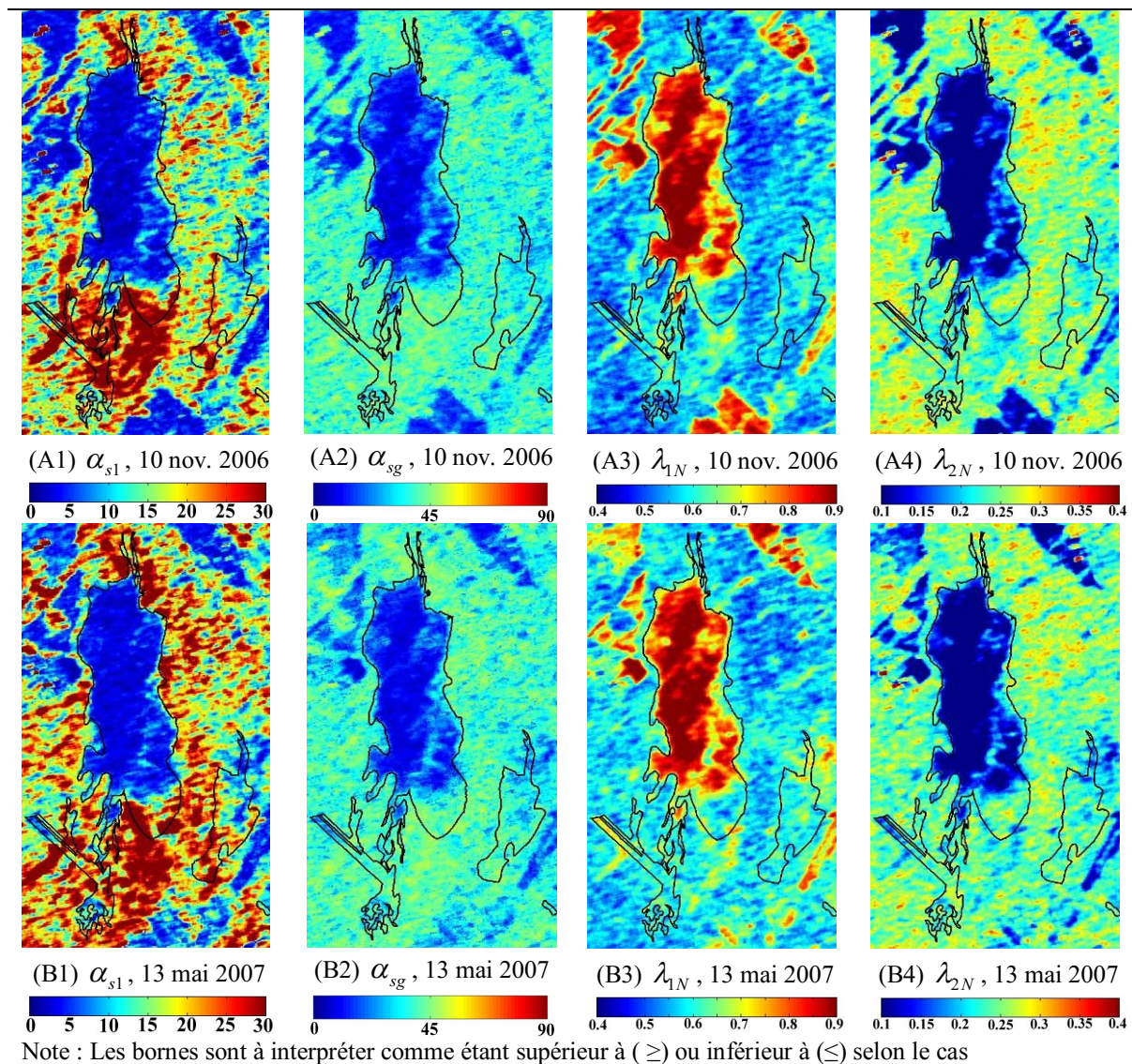


Figure 11.3-3: Comparaison du type symétrique de rétrodiffusion et des valeurs propres des deux dates d'acquisition ALOS

11.4. Analyse de séparabilité des physionomies végétales

L'apport des images multipolarisées et polarisées pour la classification de divers milieux naturels a fait l'objet de quelques études dont Lee et *al.* (2001), Alberga (2008), Ainsworth et *al.* (2009) et McNairn et *al.* (2009). Ces études montrent que l'utilisation simultanée de quelques canaux de polarisation permet toujours d'améliorer les résultats d'une classification mais que cette amélioration demeure parfois marginale. L'utilisation des paramètres issus des décompositions polarimétriques permettent aussi d'améliorer les résultats d'une classification notamment par l'utilisation de la phase polarimétrique (Alberga, 2008; Ainsworth et *al.*, 2009). Pour évaluer le potentiel des paramètres de la décomposition de Touzi, nous avons procédé à une analyse de séparabilité des classes basée sur l'algorithme de la divergence transformée (cf. §8.5.3). Pour l'ensemble des 25 classes physionomiques (cf. §9.3.1, Annexe 2) nous avons ainsi calculé au total 300 mesures de séparabilité. Les résultats de cette analyse sont présentés par la suite en examinant tout d'abord la séparabilité moyenne entre les grands groupes de physionomies (champs, forêt et milieux humides) et par la suite la séparabilité entre classes physionomiques des milieux humides.

11.4.1. Séparabilité entre groupes de physionomies

Canaux de polarisation et décomposition de Freeman

Les canaux de polarisation n'offrent pas en général de bonnes séparabilités moyennes (Tableau 11.4-1, configuration A). Cela s'observe à la fois entre groupes de physionomies (champs vs forêt, ...) et entre les classes constituant un groupe de physionomies (champs vs forêt, ...). Une tendance à la hausse de la divergence transformée moyenne est cependant observable lorsque les groupes examinés présentent soit une différence de l'humidité des sols (champs vs milieux humides) ou des différences de physionomies végétales (milieux humides entre eux ; champs vs forêts). Dans le premier cas ceci est explicable par leur sensibilité certaine à cette condition du substrat tandis que dans le second cas, ceci est explicable par leur sensibilité au type dominant de rétrodiffusion (surface vs volume).

	Champs	champs	Foret	MH	MH	MH	
	vs	vs	vs	vs	vs	vs	
	Champs	forêt	Foret	champs	forêt	MH	Total
Nombre paires	105	75	10	75	25	10	300
A) $\sigma_{hh}^0, \sigma_{hv}^0, \sigma_{vv}^0$	0.75± 0.45	1.51± 0.43	0.64± 0.35	1.53± 0.40	1.16± 0.52	1.49± 0.64	1.19± 0.57
B) Freeman $\sigma_{Odd}^o, \sigma_{Dbl}^o, \sigma_{Vol}^o$	0.89± 0.50	1.55± 0.41	0.71± 0.39	1.67± 0.38	1.31± 0.59	1.61± 0.59	1.30± 0.57
C) Freeman %Odd, % Dbl., %Vol	1.09± 0.88	1.404± 0.515	0.19± 0.11	1.42± 0.60	0.94± 0.64	1.25± 0.68	1.21± 0.73
D) Touzi: $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1, \tau_1 , m_1$	0.30± 0.19	1.14± 0.43	0.23± 0.22	1.23± 0.65	1.18± 0.48	1.58± 0.48	0.86± 0.63
E) Touzi : $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1, \tau_1 , m_1, \lambda_{1N}$	0.61± 0.30	1.56± 0.38	0.43± 0.35	1.62± 0.48	1.57± 0.39	1.78± 0.38	1.21± 0.624
F) Touzi : <i>span</i> + $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1, \tau_1 , m_1, \lambda_{1N}$	0.86± 0.34	1.69± 0.34	0.85± 0.43	1.78± 0.30	1.65± 0.34	1.81± 0.37	1.40± 0.54
G) Touzi: $\alpha_{s2}, \Phi_{as2}, \psi_2, \tau_2 $	0.15± 0.12	0.64± 0.29	0.12± 0.10	0.68± 0.59	0.65± 0.36	0.95± 0.60	0.47± 0.45
H) Touzi : $\alpha_{s2}, \Phi_{as2}, \psi_2, \tau_2 , m_2, \lambda_{2N}$	0.28± 0.18	1.30± 0.42	0.29± 0.23	1.25± 0.67	1.25± 0.43	1.57± 0.54	0.90± 0.65
I) Touzi : $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1, \tau_1 , m_1, \lambda_{1N}$ $\alpha_{s2}, \Phi_{as2}, \psi_2, \tau_2 , m_2, \lambda_{2N}$	1.09± 0.54	1.77± 0.29	0.63± 0.41	1.77± 0.37	1.73± 0.32	1.83± 0.35	1.49± 0.55
J) Touzi : <i>span</i> + $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1, \tau_1 , \lambda_{1N}, m_1$ $\alpha_{s2}, \Phi_{as2}, \psi_2, \tau_2 , \lambda_{2N}, m_2$	1.26± 0.49	1.84± 0.24	1.00± 0.43	1.87± 0.23	1.78± 0.28	1.85± 0.30	1.61± 0.46

Note : **Champs**: c1, c4, c5, c6, c7, c8, c9, c10, c11, c12, c13, c14, c15, c16, c17

Foret: c91, c92, c93, c94, c95. **Milieux humides (M.H)**: c21, c61, c171, c181, c191.

Tableau 11.4-1 : Séparabilités moyennes par groupe de physiologies et entre groupes de physiologies obtenues avec l'algorithme de la divergence transformée, 10 novembre 2006

Les paramètres de décomposition de Freeman (Tableau 11.4-1, configuration B) offrent des séparabilités légèrement supérieures aux canaux de polarisation. Les mêmes tendances quant aux séparabilités maximales sont ici aussi observables. La normalisation des paramètres de Freeman (c'est-à-dire $\sigma_{Total}^o = \sigma_{Odd}^o + \sigma_{Dbl}^o + \sigma_{Vol}^o$ et $\%Odd = \sigma_{Odd}^o / \sigma_{Total}^o * 100$ et ainsi de suite) ne fait que dégrader la séparabilité moyenne à l'exception de la séparabilité des champs entre eux où, somme toute, l'amélioration demeure plutôt marginale (de 0.89 à 1.09). Cette légère amélioration cache cependant deux tendances inverses. La séparabilité entre les physiologies dénudées humides et dénudées sèches a été réduite par la normalisation alors que la

séparabilité entre les physionomies dénudées sèches (c14, c15 et c16 vs c17) et certaines physionomies herbacées sur substrat sec (c9 vs c11) ont connu une augmentation de leur séparabilité.

Décomposition de Touzi

Le même constat est observé avec les paramètres de la décomposition de Touzi. L'utilisation conjointe du *span* (radiométrie) et des "paramètres de structure" pour lesquels la radiométrie est normalisée (Tableau 11.4-1, configuration D et E vs F) permet d'améliorer les séparabilités moyennes. Ainsi les paramètres α_{s1} , $\Phi_{\alpha s1}$, ψ_1 , τ_1 et λ_{1N} ne permettent pas de tenir compte de certains aspects des physionomies qui pourraient être utilisés lors de leur classification surtout lorsqu'il y a une portion significative de dépolarisation du signal. La biomasse, quelle que soit son origine (foliaire, du tronc, des branches...), est l'un de ces aspects. Cela se remarque si l'on compare l'absence de séparabilité à l'intérieur du groupe de forêt ($\bar{x} d.t. = 0.23$, config. D) comparativement aux milieux humides où la polarisation du signal est plus importante avec une séparabilité moyenne de 1.58. L'utilisation du *Span* (configuration F) a fait augmenter la séparabilité totale des groupes de physionomies de 1.21 à 1.40 et celles des physionomies arborées de 0.43 à 0.85 (config. E vs F). Même si ces augmentations restent faibles, on voit l'avantage à utiliser conjointement des "paramètres de structure" et de radiométrie.

L'utilisation des paramètres de la seconde composante, utilisés seuls, ne permettent pas d'obtenir de bonnes séparabilités des classes (config. G et H). Ils permettent cependant d'améliorer les séparabilités moyennes lorsqu'ils sont utilisés conjointement avec le *span* et les paramètres de la première composante (config. I et J). Les différentes relations existant entre les paramètres de la première et seconde composante ont été explorées au chapitre précédent. Il a été vu, entre autres, qu'une forte dominance de la première composante ($\lambda_{1N} > 0.85$) résulte en une forte dispersion de la seconde composante, cette dernière s'apparentant alors à du bruit pour les objets concernés. La relation entre α_{s1} et α_{s2} pour les physionomies dénudées est un bon exemple de ce type de relation (section 10.5). On remarque d'ailleurs que la séparabilité moyenne entre les physionomies des champs, toujours faible, passe de 0.61 à 0.28 pour les paramètres de la première et seconde composante (Tableau

11.4-1, config. E vs config. H). Pour les physiologies arborées des milieux secs ou humides (c.-à-d. les marécages), lorsque λ_{1N} prend des valeurs moyennes (≈ 0.7), les paramètres de la seconde composante tendent à prendre une valeur inversement proportionnelle à celle de la première composante. Ce comportement, observé en particulier pour α_{s2} et λ_{2N} , fait en sorte qu'un certain niveau de séparabilité peut être maintenu.

Si les paramètres de la seconde composante ne peuvent assurer à eux seuls de bonnes séparabilités, leur complémentarité avec les paramètres de la première composante est clairement visible en comparant les configurations E et I. L'utilisation conjointe de λ_{1N} et λ_{2N} a sans doute été l'un des facteurs derrière l'amélioration des séparabilités moyennes particulièrement celle des physiologies dénudées (\bar{x} d.t. de 0.61 à 1.09). Cela concorde à ce qui est rapporté dans la littérature où l'anisotropie est un bon estimateur de la rugosité de surface (Hajnsek et al., 2003; Verhoest et al., 2008; Baghdadi et al., 2008).

Comme mentionné, la séparabilité des classes impliquant les physiologies arborées a plus profité de l'introduction du *Span* que des paramètres de la seconde composante. Pour expliquer ceci il faut avoir recours à la notion de section radar normalisée (*Radar Cross Section*). En supposant que l'on puisse utiliser un cylindre pour modéliser les troncs et les principales branches de la canopée, la section radar normalisée du cylindre est équivalente à :

$$\sigma_{\max} = \frac{2\pi r h^2}{\lambda} \quad (11.4-1)$$

où r est le rayon du cylindre, h sa hauteur et λ la longueur d'onde du système qui éclaire la cible. La puissance du signal rétrodiffusé jusqu'au capteur augmentera en fonction du carré de la hauteur moyenne et du rayon de la physiologie. Plus le tronc d'un arbre est large et haut, plus il offrira une grande surface de réflexion augmentant du coup la puissance rétrodiffusée (Matthaeis et Lang, 2005). L'augmentation de la proportion de rétrodiffusion simple bond sur la rétrodiffusion totale, surtout si le substrat est sec, résultera en une baisse de α_{s1} et ce surtout pour un angle d'incidence de 21.5° caractérisant les images ALOS qui favorise la rétrodiffusion à bond unique contrairement aux angles d'incidence plus rasants favorisant la rétrodiffusion double-bond.

11.4.2. Séparabilité des classes physionomiques des milieux humides

Les classes de milieux humides sont celles pour lesquelles les meilleures séparabilités moyennes de classes ont été observées. Cela est compréhensible vu la diversité des physionomies regroupées dans cette classe et la présence d'eau, du moins d'un substrat humide, qui a pour effet de "rehausser la structure" de ces physionomies. Cette section examinera en détail la séparabilité entre chaque classe physionomique selon les mêmes configurations de paramètres que celles présentées à la section précédente. Le paramètre ayant le plus contribué à la séparabilité entre deux classes sera aussi identifié. En guise de rappel, les physionomies suivantes ont été identifiées :

- i. c191, marécage arboré ([A1]);
- ii. c181, marécage arbustif ([A2]);
- iii. c21, les tourbières boisées ([A2]);
- iv. c61, tourbière ouverte, incluant les bogs à arbrisseaux ([A3]) et les fens herbacés ([h2]) ;
- v. c171, les marais herbacés ([H2]) du type *Phalaris arundinacea*.

Les données présentées au Tableau 11.4-2 montrent que les paramètres de la décomposition de Freeman offre une performance comparable à celle des canaux de polarisation σ_{hh}^0 , σ_{hv}^0 et σ_{vv}^0 . Pour les canaux de polarisation et les paramètres de Freeman, seules les classes appartenant à des physionomies distinctes sont parfaitement séparées soit les tourbières ouvertes (c21) vs les marais herbacés (c171) et les tourbières ouvertes (c21) vs les tourbières boisées (c61).

La prédominance de la structure pour les classes de milieux humides est indiquée par la sélection de la polarisation σ_{hh}^0 et du paramètre σ_{Dbl}^0 de la décomposition de Freeman comme contribution principale de séparabilité. Selon la même logique, les paramètres de structure de la décomposition de Touzi, lorsqu'utilisés seuls (Tableau 11.4-2-D), permettent d'obtenir une séparabilité équivalente. Alors que le paramètre α_{s1} assure la séparabilité entre les tourbières ouvertes et boisées, c'est la phase $\Phi_{\alpha s1}$ qui montre la plus forte contribution à la séparabilité entre les marais herbacés (c171) vs les marécages arbustifs (c181, $\bar{x} d.t.=1.58$) et vs les marécages arborés (c191, $\bar{x} d.t.=1.99$). Ces résultats confirment l'apport essentiel de la phase $\Phi_{\alpha s1}$ pour la caractérisation des physionomies des milieux humides. De plus, cette conclusion repose sur un nombre significatif d'observations (d'objets) et non pas sur des exemples

savamment choisis. En comparaison, la différence de phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ utilisée dans la décomposition de Freeman pour calculer σ_{Odd}^0 et σ_{Dbl}^0 n'a pas été en mesure d'apporter la même information (Tableau 11.4-2-B et C) et, plus important, une information utile à la caractérisation des physionomies végétales.

L'ajout des paramètres λ_{1N} et m_1 aux autres paramètres de la décomposition de Touzi (Tableau 11.4-2, configuration E) a permis d'obtenir une meilleure séparabilité pour la majorité des milieux humides à l'exception d'une confusion qui persiste entre les tourbières ouvertes et boisées (c21 vs c61, $\bar{x} d.t. = 1.34$) de même qu'entre les marécages arborés et arbustifs (c181 vs c191, $\bar{x} d.t. = 0.80$). On remarque aussi que l'importance de la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ pour la séparabilité entre les marais herbacées (c171) et les marécages arborés (c181) ou arbustifs (c191) s'est maintenue malgré l'introduction des paramètres λ_{1N} et m_1 . Le paramètre α_{s1} a cependant été remplacé par λ_{1N} et m_1 comme principale source de séparabilité pour les autres paires de classes, mais une forte corrélation entre α_{s1} et m_1 a cependant été noté (cf. §6.5) à l'exception, justement, des marais herbacés.

La majorité des physionomies sont séparables selon la configuration E avec des divergences transformées supérieures à 1.8, mais la confusion entre tourbières ouvertes et boisées (c21 vs c61, d.t.=1.34) ainsi qu'entre les marécages arborés et arbustifs (c181 vs c191, d.t.=0.8) persiste. En comparant l'apport du *span* (Tableau 11.4-2, configuration F) ou des paramètres de la seconde composante (configuration I) aux paramètres de la première composante on ne note qu'une augmentation marginale de la séparabilité des classes contrairement à ce qui a été observé pour les surfaces dénudées. L'utilisation de l'ensemble des paramètres (configuration J) a permis d'obtenir les meilleures séparabilités mais une forte confusion existe toujours entre marécages arborés et arbustifs (d.t. = 1.09).

(A) $\sigma_{hh}^0, \sigma_{hv}^0, \sigma_{vv}^0$						(B) Freeman: $\sigma_{odd}^0, \sigma_{dbl}^0, \sigma_{vol}^0$					
	21	61	171	181	191		21	61	171	181	191
21 [A2]	----	σ_{hv}^0 1.02	n.a	σ_{hh}^0 1.07	σ_{hh}^0 1.41	21 [A2]	----	n.a	σ_{odd}^0 0.65	σ_{dbl}^0 1.70	σ_{dbl}^0 1.99
61 [A3]	0.89	----	σ_{hv}^0 0.90	n.a	n.a	61 [A3]	1.21	----	n.a	σ_{dbl}^0 1.99	σ_{dbl}^0 2.00
171 [H2]	0.78	1.82	----	σ_{hh}^0 1.30	σ_{hh}^0 1.54	171 [H2]	0.99	1.94	----	σ_{dbl}^0 1.22	σ_{dbl}^0 1.92
181 [A2]	1.71	1.99	1.73	----	n.a	181 [A2]	1.94	2.00	1.77	----	σ_{dbl}^0 0.21
191 [A1]	1.92	2.00	1.91	0.16	----	191 [A1]	2.00	2.00	1.97	0.26	----
(C) Freeman : % odd, % dbl, % vol						(D) Touzi : $\alpha_{s1}, \Phi_{\alpha s1}, \psi_1, \tau_1 $					
	21	61	171	181	191		21	61	171	181	191
21 [A2]	----	n.a	n.a	%dbl 0.96	%dbl 1.75	21 [A2]	----	α_{s1} 0.56	$ \tau_1 $ 0.57	α_{s1} 1.04	α_{s1} 1.57
61 [A3]	0.83	----	%odd 1.63	%dbl 1.67	%dbl	61 [A3]	0.93	----	α_{s1} 1.49	α_{s1} 1.91	α_{s1}, ψ_1 1.98, 1.84
171 [H2]	0.83	1.91	----	%dbl 1.98	%dbl	171 [H2]	1.36	1.91	----	$\Phi_{\alpha s1}$ 0.96	$\Phi_{\alpha s1}$ 1.93
181 [A2]	1.38	1.99	0.35	----	n.a	181 [A2]	1.52	1.98	1.58	----	$\Phi_{\alpha s1}$ 0.40
191 [A1]	1.92	2.00	1.05	0.21	----	191 [A1]	1.93	2.00	1.99	0.62	----
(E) Touzi : $\alpha_{s1}, \Phi_{\alpha s1}, \psi_1, \tau_1 , \lambda_{1N}, m_1$						(F) Touzi : $span + \alpha_{s1}, \Phi_{\alpha s1}, \psi_1, \tau_1 , \lambda_{1N}, m_1$					
	21	61	171	181	191		21	61	171	181	191
21 [A2]	----	n.a	λ_{1N} 0.87	m_1 1.26	m_1 1.78	21 [A2]	----	m_1, λ_{1N} 0.62	λ_{1N} 0.87	m_1 1.26	m_1 1.78
61 [A3]	1.34	----	λ_{1N} 1.90	α_{s1} 1.91	n.a	61 [A3]	1.40	----	λ_{1N} 1.92	α_{s1}, m_1 1.92	n.a
171 [H2]	1.86	2.00	----	$\Phi_{\alpha s1}$ 0.96	$\Phi_{\alpha s1}$ 1.93	171 [H2]	1.90	2.00	----	$span$ 1.34	$\Phi_{\alpha s1}$ 1.93
181 [A2]	1.94	2.00	1.84	----	$\Phi_{\alpha s1}$ 0.4	181 [A2]	1.96	2.00	1.94	----	n.a
191 [A1]	1.99	2.00	2.00	0.80	----	191 [A1]	2.00	2.00	2.00	0.89	----

(G) Touzi : $\alpha_{s2}, \Phi_{\alpha s2}, \psi_2, \tau_2 $						(H) Touzi : $\alpha_{s2}, \Phi_{\alpha s2}, \psi_2, \tau_2 , \lambda_{2N}, m_2$					
	21	61	171	181	191		21	61	171	181	191
21 [A2]	----	n.a	n.a	n.a	$\Phi_{\alpha s2}$ 0.75	21 [A2]	----	n.a	λ_{2N} 0.83	m_2 0.80	m_2 1.48
61 [A3]	0.34	----	n.a	$\Phi_{\alpha s2}$ 0.69	$\Phi_{\alpha s2}$ 1.57	61 [A3]	0.73	----	λ_{2N} 1.86	λ_{2N} 1.43	$m_2, \Phi_{\alpha s2}$ 1.57
171 [H2]	0.53	0.22	----	$\Phi_{\alpha s2}$ 0.88	$\Phi_{\alpha s2}$ 1.71	171 [H2]	1.37	<u>1.91</u>	----	m_2 0.96	$\Phi_{\alpha s2}$ 1.71
181 [A2]	0.66	1.25	1.19	----	n.a	181 [A2]	<u>1.59</u>	<u>1.97</u>	<u>1.72</u>	----	n.a
191 [A1]	1.33	<u>1.83</u>	<u>1.81</u>	0.37	----	191 [A1]	<u>1.91</u>	<u>1.99</u>	<u>1.99</u>	0.50	----
(I) Touzi : $\alpha_{s1}, \Phi_{\alpha s1}, \psi_1, \tau_1 , \lambda_{1N}, m_1$ $\alpha_{s2}, \Phi_{\alpha s2}, \psi_2, \tau_2 , \lambda_{2N}, m_2$						(J) Touzi : $span + \alpha_{s1}, \Phi_{\alpha s1}, \psi_1, \tau_1 , \lambda_{1N}, m_1$ $\alpha_{s2}, \Phi_{\alpha s2}, \psi_2, \tau_2 , \lambda_{2N}, m_2$					
	21	61	171	181	191		21	61	171	181	191
21 [A2]	----	n.a	λ_{1N} 0.87	m_1 1.26	m_1 1.78	21 [A2]	----	m_1, λ_{1N} 0.62	λ_{1N} 0.87	m_1 1.26	m_1 1.78
61 [A3]	<u>1.50</u>	----	λ_{1N} 1.9	α_{s1}, m_1 1.9	α_{s1}, m_1 1.9	61 [A3]	<u>1.55</u>	----	λ_{1N} 1.91	α_{s1}, m_1 1.91	α_{s1}, m_1 1.9
171 [H2]	<u>1.91</u>	<u>2.00</u>	----	m_1 1.07	$\Phi_{\alpha s1}$ 1.93	171 [H2]	<u>1.93</u>	<u>2.00</u>	----	$span$ 1.34	$\Phi_{\alpha s1}$ 1.93
181 [A2]	<u>1.99</u>	<u>2.00</u>	<u>1.97</u>	----	$\Phi_{\alpha s1}$ 0.4	181 [A2]	<u>1.99</u>	<u>2.00</u>	<u>1.98</u>	----	$\Phi_{\alpha s1}$ 0.4
191 [A1]	<u>2.00</u>	<u>2.00</u>	<u>2.00</u>	0.93	----	191 [A1]	<u>2.00</u>	<u>2.00</u>	<u>2.00</u>	1.09	----

Note 1: **c21** = tourbière ouverte, **c61**=tourbière boisée, **c171**=marais herbacé, **c181**= marécages arbustifs, **c191**=marécage arboré.

Note 2 :

-Section inférieure de la diagonale : divergence transformée totale. En gras souligné si la divergence transformée est ≥ 1.5 .

-Section supérieure de la diagonale : contribution individuelle maximale d'un paramètre à la divergence transformée totale. (n.a) aucune contribution individuelle significative d'un paramètre.

Tableau 11.4-2 : Séparabilités des classes de physionomies végétales des milieux humides mesurée avec la divergence transformée

11.5. Résumé

(Section 11.1) ■ Une analyse simple par seuillage, reposant sur une évaluation des erreurs de commissions et d'omissions, indique que la détection optimale des marécages doit reposer sur plusieurs paramètres lorsque les conditions d'acquisition ne sont pas optimales (automne, avec

feuilles, bas niveau d'eau ou substrat sec). Il est donc important de disposer à la fois d'information liée à la structure ($\alpha_s, \Phi_{\alpha_s}$), à la pureté de la polarisation (λ_{iN}, λ_i) et sur la composante multipolarisée ou volumique (λ_3). Ce n'est qu'avec des données polarisées qu'il est possible de réunir ces conditions (Tableau 11.1-2). **(Section 11.2)** ■ La phase Φ_{as1} apporte une information indépendante par rapport aux canaux de polarisations et aux autres paramètres de la décomposition de Touzi pour la caractérisation des hauts marais herbacés dominés par le Phalaris ([H2]). ■ Les valeurs négatives de Φ_{as1} apparaît êtres liées d'une part : → à l'atténuation du signal par les grandes physionomies herbacées, ce qui sera observé à la partie V avec les analyses basées sur les séries d'images RS2. → aux propriétés sur substrats, des loams argileux dans le cas des hauts marais à Phalaris, dont le drainage d'imparfait à mauvais contribue à conserver le substrat humide.

(Section 11.3) ■ Aucun paramètre ou canal de polarisation relatif à la radiométrie ou à la structure ne présente de changement aussi significatif que la phase Φ_{as1} (partie VI) entre novembre 2006 et mai 2007. Le *span*, par exemple, se maintient à ± 2 dB entre les deux acquisitions ALOS. **(Section 11.4)** ■ Les paramètres de la décomposition de Touzi offrent de meilleures séparabilités ($\bar{x} d.t = 1.61$) que les canaux de polarisation HH, HV et VV ($\bar{x} d.t = 1.19$) (Tableau 11.4-1). ■ La séparabilité entre les classes physionomiques s'améliore lorsque : 1) la radiométrie (ici le *span*) est utilisée conjointement aux paramètres de structure; 2) les paramètres de la seconde composante sont utilisés conjointement à ceux de la première composante. ■ Avec les paramètres de Touzi, l'ensemble des 5 classes physionomiques des milieux humides sont parfaitement séparable ($d.t. > 1.9$) à l'exception (Tableau 11.4-2-J): → des tourbières ouvertes ([A3], c21) vs les tourbières boisées ([A2], c61) ($d.t. = 1.55$); → des marécages arborés ([A1], c191) vs les marécages arbustifs ([A2], c181) ($d.t. = 1.09$). ■ Aucun paramètre de la seconde composante n'a été sélectionné comme principale source de discrimination entre deux classes physionomiques lorsque les paramètres de la première composante ont été conjointement utilisés. ■ La phase Φ_{as1} a été sélectionnée comme principale source de discrimination entre les hauts marais à Phalaris ([H2], c171) et les marécages arborés ([A1], c191) de même qu'entre les marécages arborés et arbustifs ([A2], c181). Les paramètres α_{s1} , λ_{iN} et le *span* ont aussi été sélectionnés comme principale source de séparabilité (Figure 11.4-2-J).

PARTIE V : ANALYSE DES DONNÉES RADARSAT-2 POUR L'IDENTIFICATION DES PHYSIONOMIES VÉGÉTALES

Cette partie présente les résultats d'une série d'analyses des paramètres de la décomposition de Touzi visant à évaluer le potentiel de ces paramètres pour différencier les physionomies végétales en milieu humide et milieu sec dans le cas de RADARSAT-2. Ces analyses comprennent des analyses de sensibilité des paramètres aux variations saisonnières des physionomies végétales (chapitre 12), des analyses de séparabilité des classes (chapitre 13) ainsi que des analyses classificatoires (chapitre 14).

CHAPITRE 12

12. SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES DE TOUZI AUX VARIATIONS SAISONNIÈRES DES PHYSIONOMIES VÉGÉTALES

Le but de ce chapitre est d'analyser la sensibilité des paramètres de décomposition de Touzi aux variations saisonnières de différentes physionomies végétales. Les observations issues de cette analyse serviront de guide aux analyses qui seront présentées aux chapitres 13 et 14. La section 12.1 fait un bref rappel des paramètres polarimétriques étudiés. Les sections 12.2 et 12.3 présentent les résultats de diverses analyses de sensibilité concernant les physionomies végétales des bas et des hauts marais. Les analyses de sensibilité pour les physionomies des marécages et des tourbières sont présentées respectivement dans les sections 12.4 et 12.5.

12.1. Paramètres polarimétriques examinés

Pour cette analyse nous avons décidé d'examiner surtout les paramètres de la composition de Touzi : α_{s1} , α_{sg} et $\Phi_{\alpha s1}$, le *span* ainsi que les valeurs propres $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et leur version normalisée ($\lambda_{1N}, \lambda_{2N}, \lambda_{3N}$). Malgré le fait que les canaux de polarisation $\sigma_{hh}^0, \sigma_{vv}^0$ et σ_{hv}^0 n'apportent qu'une information redondante (et parfois ambiguë) (chapitres 10 et 11), ils seront inclus dans cette analyse à des fins de référence. Plusieurs paramètres de la décomposition de Touzi seront laissés de côté pour cette partie car ils sont plus appropriés à la caractérisation d'un objet que d'une classe physionomique. Ils seront néanmoins réintroduits aux chapitres 13 et 14.

Nos analyses porteront sur les physionomies présentes : 1) dans les bas et hauts marais des îles de Sorel; 2) dans les marécages arborés et arbustifs des îles de Sorel et; 3) à la tourbière de la Baie des mines. Afin de mieux évaluer la spécificité du comportement dans le temps d'une physionomie végétale des milieux humides, nous la comparons au comportement d'un couvert végétal de physionomie similaire mais d'un milieu sec. Pour alléger les différents graphiques présentés, les dates sont exprimées en jours juliens tandis que les données sur les coefficients

de rétrodiffusions en unités d'intensité ($\text{amplitude}^{0.5}$) afin de pouvoir représenter les écarts-types de chaque classe. Le lecteur peut faire appel au tableau suivant pour la conversion des jours juliens en jours calendaires et des valeurs d'intensité en dB.

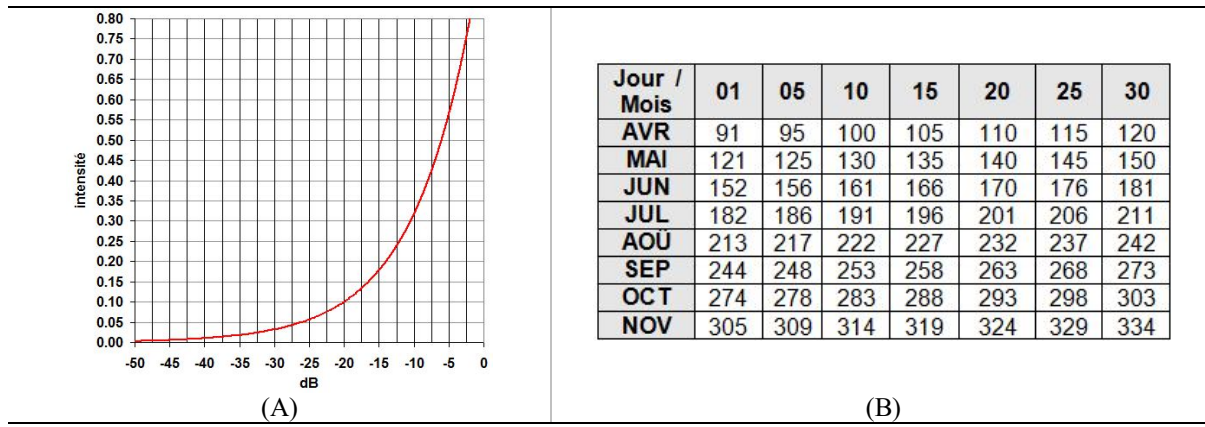
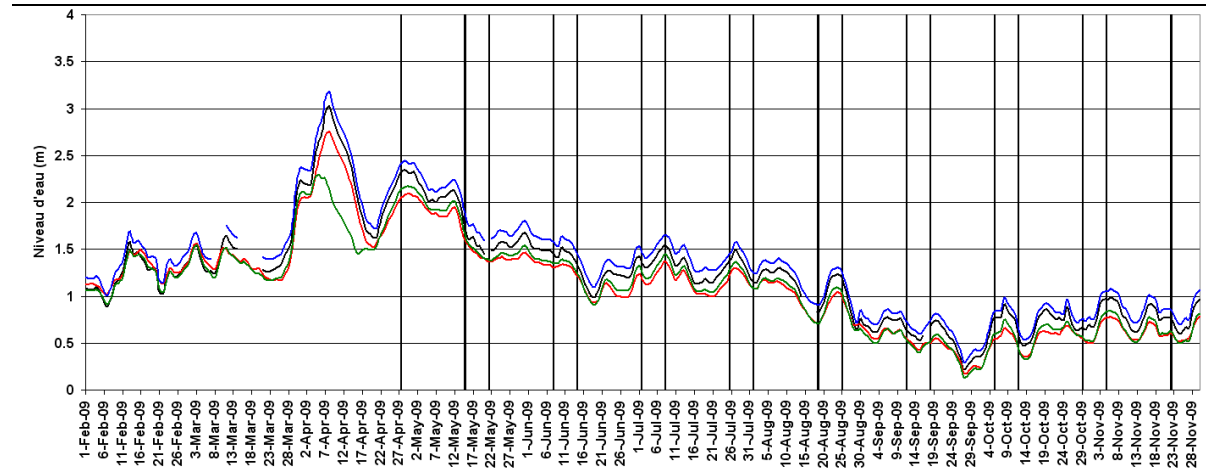


Figure 12.1-1 : Aide-mémoire pour la conversion (A) des unités d'intensité en dB et (B) des jours juliens en jours calendaires

Dans plusieurs cas nous ferons référence au niveau d'eau pour expliquer le comportement des paramètres polarimétriques. La figure suivante servira de référence.



Note : Le "niveau 0" correspond au zéro hydrographique, c.-à-d. à la position de la basse mer inférieure de grande marée (voir la figure 7.1-4 pour plus de détail et la source des données.)

Figure 12.1-2 : Évolution du niveau de l'eau du lac Saint-Pierre par rapport au zéro hydrographique, année 2009; les barres verticales indiquent les dates d'acquisition des données RS2

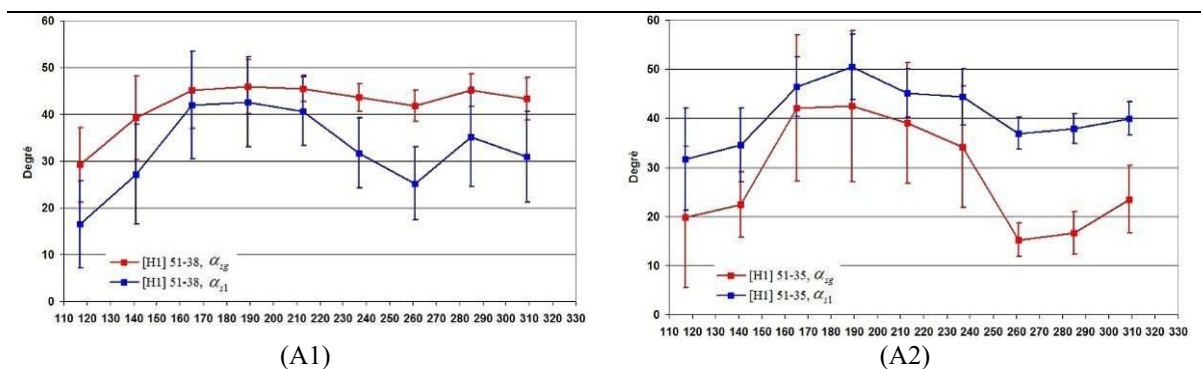
12.2. Physionomies végétales des bas et des hauts marais : signatures temporelles

12.2.1. Physionomies herbacées hautes [H1]

Dans les bas marais des îles de Sorel nous avons pu localiser un nombre suffisant d'objets de Typha ([51-38], *Typha latifolia* ou *Typha angustifolia*) et quelques objets d'Acore odorant ([51-35], *Acorus calamus*) seulement dans la série de données RS2 FQ15-A. Comme physionomie de comparaison d'un milieu sec nous utiliserons le maïs. Pour le maïs nous avons pu localiser plusieurs objets à la fois sur la série FQ15-A et sur la série FQ21-D. Ainsi seulement pour cette physionomie végétale nous présenterons des résultats obtenus avec les deux séries afin d'évaluer l'effet de l'angle d'incidence.

12.2.1.1 Milieux humides

Si l'on se fie aux variations des paramètres examinés (Figure 12.2-1), les physionomies de Typha et de l'Acore suivent grosso-modo le même pattern temporel. Ainsi d'une rétrodiffusion de surface au début du printemps, on passe dans la première phase de croissance des plantes (mai-juin) à une rétrodiffusion dipolaire ou double bond non dominante. Ce mécanisme continue à dominer pendant la deuxième phase (juillet-août) jusqu'à la maturité des plantes pour par la suite passer à une rétrodiffusion volumique durant la phase de la sénescence. Les particularités de rétrodiffusion par espèce sont examinées par la suite.



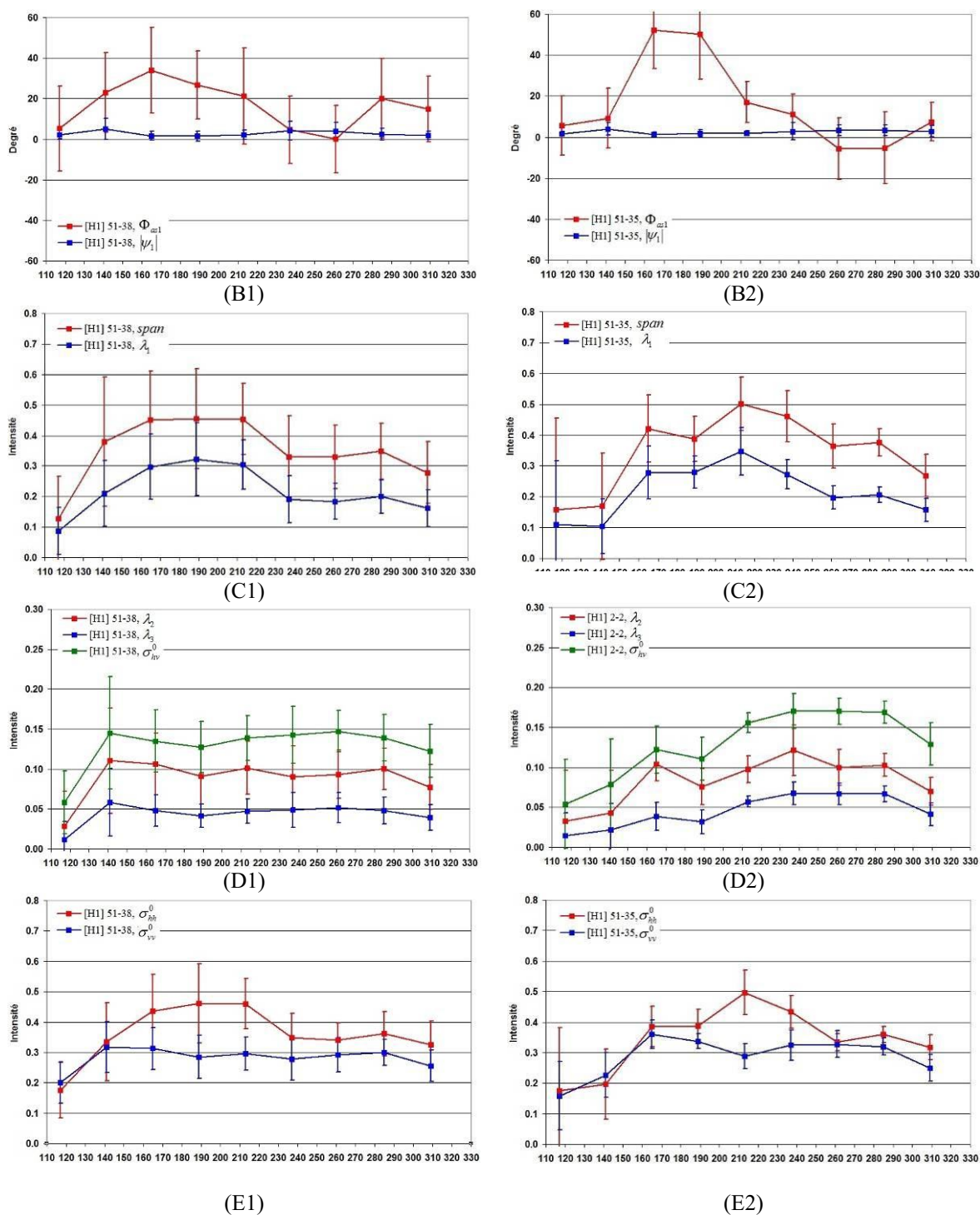


Figure 12.2-1 : Signatures saisonnières du *Typha* (*Typha angustifolia* ou *latifolia*) [H1-38] (colonne de gauche) et de l'Acore odorant (*Acorus calamus*) [H1-35] (colonne de droite); série FQ15-A

Typha

Au début du printemps, soit au mois d'avril, les sites de *Typha* se caractérisent par une rétrodiffusion de surface avec des faibles valeurs du type de rétrodiffusion symétrique

($\alpha_{s1} \approx 17^\circ$, Figure 12.2-1-A1). Cette rétrodiffusion de surface est confirmée par les valeurs faibles en intensité des canaux de polarisation σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 ($< -14\text{dB}$; Figure 12.2-1-E1), du *span* et des valeurs propres (Figure 12.1 C1 et D1). Particulièrement les valeurs de λ_2 et λ_3 sont près du bruit équivalent au signal de RS2 ($< -30\text{dB}$). Toutefois la diversité des sites de Typha au début du printemps (dénudés ou avec une végétation dressée mais desséchée) se traduit par de forts écarts types particulièrement visibles avec α_{s1} et α_{sg} .

Entre la fin avril et la mi-juin, l'intensité du *span* et des valeurs propres ainsi que des canaux de polarisation augmente alors que α_{s1} indique le passage d'une rétrodiffusion de surface à une rétrodiffusion dipolaire. Ici la signature saisonnière suit la croissance rapide de cette plante. Cette rétrodiffusion dipolaire dominante devient alors presque représentative de la rétrodiffusion totale entre la mi-juin et la fin juillet et on observe que :

- i. α_{s1} devient presque égal à α_{sg} . Le signal peut atteindre facilement le substrat inondé et une interaction tiges/eau apparait. Si cette composante double-bond ne parvient pas à dominer complètement la rétrodiffusion totale, elle favorise significativement la rétrodiffusion en polarisation horizontale d'où l'écart observé entre σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 et la rétrodiffusion dipolaire résultante;
- ii. λ_1 augmente proportionnellement au *span* alors que λ_2 et λ_3 diminuent légèrement puisque la rétrodiffusion dominante augmente en pureté.

Pendant le mois d'août, la rétrodiffusion des sites de Typha baisse significativement sous l'action combinée d'une biomasse arrivée à maturité, d'une densification et d'une augmentation de la hauteur des peuplements. Le niveau d'eau qui a diminué entre mai et août, passant de $\approx 2\text{m}$ à $\approx 1\text{m}$ au cours de cette période, explique également cette baisse observée de la rétrodiffusion. La saturation du signal en bande C et un accès plus difficile au substrat, maintenant exondé pour la plupart des sites, entraîne une baisse de l'ensemble des paramètres d'intensité (*span*, σ_{hh}^0 , σ_{vv}^0 , λ_1 et λ_2) à l'exception de λ_3 et σ_{hv}^0 qui eux augmentent légèrement et de concert avec la présence d'une composante volumique (Figure 12.2-1-D1). La source principale de la rétrodiffusion se déplace alors vers la portion supérieure de la canopée où les larges feuilles dressée du Typha favorisent la rétrodiffusion du signal plutôt que son atténuation. Cette transition d'une rétrodiffusion dipolaire (ou plutôt double-bond

faiblement dominante) est clairement marquée à partir du 22 juillet par α_{s1} qui amorce une descente pour atteindre $\approx 25^\circ$ vers la mi-août alors que a_{sg} se maintient dans la zone dipolaire grâce à l'apport de la composante volumique. Durant cette période (du 1^{er} au 25 août approximativement), cette transition se remarque également par :

- i. Une baisse du *span* et de λ_1 ;
- ii. Une baisse de σ_{hh}^0 qui se rapproche alors de σ_{vv}^0 ;
- iii. Une phase $\Phi_{\alpha s1}$ qui passe de 30° en moyenne à 0° vers le 15 août (Figure 12.2-1-B1).

Une observation importante, étayée plus loin par l'étude des diverses espèces de Scirpes de la classe [h1], concerne l'évolution temporelle de la rétrodiffusion. On observe que la rétrodiffusion maximale est atteinte lorsque des mécanismes cohérents de rétrodiffusion sont en place (vers la mi-juin) et non pas lorsque la biomasse aérienne atteint son maximum à la fin du mois de juillet. Cette observation est également valable pour λ_3 et σ_{hv}^0 qui ont atteint respectivement -17.0 et -24.4 dB vers le 20 mai (Figure 12.2-1-D1). Cela montre que les relations empiriques entre la biomasse aérienne et le coefficient de rétrodiffusion modélisées par des fonctions monotones (croissance ou décroissante) sont plutôt hasardeuses. Il est nécessaire d'être en mesure de pouvoir estimer quelle est la portion cohérente du signal (et son influence), ce qui est possible qu'avec les données polarimétriques.

L'Acore

Les signatures saisonnières de l'Acore (Figure 12.2-1) présentent une évolution très similaire à celles du Typha. Parmi les différences observées on note une transition plus marquée et rapide des paramètres α_{s1} et $\Phi_{\alpha s1}$ entre le 10 juin et la fin août (j.j. 160 à 240, Figure 12.2-1, A2 et B2). On note aussi que σ_{hv}^0 atteint un plateau d'environ -15dB entre le 25 août et le 5 octobre comparativement à ≈ -17 dB pour le Typha au cours de la même période. Il est possible que la faiblesse de l'échantillon de l'Acore (19 objets) comparativement à celui du Typha (114 objets) soit à l'origine d'une partie des différences observées. Le regroupement de ces deux espèces est justifié et sera confirmé par l'analyse de la séparabilité des classes (chapitre 13).

Fait aussi important à signaler est que la signature saisonnière de λ_3 et σ_{hv}^0 pour le Typha et l'Acore évolue de manière similaire ce qui suggère que σ_{hv}^0 peut être remplacé par λ_3 . De plus, λ_3 possède l'avantage de ne pas être affecté par un bris de symétrie azimutale ou de rotation, ces effets sont compensés par la décomposition de Touzi et contenus dans les angles τ_1 et ψ_1 . La section 12.5-3 donnera un exemple concret concernant les bas marais à Scirpes de la classe physiologique [h1].

12.2.1.2 Milieux secs

Les signatures saisonnières du Maïs (Figure 12.2-2) présentent à la fois des ressemblances et des différences par rapport aux signatures du Typha et de l'Acore (Figure 12.2-2). Parmi les similitudes on note :

- i. une rétrodiffusion globale de type dipolaire ($\alpha_{sg} = 35^\circ$) accompagnée d'une phase positive ($\Phi_{\alpha s1} > 20^\circ$) lorsque la biomasse est en phase de croissance;
- ii. Le *span* et λ_1 qui commencent à diminuer lorsque la biomasse foliaire atteint un certain niveau (ici à partir du 10 juillet, Figure 12.2-2-C); le *span* passe alors progressivement de -8dB à -10 dB entre le 10 juillet et le 15 septembre alors que σ_{hv}^0 et λ_3 se maintiennent à cause de la présence de la biomasse foliaire.

À l'inverse, des différences évidentes existent entre les signatures du Maïs et celles du Typha et d'Acore et soulignent que le calendrier de croissance d'une espèce végétale (c.-à-d. l'information temporelle) est aussi un facteur à considérer aux cotés de la physiologie. Cette différence temporelle se remarque notamment par :

- i. un retard d'environ 1 mois dans l'apparition d'une physiologie végétale (apparaissant entre le 10 juin et le 10 juillet);
- ii. la présence d'une "seconde phase" d'évolution du Maïs apparaissant à la mi-octobre qui est absente pour le Typha et l'Acore. Cela correspond à l'effet combiné du dessèchement de la biomasse foliaire du Maïs avant sa récolte et aux substrats généralement plus humides à l'automne²⁶. Le contenu en eau déficitaire de la végétation permet au signal incident de pénétrer profondément et atteindre le substrat (humide) favorisant ainsi

²⁶ Ce qui a été également observé avec l'image ALOS du 10 novembre 2006, notamment pour les objets des classes c8, c12 et c14, cf §10.4 à §10.6.

l'interaction sol/tiges, observable par l'augmentation marquée de α_{s1} et λ_1 durant cette période (Figure 12.2-2, A et C).

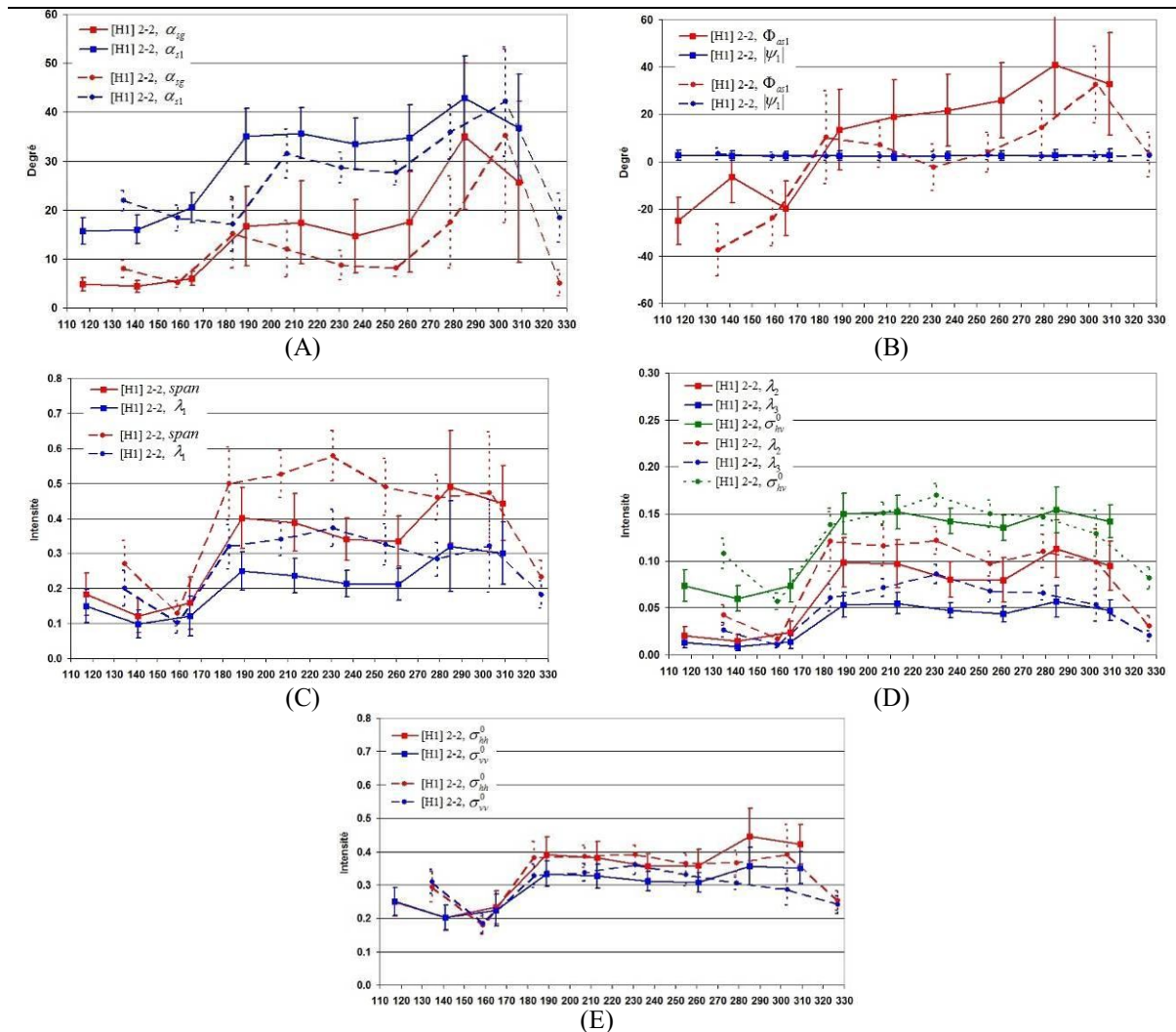


Figure 12.2-2 : Signatures saisonnières du Maïs [H1, 2-2]; en lignes pleines série FQ15-A, en lignes pointillées série FQ21-D

Concernant les effets d'angle d'incidence, on observe que les signatures des séries FQ15 (34.4 à 36°) et FQ21 (40.2 à 41.6°) sont généralement similaires à l'exception notable de α_{s1} qui pour la série FQ21 décroît entre le 30 juin et le 12 septembre (j.j 180 à 255). Plusieurs causes peuvent être évoquées dont une pénétration moindre du signal en FQ21 favorisant la rétrodiffusion de surface par les larges feuilles dressées du Maïs. Cette rétrodiffusion provenant de la portion supérieure de la canopée pourrait expliquer l'écart observé pour le $span$ au cours de la même période contrairement à une rétrodiffusion provenant de la portion

inférieure donc plus atténuée. Quoiqu'il en soit, cet écart n'est pas observé avec σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 et il faut aussi tenir compte des conditions météorologiques. En effet, les deux "creux" observés dans la série FQ21 (8 juin et 12 septembre) correspondent à deux acquisitions en conditions sèches. Cet effet est encore plus évident pour les physionomies herbacées de plus faible biomasse comme nous le verrons à la section 12.2.3.

12.2.2. Physionomies herbacées hautes [H2]

Cette classe physionomique a de particulier qu'elle contient des espèces de haut marais ([52-88] *Phalaris arundinacea* et [52-89] *Calamagrostis canadensis*) ainsi que de bas marais ([52-21] *Zizania Sp.*). Ce sont des espèces de grande taille (>1m) qui peuvent atteindre de fortes biomasses. Contrairement aux physionomies de type [H1], elles ne possèdent pas de structure particulière. Les longues feuilles étroites et désordonnées des espèces de cette classe physionomique devraient en principe favoriser une rétrodiffusion volumique.

12.2.2.1. *Milieux humides*

Si l'on se fie aux variations des paramètres examinés (Figure 12.2-3), les physionomies de Phalaris et de Zizanie ne suivent pas le même pattern temporel. Ainsi le Phalaris ne présente pas des variations significatives avec un mécanisme de diffusion volumique dominant tout au long de la période examinée. La Zizanie pour sa part se rapproche beaucoup plus au comportement du Typha. Les particularités de rétrodiffusion par espèce sont examinées par la suite.

Le Phalaris

Le Phalaris a fait l'objet d'une analyse à la section 11.2 qui a démontré que cette espèce était surtout caractérisée par une rétrodiffusion volumique avec une forte propension à atténuer le signal et avec une phase $\Phi_{\alpha s1}$ toujours négative.

Le Phalaris, tout comme le Typha, peut atteindre une forte biomasse aérienne pouvant dépasser le point de saturation de la bande C. Mais contrairement au Typha, il y a pour les

hauts marais à Phalaris une présence annuelle de biomasse pour l'ensemble des sites (cf §11.2) et le substrat est saturé en eau mais rarement inondé. Il en résulte que le type global de rétrodiffusion α_{sg} (Figure 12.2-3-A) connaît peu de variations annuelles car la rétrodiffusion volumique reste toujours présente et significative. Cela est confirmé par la puissance de λ_2 qui s'approche beaucoup plus de λ_1 (Figure 12.2-3-C vs D) comparativement aux classes physiologiques [H1] et [h1]. La faiblesse relative de λ_1 est beaucoup plus évidente lorsque les valeurs propres sont normalisées, λ_{1N} ne dépasse pas alors 0.61. L'absence d'un mécanisme de rétrodiffusion dominant et très polarisé pour le Phalaris se remarque à la fois par le *span* ainsi que les canaux de polarisation σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 qui ne dépassent pas en moyenne - 10dB (Figure 12.2-3-C et E).

Fait qui a échappé à l'analyse des données ALOS à cause de leurs dates d'acquisition (cf §8.3.1), le Phalaris présente au début de l'été (entre le 20 mai et le 30 juillet) une évolution de sa physiologie, période durant laquelle une nouvelle biomasse remplace celle de l'année précédente. En particulier entre le 20 mai et le 10 juin on observe une augmentation de α_{s1} qui serait liée à la présence des nouvelles tiges. Mais globalement, cette émergence des nouvelles tiges ne suffirait pas à produire une rétrodiffusion aussi forte que le volume de l'ancienne biomasse, notamment à cause de l'absence d'inondation. Passé le 10 juin, la croissance rapide du Phalaris éliminerait rapidement l'influence de l'interaction sol/tiges et déplacerait vers le haut de la canopée la source dominante de la rétrodiffusion d'où la décroissance observée de α_{s1} à partir de cette date. Tant que le point de saturation de la bande C n'est pas atteint (jusqu'à la fin juillet environ), le *span* et λ_1 continuent à augmenter de même que le canal σ_{vv}^0 . Passé le mois de juillet, le phénomène d'atténuation du signal précédemment mentionné s'accroît et qui sera souligné par une phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ qui demeurera caractéristiquement négative pour cette physiologie herbacée.

	<i>Typha latifolia</i>		<i>Phalaris arundinacea</i>	
	Biomasse aérienne (dressée)	productivité	Biomasse aérienne (dressée)	productivité
Date	g m ⁻²	g m ⁻² jour ⁻¹	g m ⁻²	g m ⁻² jour ⁻¹
16 mai	29.0	1.45	--	--
10 juin	278.1	9.96	815.5	18.12
15 juillet	1095.3	23.35	1091.5	7.89
15 août	1397.4	8.63	1136.4	1.18
16 septembre	1494.0	3.31	1352.7	8.32
21 octobre	1467	-0.76	--	--

Tableau 12.2-1: Biomasse aérienne totale (ABG) et productivité journalière du *Typha latifolia* et du *Phalaris arundinacea* pour un marais d'eau douce du Wisconsin (43°31'N, 88°25'W)

Source: Klopatek et Stearns (1978), table 4, p.324. Saison de croissance de 1972.

La Zizanie

Les différences des signatures saisonnières de la Zizanie par rapport au Phalaris (Figure 12.2-3) sont principalement attribuables à l'effet des substrats inondés dans les bas marais qui est le facteur ayant le plus d'influence sur la rétrodiffusion des physiologies végétales des milieux humides. Tel que mentionné, les signatures saisonnières de la Zizanie se rapprochent beaucoup plus celles du Typha. Il apparaît que tout regroupement d'espèces végétales en classes physiologiques devra aussi tenir compte de la distinction entre bas et hauts marais qui peut se faire par l'utilisation d'une image du printemps et d'une autre acquise l'été afin de délimiter le périmètre d'inondation. Il s'agit ici d'une limitation de notre approche qui impliquera éventuellement la création de sous-classes physiologiques qui seront dépendante de la qualité (précision) de la distinction entre hauts et bas marais.

Tôt au printemps, à l'instar du Typha, la signature temporelle de la Zizanie est caractéristique d'une surface inondée avec peu ou pas de végétation émergente. L'augmentation de α_{s1} et α_{sg} , comme pour le Typha, correspond à l'émergence des nouvelles tiges et à l'interaction tiges/eau mais qui n'est cependant pas suffisamment forte pour produire une rétrodiffusion dominante de type double-bond. Dans le cas du Lac Saint-Pierre, la croissance de la Zizanie apparaît être décalée par rapport à celle du Typha pour la période approximativement comprise entre le 25 avril et le 20 juin. Cela se remarque par α_{s1} et α_{sg} moyens plus faibles que ceux du Typha le 21 mai (Figure 12.2-1-A vs Figure 12.2-3-A)

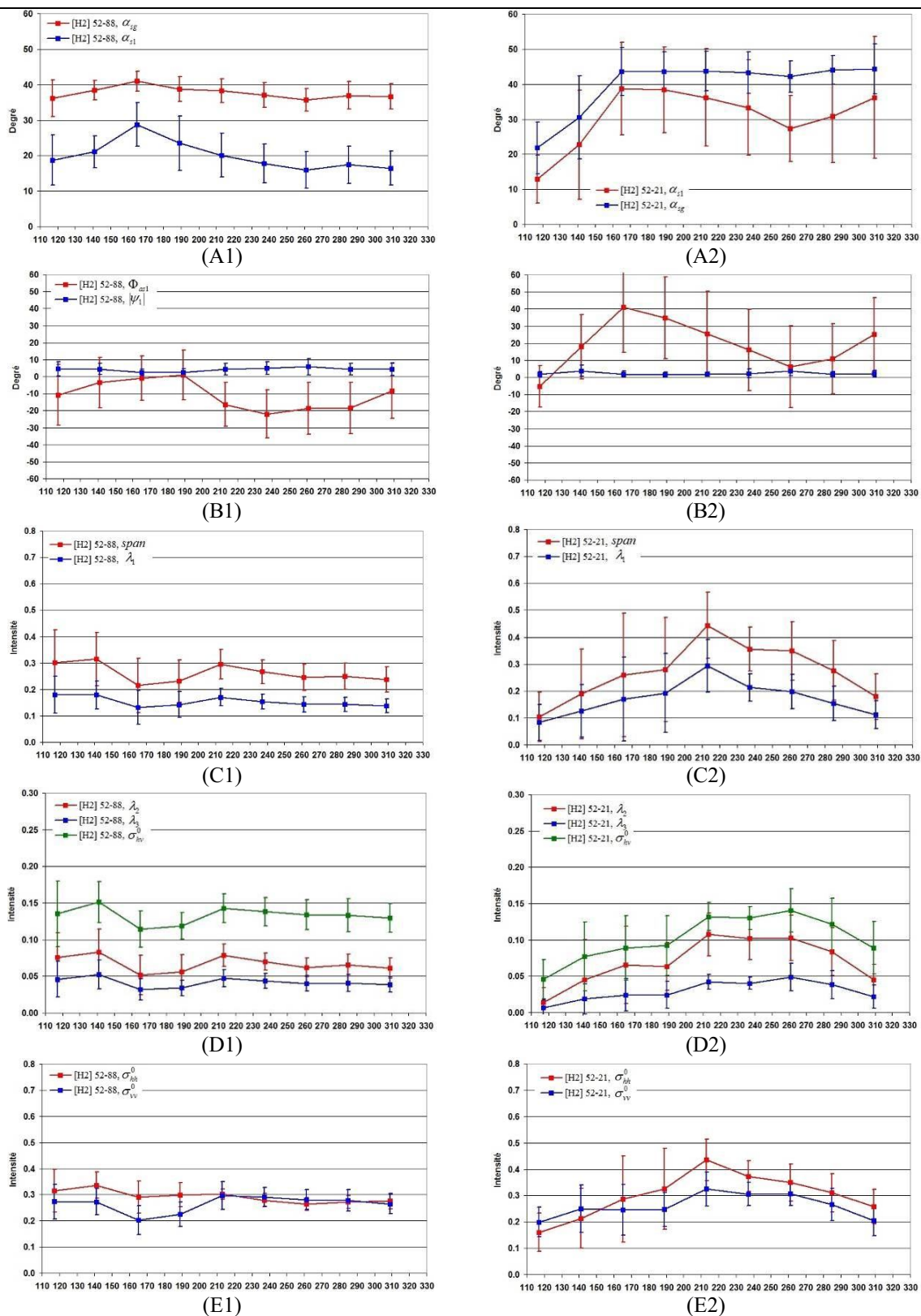


Figure 12.2-3 : Signatures saisonnières du *Phalaris* (*Phalaris arundinacea*) [H2-88] (colonne de gauche) et de la *Zizanie* (*Zizania sp.*) [H2-21] (colonne de droite); série FQ15-A

Cette transition marquée à la fin juillet entre une biomasse constituée de tiges vers une influence croissante de la biomasse foliaire (cf. §9.2.2) correspond exactement à la position temporelle des maximums observés le 1^{er} août pour le *span*, λ_1 , σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 (Figure 12.2-3, C2 et E2). Comme mentionné, le déclin de la portion polarisée (ou cohérente) du signal (dans ce cas l'interaction tiges/eau) s'accompagne d'une diminution de la puissance rétrodiffusée même si la biomasse augmente. À l'inverse, comme pour le Typha, la rétrodiffusion de σ_{hv}^0 , λ_2 et λ_3 augmente ou se maintient suivant l'augmentation de la rétrodiffusion multiple ou volumique attribuable au développement de la biomasse foliaire.

12.2.2.2. *Milieus secs*

Les signatures saisonnières du Blé [3-3] et du Foin [1-1] (Figure 12.2-4) montrent que malgré leurs différences par rapport à celles du Phalaris (Figure 12.2-3), leur évolution suit un pattern qui s'apparente beaucoup ce dernier qu'à ceux, par exemple du Typha (Figure 12.2-1) ou du Maïs (Figure 12.2-2). En ce sens, le regroupement physiologique proposé tient la route.

L'évolution temporelle du blé et la modélisation et l'effet de ses différents stades phénologiques sur le signal radar a fait l'objet de nombreuses publications (Macelloni et *al.*, 2001; Brown et *al.*, 2003; Picard et *al.*, 2003, Mattia et *al.*, 2003). Parmi les conclusions d'intérêt pour notre analyse on note que : a) à 23° d'angle d'incidence, la rétrodiffusion est dominée par des phénomènes d'atténuation du signal par le sol pour VV et par le sol et les feuilles pour σ_{hh}^0 . Après l'épiaison du blé l'atténuation du signal par les épis s'ajoute aux polarisations σ_{vv}^0 et σ_{hh}^0 ; b) à 40° d'angle d'incidence, un phénomène d'atténuation par le sol est toujours présent, mais une rétrodiffusion par les feuilles est observée pour σ_{vv}^0 et σ_{hh}^0 et s'ajoute pour σ_{hh}^0 à un mécanisme d'interaction tige/sol. Après l'épiaison l'influence du sol est réduite pour σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 et un mécanisme d'interaction tige/sol accompagné d'une rétrodiffusion par les feuilles se maintient pour σ_{hh}^0 et apparaît pour σ_{vv}^0 . Il faut cependant mentionner que ces études ont été réalisées pour la plupart avec des données à haute résolution spatiale acquises avec des diffusiomètres.

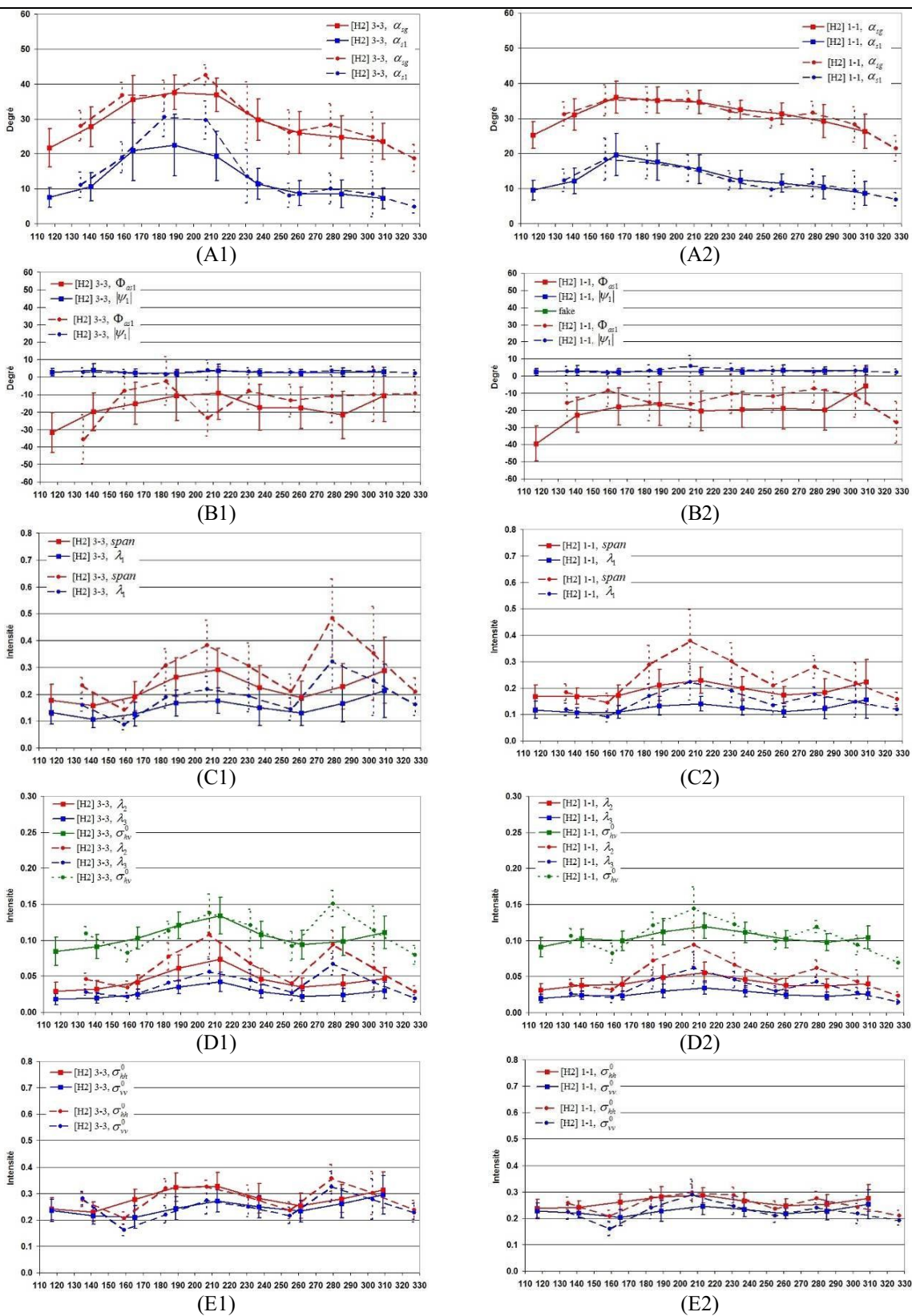


Figure 12.2-4 : Signatures saisonnières du Blé [H2, 3-3] et du Foin [1-1]; série FQ15-A en trait plein, série FQ21-D en trait pointillé

À la résolution spatiale de RS2, les faibles biomasses du Blé et du Foin, en deçà du point de saturation de la bande C pour l'ensemble de la saison de croissance (Tableau 12.2-2), et l'absence d'inondation fait en sorte que l'évolution temporelle de HH et VV est limitée. Pour le blé, l'évolution temporelle de σ_{hh}^0 et σ_{hh}^0 est très limitée, restant dans une fourchette comprise entre -14.0 et -9.0dB même en tenant compte de l'écart-type (Figure 12.2-4-E). Cette dernière observation confirme qu'une rugosité/humidité de surface peut produire une rétrodiffusion aussi forte qu'une biomasse qui atténue le signal incident (cf §10.1). L'effet des conditions météorologiques sur les signatures temporelles du blé et du foin, déjà noté pour le maïs, notamment les deux creux observables sur les paramètres d'intensité, correspondant à deux acquisitions en conditions sèches.

Régions		2006	2007	2008	2009	2010
Montérégie Sud-ouest (FQ15-A)	Blé	3.18	3.24	3.22	3.17	3.6
	Maïs grain	7.86	9.61	9.33	8.57	9.97
	Soya	2.82	2.74	2.97	2.57	3.29
Cœur du Québec (FQ15-A)	Blé	2.22	3.10	2.83	2.57	3.45
	Maïs grain	5.84	8.69	6.84	5.35	8.19
	Soya	2.47	2.66	2.48	1.71	2.86
Mauricie et Capitale nationale (FQ21-D)	Blé	2.57	3.24	2.17	2.53	2.91
	Maïs grain	--	--	6.57	6.48	8.72
	Soya	--	--	2.24	1.86	2.9
Note : ÷ 10 pour obtenir un rendement en kg m ⁻²						

Tableau 12.2-2 : Rendements annuels (t / ha) pour quelques grandes cultures du Québec

Sources : 1) Institut de la statistique du Québec, rendements des grandes cultures, années 2006 à 2010.

URL : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/culture/culture/index.htm

2) La Financière Agricole du Québec, Rendements réels pour les années 1995 à 2010.

URL : http://www.fadq.qc.ca/statistiques_et_taux/statistiques/assurance_recolte/rendements_reels.html

On remarque également pour le blé mais surtout pour le foin qu'il existe un maximum en intensité pour la quatrième acquisition de la série FQ21 (le 26 juillet). Cette acquisition s'est réalisée en conditions très humides où plus de 16 mm de précipitation durant l'acquisition se sont ajoutées aux 17 mm ayant survenus dans les deux journées précédentes²⁷. Le *span* ainsi que λ_1 , λ_2 , σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 ont tous été affectés par l'effet des conditions humides, ce qui pourrait être confondu avec celui d'un stade phénologique par exemple. Pour le foin, on remarque également que les paramètres λ_3 et σ_{hv}^0 sont aussi affectés par cette augmentation en

²⁷ Un graphique représentant les conditions météorologiques du 26 juillet est présenté à la figure 16.2-2-D3.

radiométrie (Figure 12.2-4-D) et seuls les paramètres α_{s1} et α_{sg} (Figure 12.2-4-A) se montrent résistants face à cet effet d'humidité. Un deuxième "pic" est d'ailleurs observable sur l'acquisition du 6 octobre de la série FQ21 également réalisée en conditions humides (Figure 12.2-4). Cela souligne encore une fois l'importance de la polarimétrie radar non pas tant par la réduction de l'impact de ces effets environnementaux mais surtout par l'identification de leur présence.

Le cas du Blé est plus complexe. Cet effet de l'humidité, aussi visible sur α_{s1} et α_{sg} (Figure 12.2-4-A), se superpose peut-être à l'effet d'un stade phénologique. Néanmoins, les caractéristiques de cette physionomie herbacée (incluant le Phalaris) mènent à l'atténuation du signal observable par une phase $\Phi_{\alpha s1}$ négative et une diminution de la puissance rétrodiffusée à partir de la fin du mois de juillet.

12.2.3. Physionomies herbacées moyennes [h1]

La classe physiologique [h1] regroupe l'Éléocharide des marais et trois espèces de Scirpe (Figure 12.2-5) Cette classe physiologique des bas marais se distingue surtout par une biomasse aérienne composée principalement de tiges dressées de taille moyenne (≈ 1 m) pour lesquelles la biomasse foliaire est quasi absente ou limitée (cf. §9.2.3).

Trois facteurs sont importants à considérer sur la signature temporelle des physiologies de la classe [h1]. Il y a d'abord la zonation verticale²⁸ de ces espèces émergentes dans le bas marais. Au printemps la plupart des bas marais du lac Saint-Pierre sont complètement inondés. Ainsi plus un site se situe près de la limite du haut marais, plus rapidement il sera exondé, plus tôt émergera la végétation et plus dense elle aura tendance à être. Au contraire, les sites à la limite entre bas marais et eau peu profonde (ou libre) seront soit exondés tardivement ou demeureront inondés tout au long de l'année selon les conditions météorologiques de l'année concernée. La végétation sur ces sites aura tendance à être moins dense. Parmi les espèces incluses dans la classe [h1], le Scirpe des rivières [53-27] est celui qui occupe les sites les moins profonds. Elle est suivie du Scirpe américain [53-20] pour les sites de moyenne profondeur alors que l'Éléocharide [53-31] préfère les sites plus profonds (Auclair et *al.*, 1976,

²⁸ Voir la section 9.2 à ce sujet.

Hudon, 1997). Bien que la classe [h1] soit dans l'ensemble raisonnablement homogène, certaines différences physiologiques existent. Le Scirpe lacustre [53-26] possède le feuillage le plus abondant alors que le Scirpus américain [53-20] et l'Éléocharide [53-31] sont pratiquement dépourvu de biomasse foliaire.

L'émergence du Scirpe²⁹ débute environ un mois après celui du Typha mais contrairement à ce dernier, les signatures saisonnières du Scirpe (Figure 12.2-5) montrent que les premiers stades d'émergence, identifiés par α_{s1} et α_{sg} , ne s'accompagnent pas d'une augmentation des paramètres liés à la puissance rétrodiffusé ($span$, λ_1 , σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0). Pour l'ensemble des espèces de Scirpe, α_{s1} et α_{sg} augmentent graduellement entre le 20 mai et le 30 juillet alors que les paramètres d'intensité restent stables et en dessous de -18 dB au cours de la même période.

Après cette période de stabilité, le $span$, λ_1 , σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 augmentent brusquement entre la mi-mai et la fin juillet. Le $span$ atteint alors en moyenne -3.3dB, -3.3dB, -4.3dB, et -7.5dB respectivement pour l'Éléocharide, le Scirpe des rivières, le Scirpe américain, et le Scirpe des étangs (Figure 12.2-5-C). Pour l'ensemble des physiologies, à l'exception des marécages arborés tôt au printemps (voir plus loin), ce sont les plus fortes valeurs observées du $span$ et du λ_1 . Ainsi la simplicité de cette physiologie et l'absence de feuillage compensent sa petite section efficace radar (comparativement au Typha ou aux physiologies arborés) et contribuent à maintenir élevée la puissance du signal rétrodiffusé.

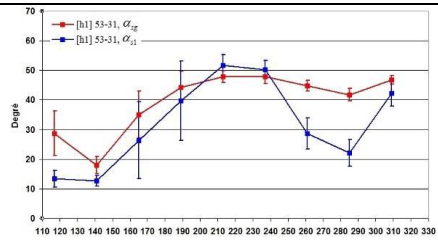
La simplicité de la structure des espèces de la classe [h1] par rapport à celle de la classe [H1] a aussi contribué à produire de plus fortes valeurs pour α_{s1} et α_{sg} qui, en moyenne, ont dépassées 50° vers la fin juillet (Figure 12.2-5-A). Cette tendance vers la rétrodiffusion double-bond est également soulignée par la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$ qui dépasse 50°, ce qui n'est pas observable avec les autres classes physiologiques examinées jusqu'ici.

Les espèces de la classe physiologique [h1] forment un groupe très homogène et peu de différences entre les diverses signatures saisonnières sont notées. Seul le Scirpe des rivières

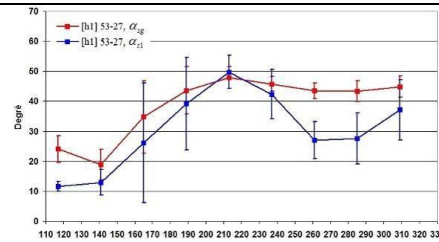
²⁹ Sauf mention contraire, le Scirpe inclut l'Éléocharide dans cette discussion.

diffère un peu où un "pic maximal" est noté pour α_{s1} , α_{sg} et $\Phi_{\alpha s1}$ le 30 juillet contrairement à un plateau entre le 30 juillet et le 25 août pour les autres espèces de la classe [h1] (Figure 12.2-5). Il n'a cependant pas été possible de rattacher cette différence à une caractéristique spécifique du Scirpe des rivières. Un examen de la répartition spatiale des objets sélectionnés par rapport aux images Ikonos de 2002, desquelles est issue la classification du Centre-Saint-Laurent, ne montre pas un lien fort entre la profondeur (jugée par l'éloignement du rivage) et la répartition des classes de la physionomie [h1]. Par exemple, les sites de Scirpe des rivières se retrouvent en majorité sur des sites peu profonds conformément à ce qui est décrit par la littérature. Tout autant le Scirpe américain que le Scirpe lacustre ou l'Éléocharide se répartissent sur différents niveaux de profondeur alors qu'en théorie le Scirpe américain et surtout l'Éléocharide devraient occuper les sites plus profonds.

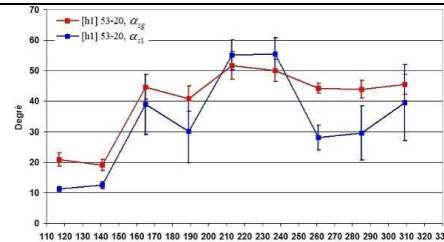
Une caractéristique particulière de la classe [h1], contrairement aux autres classes physionomiques examinées jusqu'ici, concerne les valeurs élevées en dB de λ_2 qui approchent et dépassent même parfois celles de σ_{hv}^0 (Figure 12.2-5-D). La seconde composante est surtout significative entre le début juillet et la mi-septembre, période durant la valeur moyenne α_{s1} décline alors que α_{sg} se maintient. Contrairement au Typha ([H1]) ou au Phalaris ([H2]), il ne s'agit pas ici de l'influence de la composante volumique comme en témoigne la puissance de λ_2 et λ_3 (Figure 12.2-5-D). La croissance du Scirpe (taille et densité) associée à un substrat toujours accessible par le signal radar créerait une "compétition" entre la composante double-bond et celle de surface qui tournerait progressivement à l'avantage de cette dernière vers la fin de la saison de croissance et à l'automne lors de l'exondation des bas marais tel que noté par la décroissance de $\Phi_{\alpha s1}$ vers zéro qui s'amorce vers la fin juillet. Une dernière observation concerne l'angle d'orientation $|\psi_1|$. Cet angle présente des valeurs (relativement) élevées pour le Scirpe américain (Figure 12.2-5-D) vers la fin septembre/début octobre et montre une sensibilité à l'orientation des marais par rapport au LOS. Ce phénomène s'observe cependant mieux par une analyse à l'échelle de l'objet dont il sera question à la section 12.3.



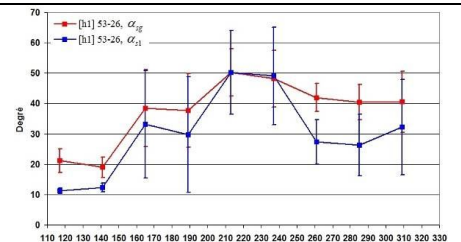
(A1)



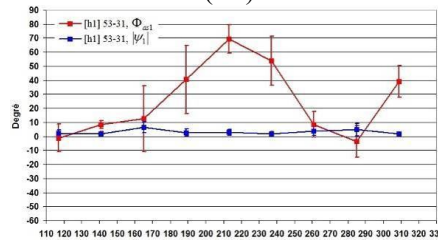
(A2)



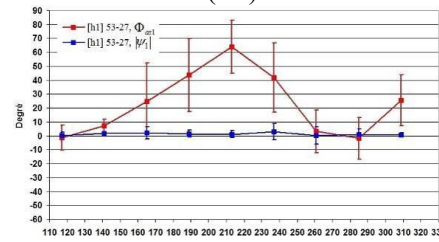
(A3)



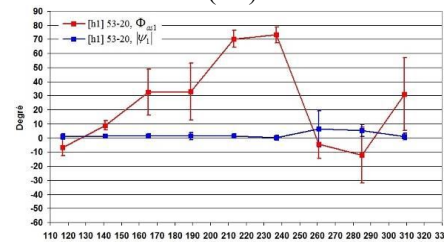
(A4)



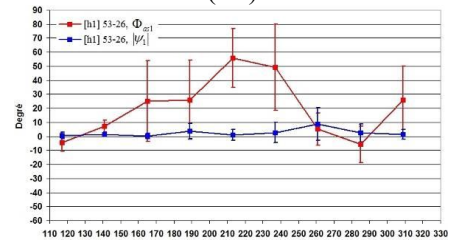
(B1)



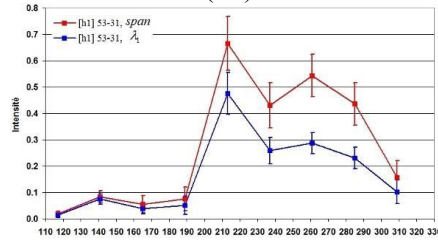
(B2)



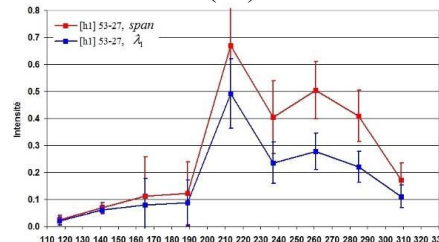
(B3)



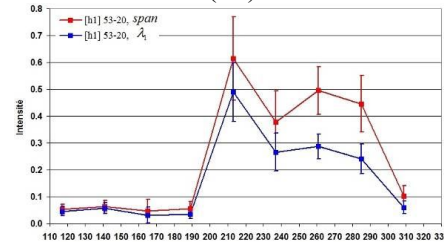
(B4)



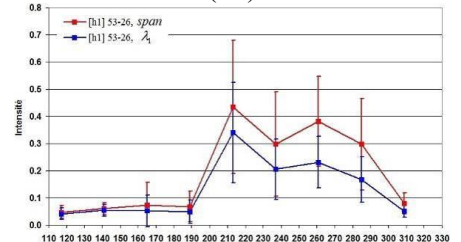
(C1)



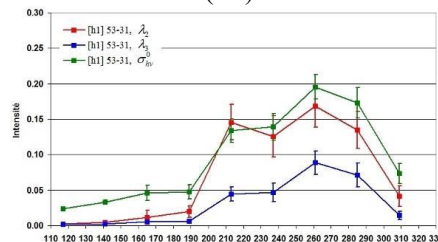
(C2)



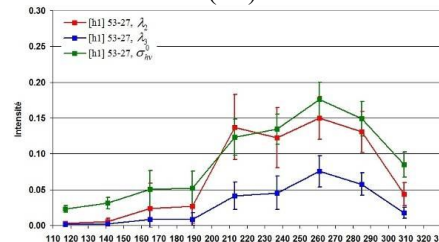
(C3)



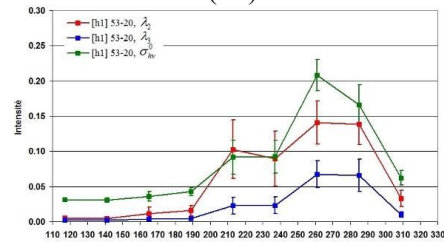
(C4)



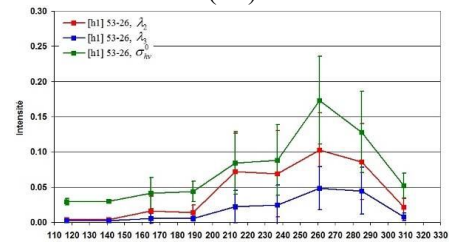
(D1)



(D2)



(D3)



(D4)

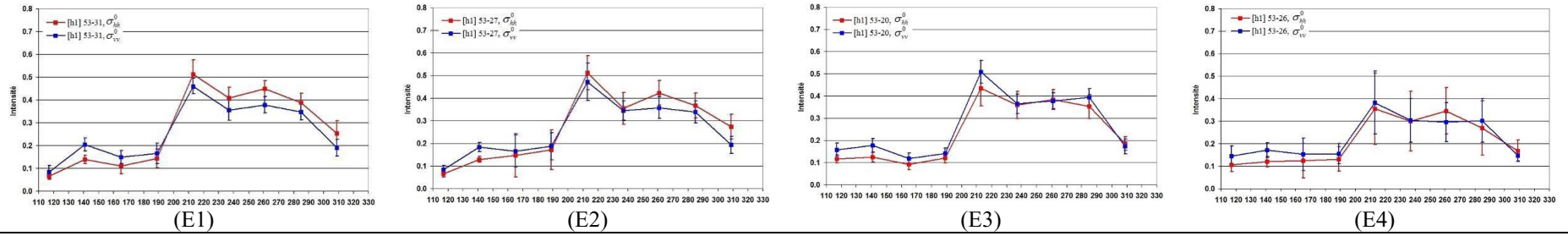


Figure 12.2-5 : Signatures temporelles de : Eleocharis [h1-31] (1^{ère} col.), Scirpe des rivières [h1-27] (2^e col.), Scirpe américain [h1-20] (3^e col.), Scirpe des étangs [h1-26] (4^e col.). Série FQ15-A.

12.3. Physionomies arborées et arbustives des marécages et des milieux secs : signatures temporelles

L'ensemble des objets utilisés pour établir les signatures saisonnières des physionomies végétales (196 objets pour FQ15 et 1348 pour FQ21) ont montré une grande homogénéité malgré le fait que plusieurs classes de densité/hauteur étaient divisées en peuplement de feuillus, conifères ou mixte. Bien que l'arsenal complet des analyses statistiques n'ait pas été déployé, il n'a pas été possible de trouver de relations, même faibles, entre ces classes et les divers paramètres.

Les signatures saisonnières des physionomies arborées [A1] et arbustives [A2] des marécages sont relativement simples. L'élément le plus caractéristique de ces signatures est la présence d'une composante double-bond tôt au printemps, lorsque le niveau de l'eau est élevé. Cela est notée autant par α_{s1} et α_{sg} que par l'ensemble des paramètres liés à la puissance rétrodiffusée (Figure 12.3-1). Cette composante double-bond n'est cependant pas suffisamment dominante pour permettre à α_{s1} (ou α_{sg}) de tendre vers les 90° (comme cela fut observé avec ALOS) et il en résulte une rétrodiffusion dipolaire (30° à 45°). Dès la deuxième acquisition de la série FQ15 (21 mai) ou lors de la première acquisition de la série FQ21 (15 mai) la baisse du niveau de l'eau (ou l'assèchement des substrats) a été suffisante (passage de 168 à 137cm, Figure 12.1-2) pour que la puissance rétrodiffusée diminue de même que α_{s1} et α_{sg} . Par la suite l'ensemble des paramètres décroissent lentement jusqu'à la fin de l'automne. La saturation et la dépolarisation du signal est mise aussi en évidence par les écarts types qui sont faibles comparativement aux physionomies des marais ([H1], [H2] et [h1]).

Les signatures temporelles des physionomies arbustives des marécages suivent exactement les mêmes tendances que celles des marécages arborés ([A1]). Cela a été aussi observé avec les données ALOS (cf. §10, §11.1) où marécages arborées et arbustifs sont difficiles à dissocier.

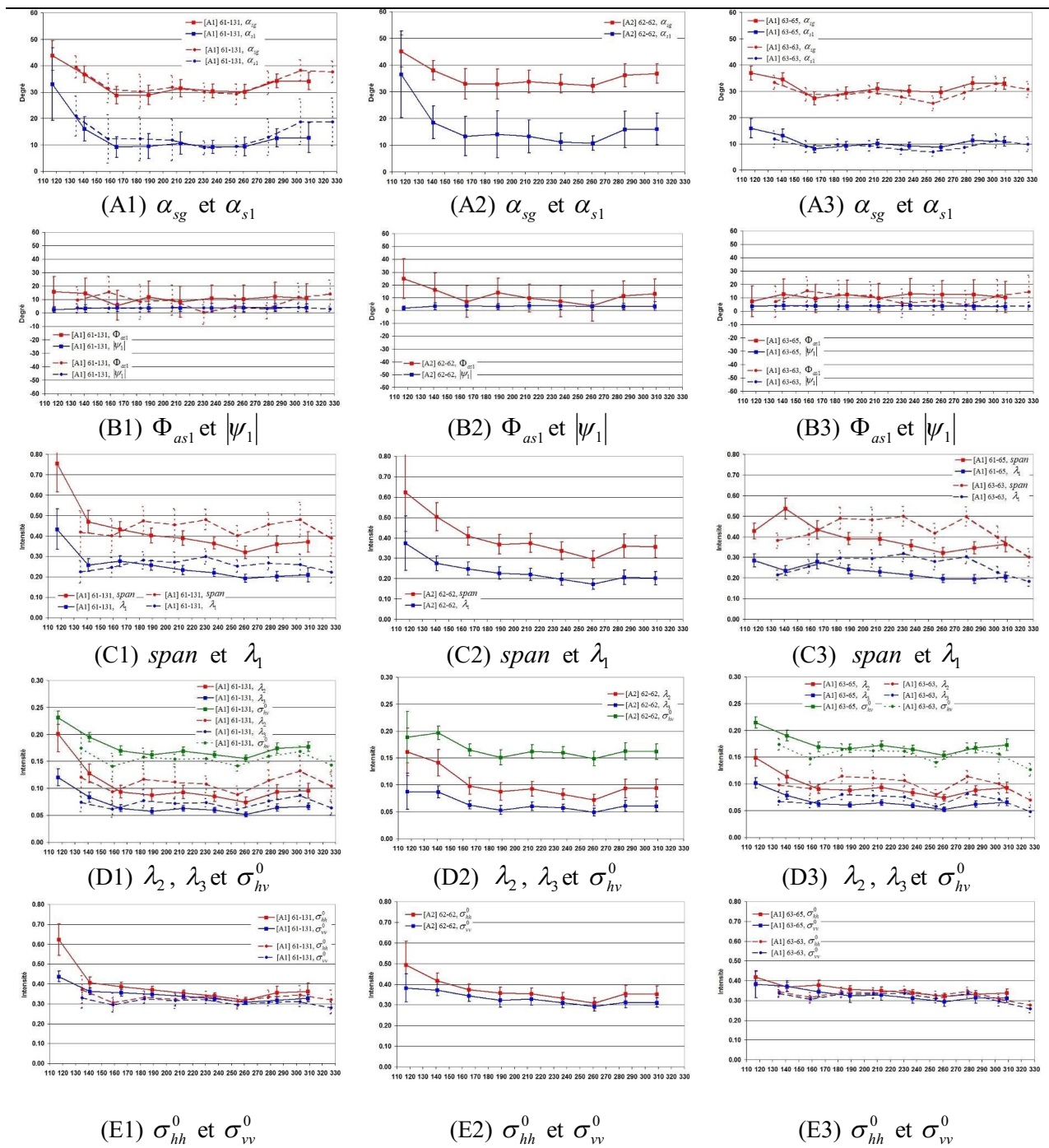


Figure 12.3-1 : Signatures saisonnières des marécages arborés [A1-131] (1^{ère} col.); marécages arbustifs [A2-62] (2^e col.) et des physionomies arborées sur substrat sec [A1-63&65] (3^e col.). Séries FQ15-A (trait plein) et FQ21-D (trait pointillé)

Les physionomies arborées des milieux secs présentent également des signatures saisonnières similaires à celles des marécages (Figure 12.3-1). De fortes valeurs pour l'ensemble des

paramètres sont observées au début du printemps et décroissent par la suite à mesure que le signal sature par une augmentation de la biomasse foliaire. On remarque que la présence de la composante double-bond a eu une influence suffisamment forte sur le signal rétrodiffusé pour entraîner également σ_{hv}^0 à la hausse (Figure 12.3-1-D3). La discrimination entre les marécages et les forêts sur substrat sec vers la fin avril n'est pas possible avec σ_{hv}^0 et elle doit plutôt, selon la situation présente, reposer sur α_{s1} . Cela confirme les observations de la section 11.1, à savoir, que la détection optimale des marécages repose sur différents paramètres selon la saison. Notons que le seul élément notable dans les signatures de cette physionomie concerne l'acquisition du 12 septembre de la série temporelle FQ21 réalisée en conditions sèches. A cette date, autant le type de rétrodiffusion que les paramètres liés à l'intensité (incluant σ_{hv}^0 et λ_3) présentent leurs plus faibles valeurs.

Les seules sous-classes de physionomie aborée sur substrat sec ayant pu être identifiées l'ont été pour l'image RS2 FQ21-D du 12 septembre et attribuables à un effet des conditions météorologiques. Si l'ensemble des objets de cette classe ([A1-61]) ont connus des changements, certaines régions du massif forestier entourant la Baie des Mines se sont démarquées plus que les autres le 12 septembre (Figure 12.3-2). Ces régions ont été délimitées par une interprétation manuelle et les objets de la classe [A1-61] divisés en deux sous-classes soit :

- i. La sous-classe [A1-61-63] correspondant aux objets ayant le moins changés (n=1181);
- ii. La sous-classe [A1-61-64] identifiée par photo-interprétation et correspondant aux objets ayant le plus changés le 12 septembre (n=159);

Pour la classe [A1-61-64], les conditions sèches du 12 septembre ont favorisé une pénétration du signal plus profondément dans la canopée. Il en a résulté un α_{s1} moyen plus élevé pour cette classe que pour la classe [A1-61-63] ($\approx \alpha_{s1} < 10^\circ$) où la source de la rétrodiffusion provient de la portion supérieure de la canopée. Cette pénétration accrue du signal dans la canopée des objets de la classe [A1-61-64] a causé une atténuation du signal résultant en des valeurs plus faibles pour λ_1 , le *span*, σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 . Cette pénétration accrue du signal n'a cependant pas résulté en une augmentation de la composante volumique (ou multiple) comme en témoigne les paramètres σ_{hv}^0 et λ_3 qui sont les seuls (avec Φ_{as1}) à ne pas présenter une séparation entre

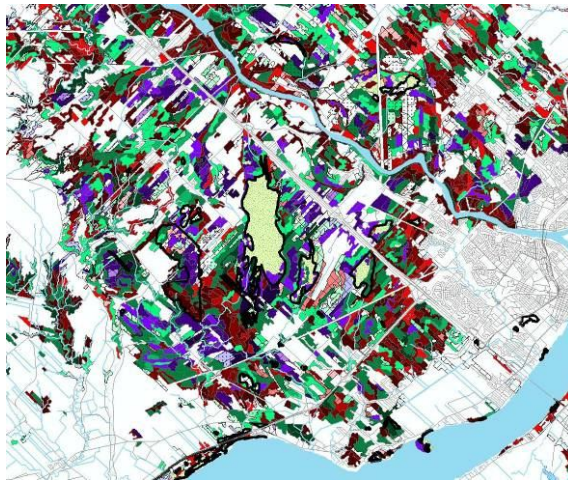
les classes [A1-61-63] et [A1-61-64]. Ce n'est qu'avec les valeurs propres normalisées que l'on remarque que la troisième composante est plus importante (proportionnellement) pour la classe [A1-61-64]. C'est donc dire que la pénétration accrue du signal dans la canopée n'a pas modifiée la composante volumique (ou multiple) du signal mais seulement diminué la dominance de la première composante.



(A) 12 septembre 2009 (R: σ_{hh}^0 , G: σ_{hv}^0 , B: σ_{vv}^0)



(B) 23 novembre 2009 (R: σ_{hh}^0 , G: σ_{hv}^0 , B: σ_{vv}^0)



(C) Carte écoforestière du Québec

Classes de Densité Hauteur		Feuil- lus	Mixt- es	Conifè- res	Densité (%)	Hauteur (m)
A1	A2	■	■	■	60 à	≥17
B1	B2				100	
A3	A4	■	■	■	60 à	7 à 17
B3	B4				100	
C1	C2	■	■	■	25 à 60	≥17
D1	D2					
C3	C4	■	■	■	25 à 60	7 à 17
D3	D4					
A5	A6	■	■	■	60 à	2 à 7
B5	B6				100	
C5	C6	■	■	■	25 à 60	2 à 7
D5	D6					

(D) Légende

Note : La classe [A1-61-64] est identifiable par des teintes verdâtres (A) et délimitée par des traits noirs (A et B).

Figure 12.3-2 : Évolution temporelle des physionomies arborées sur substrat sec, série FQ21-D

12.4. Physionomies végétales des tourbières : signatures temporelles

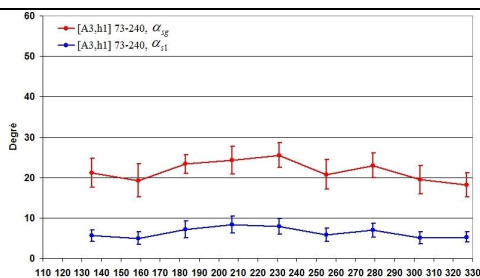
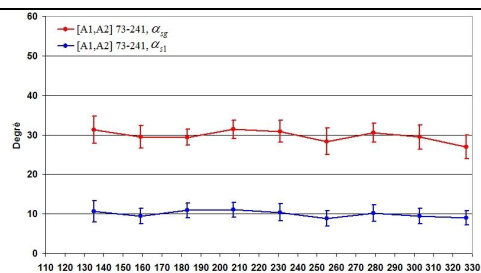
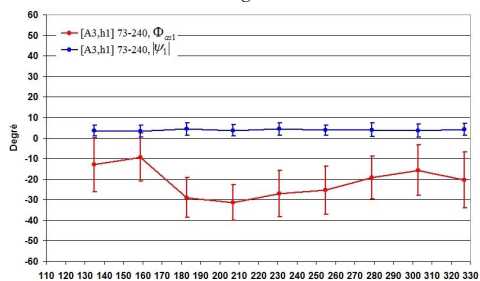
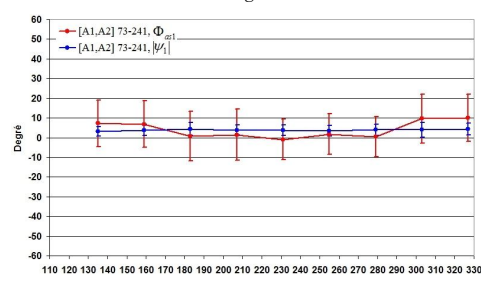
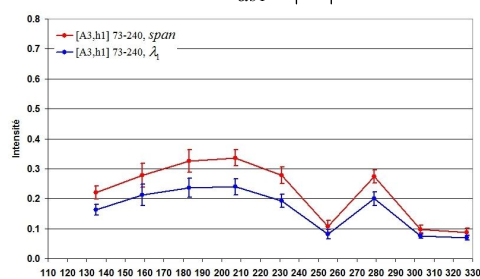
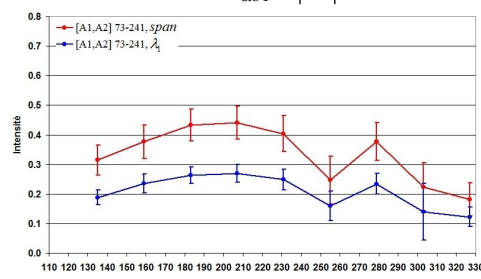
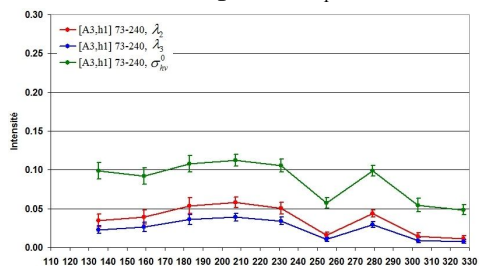
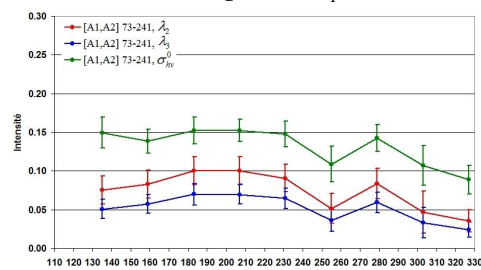
12.4.1. Tourbières ouvertes [A3, h1] vs tourbières boisées [A1, A2]

Les signatures saisonnières des tourbières ouvertes et boisées partagent beaucoup de similitudes quant à leur évolution temporelle ne serait-ce que pour l'effet marqué de "l'acquisition sèche" du 18 septembre (Figure 12.4-1). Cette ressemblance s'étend également aux signatures des physionomies arborées (Figure 12.3-1). Plus en détail, des différences existent cependant entre les physionomies des tourbières ouvertes et celles des tourbières boisées dont :

- i. Des valeurs plus élevées de α_{s1} et α_{sg} pour les tourbières boisées causées par la présence de troncs et larges branches qui sont absents dans les tourbières ouvertes (Figure 12.4-1-A). La présence d'une composante dipolaire pour les tourbières boisées se confirme par le plus grand écart observé entre σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 comparativement aux tourbières ouvertes tout au long de la saison de croissance (Figure 12.4-1-D).
- ii. En puissance, les physionomies des tourbières boisées ont produit en moyenne des valeurs légèrement plus élevées pour σ_{hh}^0 , σ_{vv}^0 , λ_1 (Figure 12.4-1, C et E) et plus élevées pour le *span* (Figure 12.4-1-C) et ce pour l'ensemble des acquisitions de la série FQ-21. Contrairement à σ_{hh}^0 , σ_{vv}^0 et λ_1 , le *span* profite de la contribution de λ_3 qui est plus significative pour les tourbières boisées que les tourbières ouvertes (Figure 12.4-1-D).
- iii. La phase Φ_{cs1} offre également un contraste intéressant entre tourbières ouvertes et boisées. Alors que Φ_{cs1} évolue peu et reste en moyenne entre 0 et 10° pour les tourbières boisées, à l'instar de la phase des physionomies arborées (Figure 12.4-1-D), celle des tourbières ouvertes connaît une évolution temporelle intéressante mais restant toujours dans la portion négative à l'instar du Phalaris.

Même en tenant compte de l'écart-type, plusieurs paramètres permettent pour au moins une acquisition de la série temporelle de séparer les deux types de tourbière. Mais c'est avec le *span* que λ_3 (et σ_{hv}^0) que la séparabilité apparaît être la plus robuste et ce particulièrement pour la période comprise entre le début juillet et la mi-septembre. Aucune discrimination entre tourbières boisées et forêts sur substrat sec n'est possible, ce qui sera confirmé par l'analyse de

la séparabilité des classes (chapitre 13). Mentionnons finalement que la biomasse des arbrisseaux ([A3]) et des physionomies herbacées ([h1]) des secteurs de tourbières ouverte de la Baie des Mines influencent suffisamment le signal pour que ce dernier diffère de celui de la rétrodiffusion d'une surface peu rugueuse. Ceci sera également confirmé par l'analyse de la séparabilité des classes présentée au chapitre suivant.

(A1) α_{sg} et α_{s1} (A2) α_{sg} et α_{s1} (B1) $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et $|\psi_1|$ (B2) $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et $|\psi_1|$ (C1) $span$ et λ_1 (C2) $span$ et λ_1 (D1) λ_2 , λ_3 et σ_{hv}^0 (D2) λ_2 , λ_3 et σ_{hv}^0

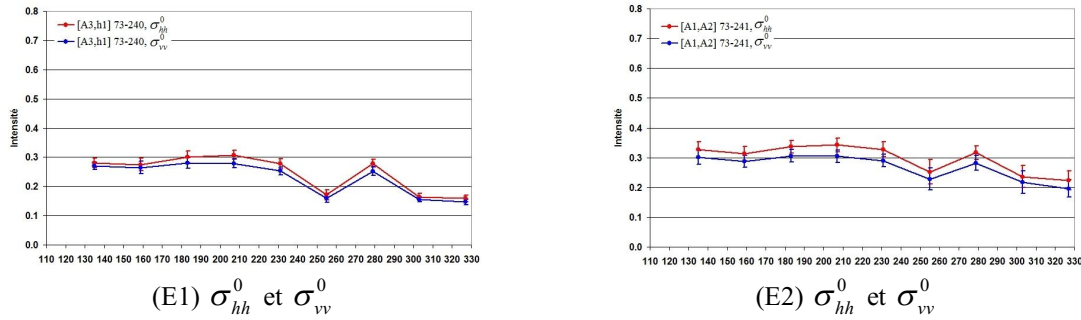


Figure 12.4-1 : Signatures saisonnières des tourbières ouvertes [A3, h1] (1^{ère} col.) et boisées [A1, A2] (2^e col.), série FQ21-D

12.4.2. Fens vs Bogs (série FQ21-D)

La section précédente a montré que les tourbières ouvertes sont séparables des tourbières boisées. Mais qu'en est-il de la distinction entre les physionomies [h1] herbacées et celles des [A3] arbrisseaux arborés et arbustives représentant respectivement les fens herbacées pauvres et les bogs à arbrisseaux (*shrub bog*)? Les objets (n=60) de la classe de tourbière ouverte ont été divisés en deux sous-classes selon leur appartenance aux Fens (n=12) ou aux Bogs (n=48). On s'attend ici à une capacité moindre de pénétration du signal dans le volume de la tourbe comparativement aux données ALOS. Les signatures saisonnières des bogs et des fens ne présentent pas de différences majeures, tout au plus notons :

- i. Un α_{s1} et α_{sg} légèrement supérieur pour les fens pour la première et de la dernière acquisition (Figure 12.4-2-A), fait qui pourrait être lié à une plus grande influence de l'eau en surface pour les physionomies herbacées;
- ii. Que le *span* est légèrement supérieur pour les fens au début et à la fin de la saison de croissance (Figure 12.4-2-C), effet que l'on peut lier à l'eau en surface;
- iii. Que c'est "l'acquisition sèche" du 12 septembre qui, encore une fois, est l'élément marquant de la majorité des signatures saisonnières. Cet effet est encore plus marqué pour les fens et les bogs comparativement aux tourbières boisées. Cela est attribuable à un λ_{3N} qui devient alors très faible pour les tourbières ouvertes alors que λ_{3N} se maintient pour les tourbières boisées à cause d'une biomasse plus élevée et de la présence des troncs. En l'absence de contribution de la troisième composante, le *span* des objets des fens et des bogs devient plus faible et presque équivalent à λ_1 (Tableau 12.4-1, Figure 12.4-2-D).

Les fens et les bogs feront l'objet d'une analyse détaillée à la partie VI traitant de l'hydrologie des tourbières.

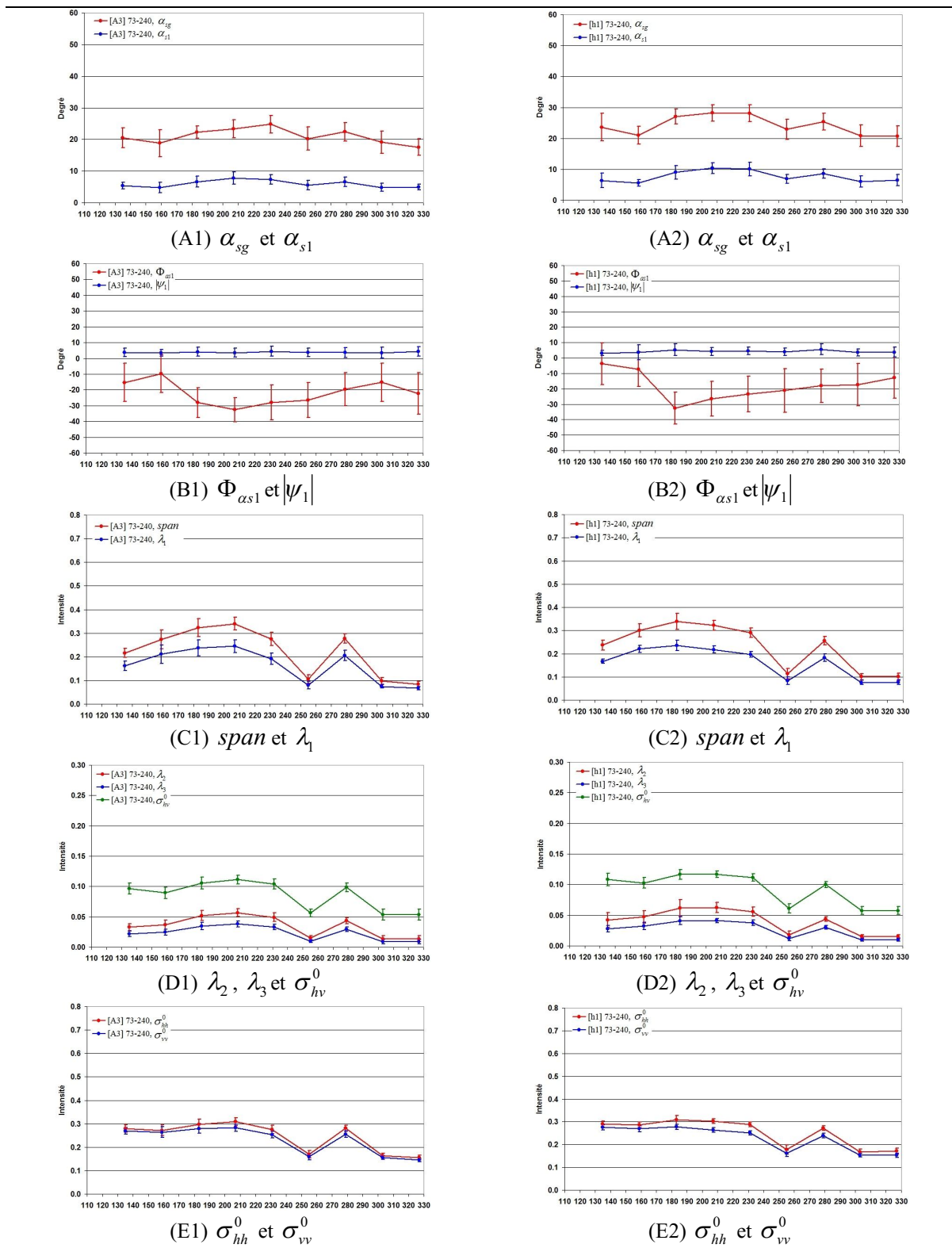


Figure 12.4-2 : Signatures saisonnières des Bogs à arbrisseaux [A3] (1^{ière} colonne) et des fens herbacés pauvres [h1] (2^e colonne), série FQ21-D

Date (j.j.)	15 mai (135)	8 juin (159)	2 juillet (183)	26 juil. (207)	19 août (231)	12 sept. (255)	6 oct. (279)	30 oct (303)	23 nov. (327)
A) [h1] T. Ouverte (fen),									
λ_{1N}	0.71±0.05	0.74±0.03	0.70±0.04	0.68±0.02	0.68±0.03	0.73±0.04	0.71±0.02	0.75±0.04	0.77±0.03
λ_{2N}	0.18±0.03	0.16±0.02	0.18±0.02	0.19±0.02	0.19±0.02	0.16±0.03	0.17±0.02	0.15±0.02	0.14±0.02
λ_{3N}	0.12±0.01	0.11±0.01	0.12±0.01	0.13±0.01	0.13±0.01	0.11±0.02	0.12±0.01	0.10±0.02	0.09±0.01
B) [A3] T. Ouverte (bog)									
λ_{1N}	0.75±0.05	0.77±0.05	0.73±0.04	0.72±0.03	0.70±0.03	0.76±0.05	0.74±0.04	0.77±0.05	0.80±0.03
λ_{2N}	0.15±0.03	0.14±0.03	0.16±0.02	0.17±0.02	0.18±0.02	0.14±0.03	0.16±0.02	0.14±0.03	0.12±0.02
λ_{3N}	0.10±0.02	0.09±0.02	0.11±0.02	0.11±0.02	0.12±0.01	0.09±0.02	0.11±0.02	0.09±0.02	0.08±0.01
C) [A1] [A2] T. Boisée									
λ_{1N}	0.60±0.04	0.63±0.03	0.61±0.03	0.62±0.03	0.62±0.03	0.65±0.04	0.62±0.03	0.63±0.04	0.68±0.03
λ_{2N}	0.24±0.02	0.22±0.02	0.23±0.02	0.23±0.02	0.22±0.02	0.21±0.02	0.22±0.02	0.22±0.02	0.19±0.02
λ_{3N}	0.16±0.02	0.15±0.01	0.16±0.02	0.16±0.01	0.16±0.01	0.14±0.02	0.16±0.01	0.15±0.02	0.13±0.01
D) SPAN									
Fen (dB)	0.24±0.02 (-12.4)	0.30±0.03 (-10.4)	0.34±0.03 (-9.4)	0.32±0.02 (-9.84)	0.29±0.02 (-10.7)	0.11±0.02 (-18.9)	0.26±0.02 (-11.8)	0.10±0.01 (-19.9)	0.10±0.01 (-19.9)
Bog (dB)	0.22±0.02 (-13.2)	0.27±0.04 (-11.2)	0.32±0.04 (-9.8)	0.34±0.03 (-9.38)	0.27±0.03 (-11.2)	0.11±0.02 (-19.5)	0.28±0.02 (-11.1)	0.10±0.01 (-20.2)	0.08±0.01 (-21.4)
T.B (dB)	0.31±0.05 (-10.1)	0.38±0.06 (-8.4)	0.43±0.05 (-7.2)	0.44±0.06 (-7.1)	0.40±0.06 (-7.8)	0.25±0.08 (-12.2)	0.38±0.06 (-8.4)	0.22±0.08 (-13.0)	0.18±0.06 (-14.8)

Tableau 12.4-1 : Valeurs propres normalisées et *span* des tourbières ouvertes et boisées, saison 2009, série FQ21-D

12.5. Physionomies végétales des marais et des marécages : analyse comparative par diffusiogrammes

Nous compléterons la description des physionomies végétales des marais et des marécages par une analyse du comportement des paramètres polarimétriques en se basant sur les objets à l'aide de diffusiogrammes. Les raisons derrière cette analyse consistent d'une part : 1) À mieux visualiser la dispersion des paramètres par classe physionomique; 2) À faire ressortir certains comportements polarimétriques qui s'exprimeraient à l'échelle de l'objet plutôt qu'à l'échelle de la physionomie et finalement; 3) À assurer une continuité avec certains points importants révélés par les analyses présentées au Chapitre 10 basée sur les données ALOS.

12.5.1. Relation entre le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) et sa phase

($\Phi_{\alpha s1}$)

Les données du 27 avril (Figure 12.5-1-A) montrent qu'il est possible d'utiliser α_{s1} pour discriminer les marécages arborés et arbustifs ([A1], [A2]) de la plupart des autres physionomies. La dispersion de ces classes est cependant forte sur l'axe α_{s1} (10 à 60°) et il y a confusion avec plusieurs objets appartenant à la classe de Typha ([H1-38]) et de Zizanie ([H2-21]). Pour obtenir une séparabilité totale des marécages il faudra utiliser d'autres paramètres, notamment ceux relatifs à la puissance rétrodiffusée ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ et le *span*). Dès que le niveau d'eau s'abaisse, les marécages forment une classe compacte montrant peu de dispersion mais se confondent totalement avec les physionomies arborées et arbustives des milieux secs (non représentées à la Figure 12.5-1). Le rôle joué par la phase $\Phi_{\alpha s1}$ dans la séparabilité des classes est aussi visible le 27 avril ou les bas marais sont inondés et la plupart des champs à nu. Les objets des bas marais ([H1] et [h1]) forment un groupe compact correspondant à une rétrodiffusion de surface (de l'eau libre) pour laquelle $\alpha_{s1} \approx 10^\circ$ et $\Phi_{\alpha s1}$ est compris entre 5° et -15°. Les physionomies des champs se distinguent bien grâce à un α_{s1} plus faible (<10°) mais la phase $\Phi_{\alpha s1}$ est également nécessaire pour distinguer une bonne partie des objets de foin ([h1-1]) et de blé ([H2-1]). On reconnaît d'ailleurs ce pattern caractéristique des sols dénudés ou recouverts de faibles biomasses tel qu'observé avec les données ALOS où $\Phi_{\alpha s1}$ variait fortement (entre 0° et -90°) et était accompagné d'un α_{s1} très faible. Notons également la position du Phalaris ([H2-88]) dans l'espace $\alpha_{s1} - \Phi_{\alpha s1}$ (Figure 12.5-1-A) qui correspond approximativement à ce qui a été observé avec les données ALOS (cf. §11.1, classe c171).

En ce qui concerne les cultures agricoles, la Figure 12.5-1 montre l'importance de disposer d'une image acquise tôt au printemps (27 avril (A) ou 21 mai (B)) pour faciliter la discrimination entre ces milieux et les milieux humides. Dès la mi-juin (C), les objets foin ([h1-1]) et blé ([H2-1]) se dispersent dans l'espace $\alpha_{s1} - \Phi_{\alpha s1}$ pour se confondre avec les physionomies herbacées [h1], qui amorcent leur croissance, et le Phalaris ([H2-88]). Dès la mi-août et jusqu'en novembre le maïs ([H1-2]) se confond avec les bas marais à Scirpes [h1]

et à Typha ([H1-38]) quoique la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$, contrairement à α_{s1} , permet une distinction partielle entre ces derniers. En termes de classes, les données du 1^{er} (F) et du 25 août (F) sont les meilleures pour la classification des grands types physiologiques des bas marais. À cette date la dispersion intraclasse est réduite à son minimum (notamment pour le Typha) alors que la distance interclasses entre [H1] et [h1] est à son maximum.

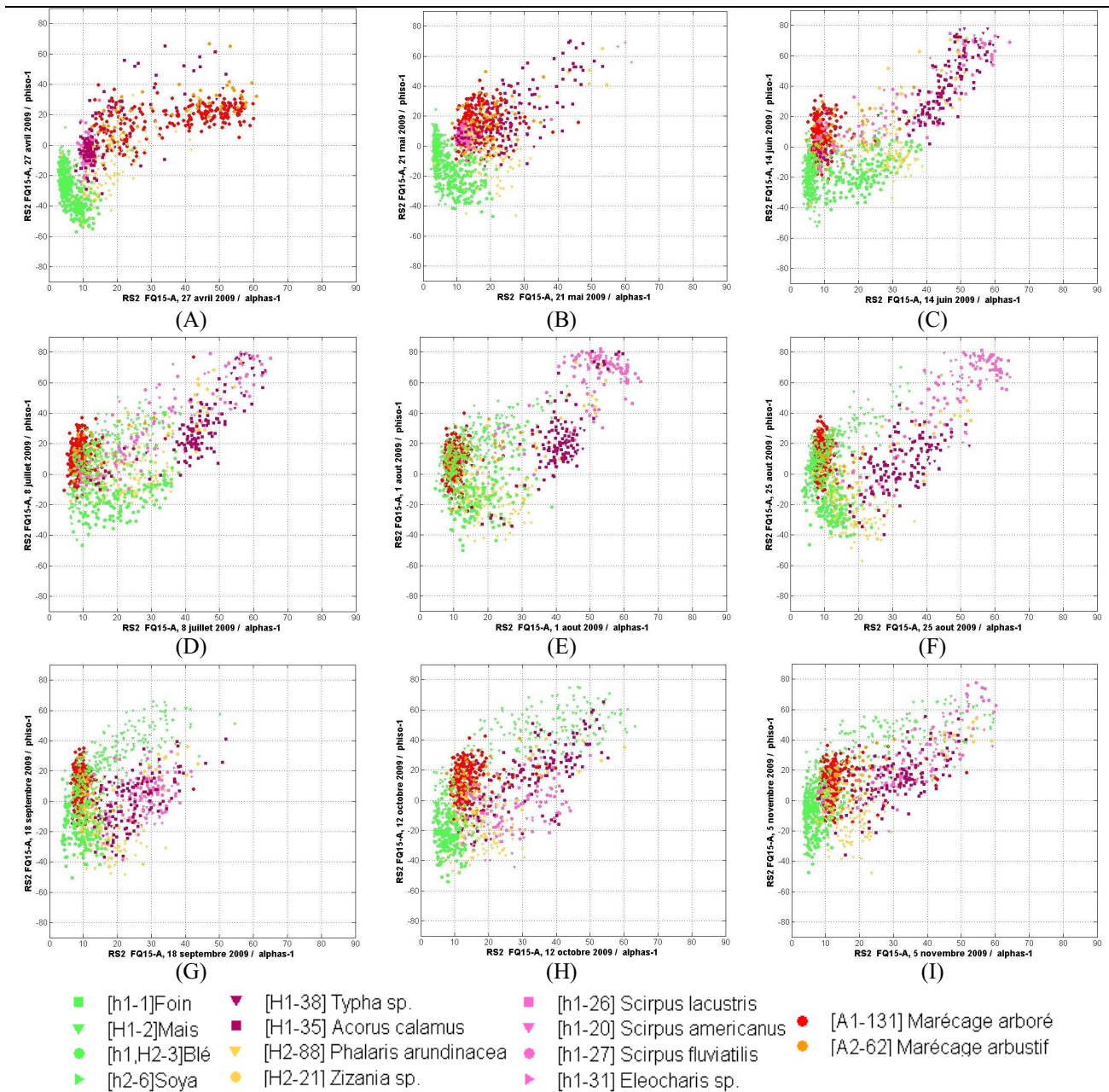


Figure 12.5-1 : Évolution temporelle des physiologies végétales des marais et des milieux secs pour α_{s1} et $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (série FQ15-A)

Comme mentionné aux chapitres 10 et 11, l'espace $\alpha_{s1} - \Phi_{\alpha s1}$ représente le point de départ pour la description de la structure des physionomies végétales mais ne contient pas l'ensemble de l'information disponible à leur sujet. Il est nécessaire d'étendre l'analyse aux autres paramètres de la composante dominante de rétrodiffusion ($\tau_1, \psi_1, \lambda_{1N} \dots$) ainsi qu'aux paramètres de la seconde et troisième composante.

12.5.2. Relation entre l'anisotropie (A) et λ_{1N}

L'anisotropie permet une évaluation rapide de la pertinence de considérer l'apport des deuxièmes et troisièmes composantes de la décomposition de Touzi. Les analyses conduites avec les données ALOS ont montré que l'anisotropie seule n'est pas un paramètre fiable pour déceler les objets présentant un second mécanisme de rétrodiffusion significatif (cf. §10.4). Une façon appropriée pour détecter la présence de ces objets est de construire le diffusiogramme entre la première valeur propre normalisée (λ_{1N}) et l'Anisotropie (A). Ainsi, les objets présentant à la fois une forte Anisotropie et une valeur moyenne de λ_{1N} (≈ 0.65 à 0.80) sont ceux où un second mécanisme de rétrodiffusion significatif est présent.

En fixant un seuil (arbitraire) de $A > 0.3$ au-delà duquel la présence d'un second mécanisme significatif de rétrodiffusion est probable, on remarque que les cultures se distinguent des objets des marais par leur faible Anisotropie pour les deux premières acquisitions le 27 avril et le 21 mai (Figure 12.5-2, A et B). Ceci est attribuable à une contribution plus ou moins équivalente des deuxièmes et troisièmes valeurs propres ($\lambda_{2N} \approx \lambda_{3N}$) ce qui contraste, pour la même période, avec :

- i. L'absence de dominance de la première valeur propre ($\lambda_{1N} \approx \lambda_{2N} \approx \lambda_{3N}$) pour les marécages arborés et arbustifs ([A1], [A2]) qui résulte en une Anisotropie équivalente à celle des cultures;
- ii. L'absence d'une contribution forte de la troisième composante pour les objets des marais ($\lambda_{2N} \gg \lambda_{3N}$) résultant en une Anisotropie élevée.

Ce n'est qu'à la mi-juin que les physionomies herbacées hautes [H1] présentent une combinaison de deux mécanismes de rétrodiffusion qui se maintiendront jusqu'à la fin août

(Figure 12.5-2, C à F) et que l'on peut interpréter, à l'aide de $\Phi_{\alpha s 1}$, comme le mélange d'une rétrodiffusion double blond tige-eau et d'une rétrodiffusion en bond impair (tige, tige-eau-tige). La même interprétation s'applique aux espèces de Scirpes entre le début juillet et jusqu'en Octobre Figure 12.5-2, C à F).

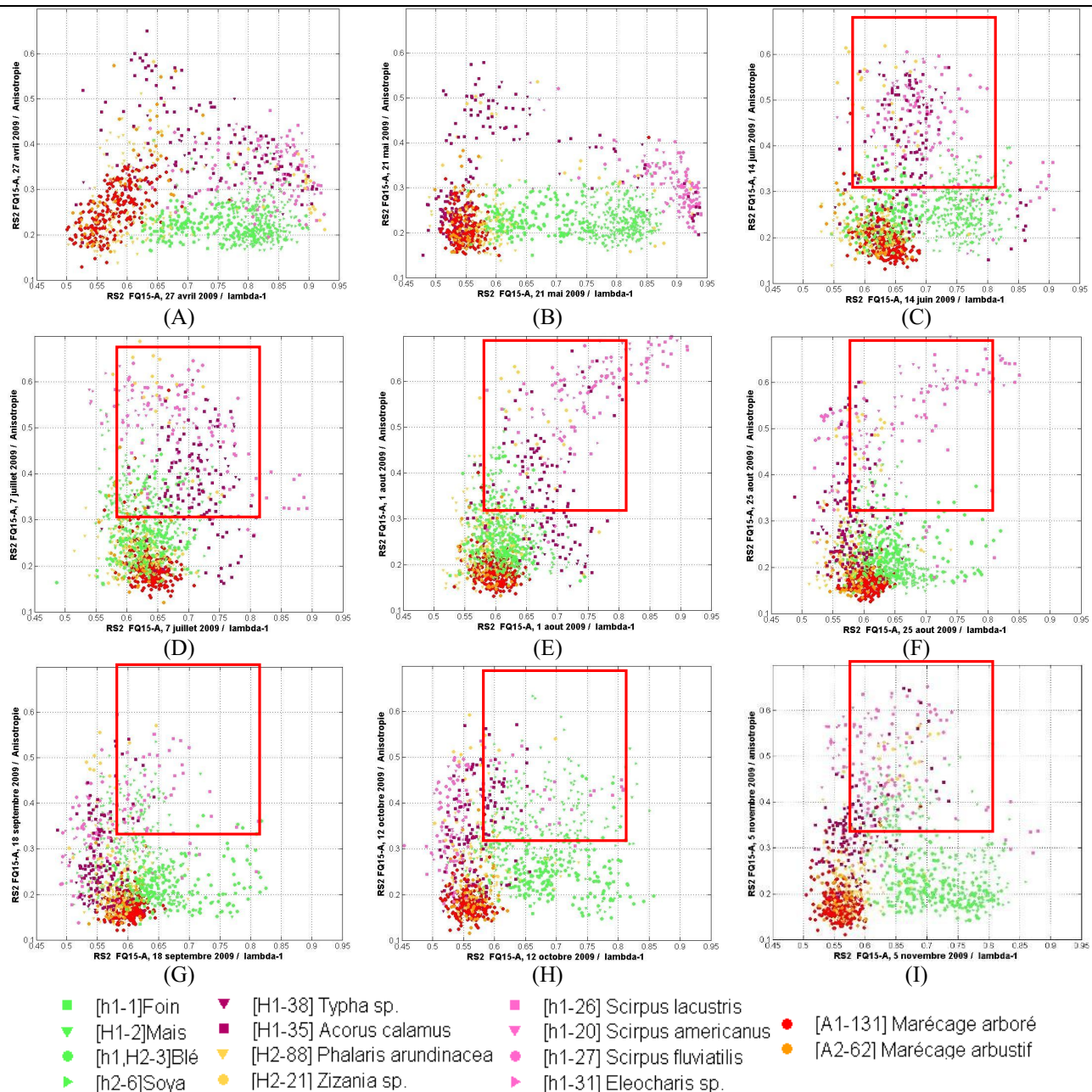


Figure 12.5-2 : Évolution temporelle des physionomies végétales des marais et des milieux secs pour λ_{1N} et A (série FQ15-A)

Avec les données RS2, l'anisotropie se manifeste surtout en présence d'eau (inondations) et plus rarement pour les hauts-marais à Phalaris ([H2-88]) ou les cultures à l'exception de quelques champs de maïs ([H1-2]) en octobre. Finalement, si l'espace Anisotropie- λ_{1N} permet de distinguer des grands groupes de physionomies au printemps (cultures vs Milieux humides), il est plus approprié pour la caractérisation d'un objet plutôt que d'une classe physionomique pour une date donnée.

12.5.3. Relation entre σ_{hv} et λ_3

Les paramètres de la troisième composante ont souvent été laissés de côté car jugé comme étant non significatif étant donné la faible valeur de λ_{3N} . Les paramètres de la troisième composante (α_{s3} , $\Phi_{\alpha s3}$, τ_3 , ψ_3) présentent aussi, dans la majorité des cas, un aspect très bruité qui semble confirmer leur faible importance. Il en va autrement en puissance ou la contribution de la troisième composante (λ_3) représente une part non négligeable de la puissance totale rétrodiffusée. Cette composante est de plus étroitement corrélée avec le canal σ_{hv}^0 (Figure 12.5-3) qui est souvent le canal de polarisation le plus utilisé pour la discrimination et la classification des physionomies végétales comme le montrerons les chapitres 13 et 14.

La section 10.8 a montré qu'il existe des cas pour lesquels la corrélation entre σ_{hv}^0 et λ_3 ne tenait pas. Ces cas, sans être attachés à une physionomie particulière, correspondaient avant tout aux situations où la valeur de ψ_1 était élevée pour un objet. Les analyses conduites avec les données RS2 pour la saison 2009 ne montrent pas de tendances différentes (Figure 12.5-3). Parmi les exceptions notées, les objets appartenant aux classes de Typha ([H1-38]) et de Scirpes (h1) sont les plus fréquents, notamment pour l'acquisition du 18 septembre pour lesquels de fortes valeurs de ψ_1 ont été enregistrées (Figure 12.5-3-G). L'influence de structure du Scirpe qui se résume à de simples tiges avec peu ou pas de biomasse foliaire a été mis de l'avant pour expliquer les fortes valeurs de ψ_1 . Du début à la fin de l'été, la densité des tiges de Scirpes diminue, le niveau d'eau baisse (cf. §9.2.3) et laisse place à un substrat vaseux extrêmement lisse favorisant une rétrodiffusion pure du signal (l'effet du vent sur une surface d'eau peu rendre cette dernière dépolarisante).

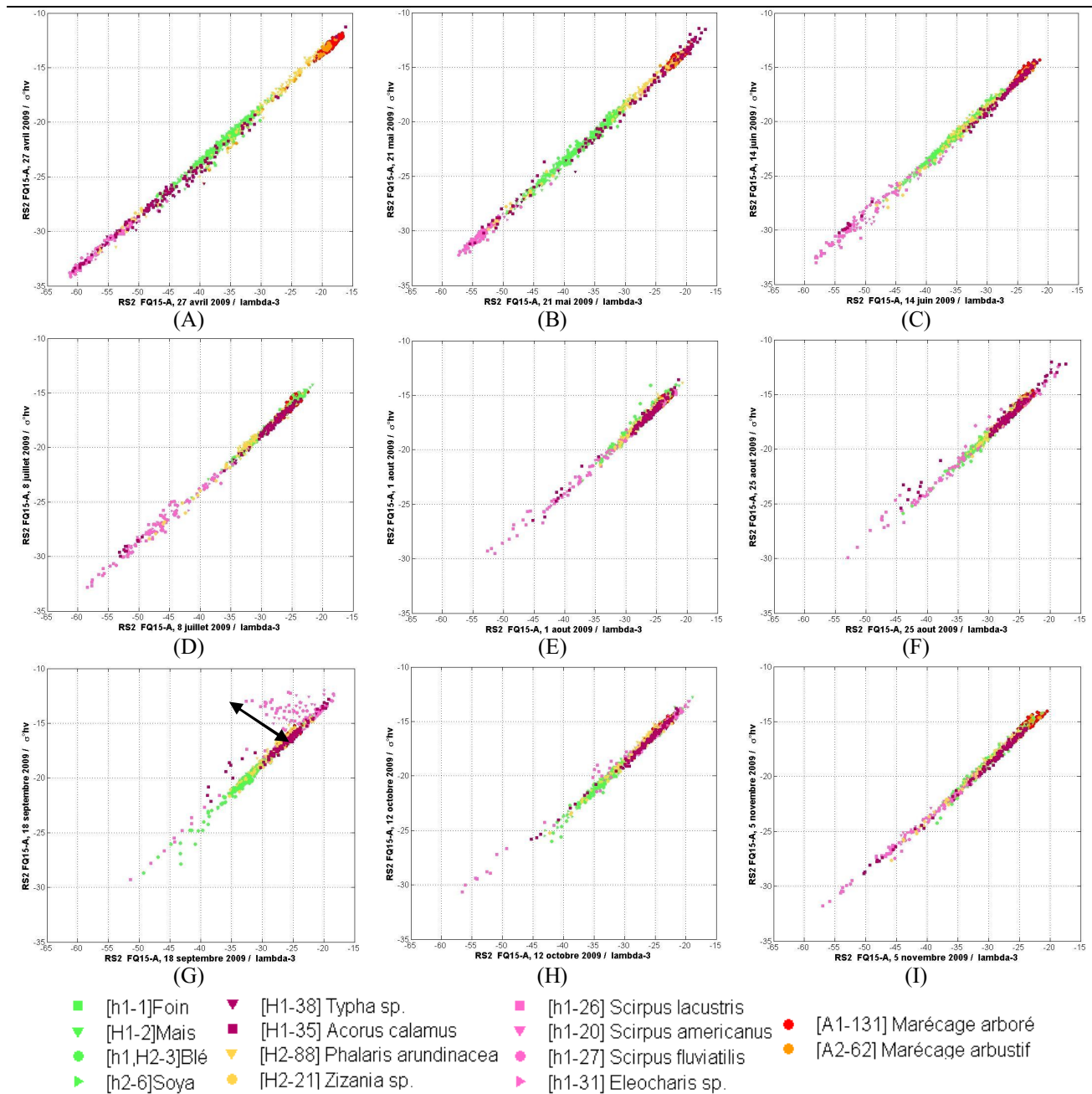


Figure 12.5-3 : Position des physiognomies végétales dans l'espace $\lambda_3 - \sigma_{hv}^0$

Les tiges de Scirpe ne sont pas parfaitement alignées comme dans un champ mais il existe néanmoins un effet d'orientation puisque les bas marais forment une bande qui suit la direction du rivage. On observe d'ailleurs une correspondance entre l'orientation du rivage et la valeur de ψ_1 (Figure 12.5-5, D3) : lorsque le rivage est perpendiculaire au LOS ψ_1 est négatif ($\psi_1 \approx -20^\circ$) tandis qu'il est positif lorsque ce dernier est parallèle au LOS ($\psi_1 \approx 40^\circ$). Une combinaison particulière entre la densité du Scirpe et une surface lisse créerait une

dépolarisation du signal déterministe³⁰ qui n'affectera pas λ_3 contrairement au canal σ_{hv}^0 . Cela implique, par exemple, que les fortes valeurs observées par σ_{hv}^0 (Figure 12.5-5-D3, flèche) ne sont pas attribuables à une plus forte biomasse mais à une dépolarisation du signal ce qui fausserait toutes les relations empiriques entre ces deux variables.

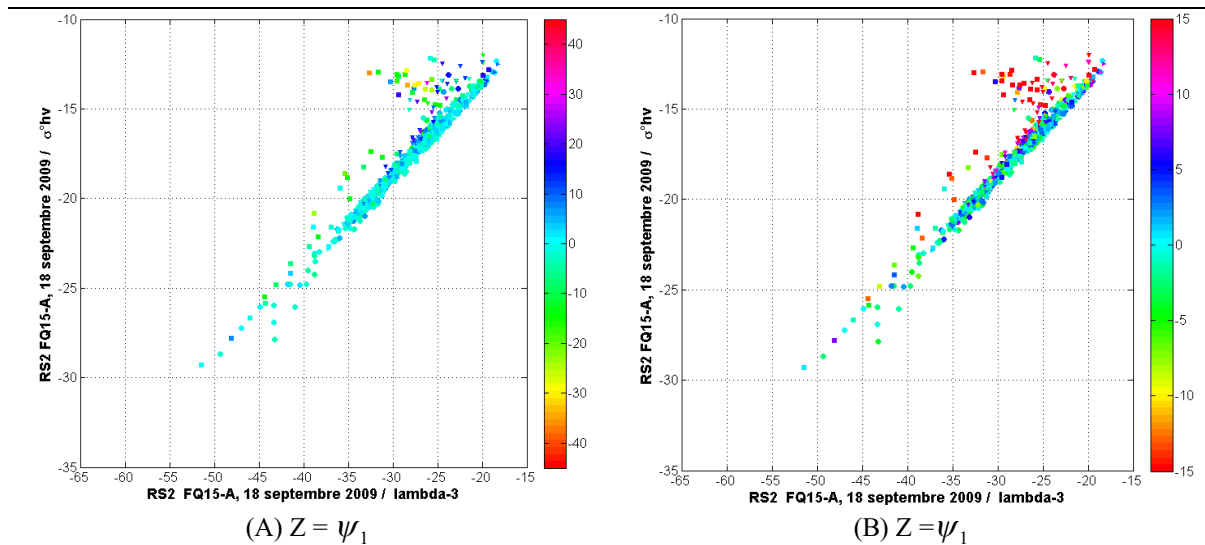


Figure 12.5-4 : Relation entre σ_{hv}^0 et λ_3 en fonction de l'angle d'orientation dominant ψ_1 , 18 septembre 2009, série FQ15-A

³⁰ C.-à-d. une dépolarisation pouvant être parfaitement compensé par une rotation rigide de la matrice de cohérence ou de covariance lors de la décomposition.

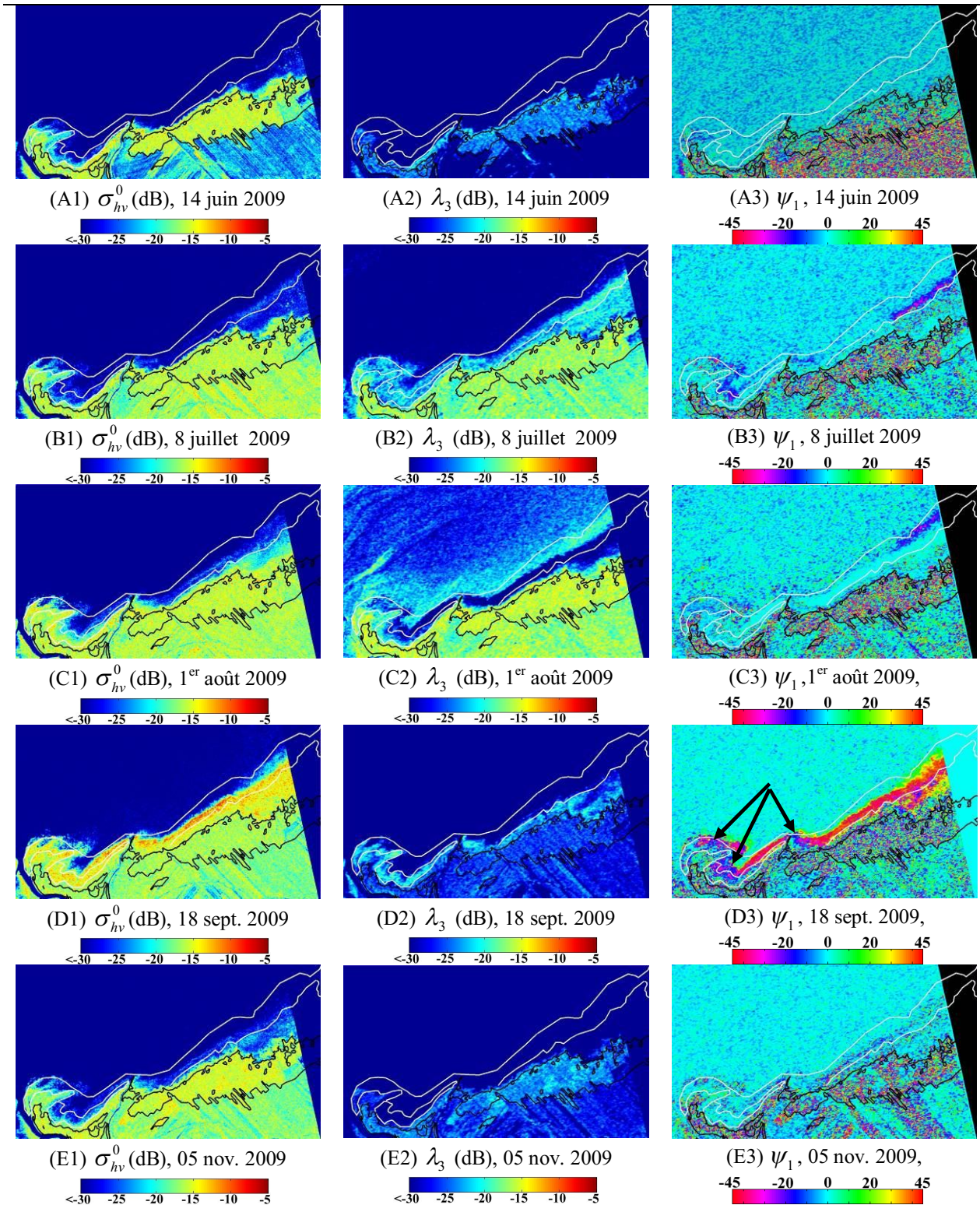


Figure 12.5-5 : Évolution temporelle du canal σ_{hv}^0 , de la troisième valeur propre λ_3 et de l'angle d'orientation ψ_1 pour un bas marais à Scirpes, série FQ15-A

12.6. Résumé

(Section 12.2) ■ Pour les classes physiologiques [H1] et [h1], la puissance rétrodiffusée maximale ($span$, λ_1 , σ_{hh}^0 , et σ_{vv}^0 dans une moindre mesure) est atteinte en juin et juillet lors de l'émergence lorsque des mécanismes de rétrodiffusion cohérents sont présents et non pas lorsque la biomasse aérienne est à son maximum vers la fin juillet ou en août en août (noté par une augmentation de σ_{hv}^0 et λ_3). Au cours de cette transition, α_{s1} décroît plus ou moins fortement alors que α_{sg} se maintient dans la zone des rétrodiffusions dipolaires du à l'apport de la rétrodiffusion volumique ou multiple. → Cela montre que les relations empiriques entre la biomasse aérienne et le coefficient de rétrodiffusion modélisées par des fonctions monotones (croissance ou décroissante) sont plutôt hasardeuses. Il est nécessaire d'être en mesure de pouvoir estimer quelle est la portion cohérente du signal (et son influence), ce qui n'est possible qu'avec les données polarimétriques. → Le début de l'été est donc propice à la classification des physiologies végétales alors que la fin de l'été (fin juillet à début septembre) l'est pour leur caractérisation, l'estimation de la biomasse aérienne par exemple. → Bien que les paramètres polarimétriques améliorent la discrimination entre les classes de physiologies par rapport aux canaux de polarisation, la dimension temporelle demeure un élément essentiel de discrimination entre ces dernières. Une acquisition au printemps (vers la fin avril) accompagnée de 2 ou 3 images acquises entre mai et la fin juillet apparaissent être optimales. ■ Les signatures saisonnières de la Zizanie ([H2-21]) se rapprochent beaucoup plus celles du Typha ([H1-38]) que du Phalaris ([H2-88]). Il apparaît que tout regroupement d'espèces végétales en classes physiologiques devra aussi tenir compte de la distinction entre bas et hauts marais. ■ Les paramètres ψ_1 et τ_1 demeurent très stables et centrés sur zéro (sauf rares exceptions) pour l'ensemble des classes physiologiques tout au long de la saison de croissance. Cela renforce l'idée que ces paramètres sont mieux adaptés à la caractérisation d'un objet (d'un site particulier) qu'à une classe physiologique entière. → L'angle d'orientation $|\psi_1|$ présente des valeurs relativement élevées pour le Scirpe américain vers la fin septembre/début octobre et montre une sensibilité à l'orientation des marais par rapport au LOS

(Section 12.3). Cet effet de l'orientation a eu un effet sur σ_{hv}^0 pour lequel une augmentation de la rétrodiffusion a été notée pour certaines orientations (dépolariation du signal) mais qui n'apparaît pas sur λ_3 . ■ L'effet des conditions météorologique et en particulier d'une acquisition en conditions très sèches a un effet marqué sur les signatures saisonnières des classes comportant une composante volumique ou multiple significative ([A1], [A2] et [A3]) pour les paramètres de puissance et pour α_{sg} et α_{s1} . Les paramètres ψ_1 et $\Phi_{\alpha s1}$ sont relativement insensibles à l'effet d'une acquisition en conditions sèches.

CHAPITRE 13

13. POTENTIEL D'IDENTIFICATION DES CLASSES PHYSIONOMIQUES

Ce chapitre présente les résultats des analyses de séparabilité entre classes physiologiques avec l'algorithme de la divergence transformée (d.t). Ces analyses sont en continuité avec celles présentées à la section 11.4 et basées sur les données ALOS.

13.1. Séparabilités moyennes

Les analyses présentées au chapitre précédent ont montré qu'il existe un avantage certain à combiner plusieurs acquisitions d'un même site pendant la saison de croissance. Mais d'un point de vue opérationnel, pour des questions de coûts, il n'est pas toujours possible de constituer des séries temporelles comportant un aussi grand nombre d'acquisitions que celui utilisé dans cette recherche. Quatre paires d'images RS2 acquises à différents moments du cycle de croissance des physiologies végétales seront ainsi utilisées pour établir quel type d'information il est possible d'obtenir sur la physiologie des espèces végétales par un nombre restreint d'acquisitions. Les paires retenues pour la saison 2009 sont :

- i. Paire A : FQ21-D du 8 juin et FQ15-A du 14 juin;
- ii. Paire B : FQ21-D du 2 juillet et FQ15-A du 8 juillet;
- iii. Paire C : FQ21-D du 26 juillet et FQ15-A du 1^{er} août;
- iv. Paire D : FQ21-D 12 septembre et FQ15-A du 18 septembre;

La séparabilité des physiologies végétales sera tour à tour évaluée avec les coefficients de rétrodiffusion σ_{hh}^0 , σ_{hv}^0 et σ_{vv}^0 et différentes combinaisons des paramètres de la décomposition de Touzi. Deux images Landsat seront aussi utilisées pour compléter cette analyse. La première image Landsat (14 juin 2009) sera comparée avec la Paire A d'images RS2 alors que la seconde (10 septembre 2009) sera comparée à la Paire D d'images RS2. Aucune image Landsat de qualité n'était disponible pour l'été 2009 et ceci souligne encore une fois l'importance de développer des méthodologies pour la classification et le suivi des milieux humides basées sur les images RSO. Un total de 210 paires de séparabilités a été évalué entre

chaque classe individuelle (voir la note 1 du Tableau 13.1-1). Les résultats ont ensuite été compilés pour l'ensemble des classes, par classes physiologiques et entre les classes physiologiques (Tableau 13.1-1 à Tableau 13.2-5).

Pour la majorité des combinaisons (Tableau 13.1-1, A à H), les plus fortes séparabilités sont obtenues au début (8 et 14 juin) et à la fin (12 et 18 septembre) de la saison de croissance. En juin, cela est avant tout attribuable aux marais qui ne sont pas encore pleinement développés (ou à nu dans le cas de la classe [h1]) ce qui a pour effet d'augmenter artificiellement la séparabilité. Le même constat est applicable à la fin de la saison de croissance lorsque certaines classes physiologiques entrent en sénescence (ou ont été récoltées). La séparabilité entre les classes physiologiques diminue au milieu de la saison de croissance (juillet et août) lorsqu'elles atteignent leur maturité. La rétrodiffusion volumique (et multiple) gagne en importance et remplace ou diminue la dominance des mécanismes de rétrodiffusion bien définis que l'on associe à une cible canonique par exemple.

On remarque d'ailleurs que les paramètres de la deuxième (C1) et troisième (D1) composante de la décomposition de Touzi augmentent au cours de l'été même si ces augmentations sont marginales et, somme toute, ne permettent pas d'assurer une séparabilité des classes sans la contribution de la radiométrie (C1 et D1 vs C2 et D2). Cette observation confirme l'une des conclusions des chapitres précédents à savoir que l'information relative à la structure des physiologies doit être utilisée conjointement à la radiométrie pour une caractérisation complète des physiologies. En comparant les combinaisons B1 vs B2, C1 vs C2, D1 vs D2, F1 vs F2 ainsi que H1 vs H3, la contribution du *span* est évidente avec une augmentation de la séparabilité de l'ensemble des combinaisons pour toutes les dates d'acquisition.

	Configuration	8 et 14 Juin	2 et 8 Juillet	26 juillet et 1 ^{er} août	12 et 18 Septembre
A1	$\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$	0.93±0.56	0.80±0.59	0.63±0.48	0.61±0.53
A2	$\sigma_{hh}^0 / \sigma_{hv}^0$	1.06±0.62	0.93±0.67	0.66±0.51	0.70±0.57
A3	$\sigma_{vv}^0 / \sigma_{hv}^0$	1.02±0.60	0.85±0.69	0.57±0.56	0.64±0.58
A4	$\sigma_{hh}^0 / \sigma_{hv}^0 / \sigma_{vv}^0$	1.19±0.58	1.05±0.65	0.84±0.59	0.78±0.57
A5	$\alpha_{s1} / \sigma_{hv}^0$	1.43± 0.64	1.24±0.69	1.03±0.69	0.95±0.63
B1	$\alpha_{s1} / \Phi_{as1} / \psi_1 / \tau_1$	1.29±0.67	1.17±0.68	1.22±0.70	0.85±0.59
B2	$\alpha_{s1} / \Phi_{as1} / \psi_1 / \tau_1 / \lambda_{1n} / Span$	1.71±0.51	1.58±0.54	1.45±0.58	1.32±0.55
C1	$\alpha_{s2} / \Phi_{as2} / \psi_2 / \tau_2$	0.74±0.55	0.78±0.55	0.88±0.73	0.27±0.19
C2	$\alpha_{s2} / \Phi_{as2} / \psi_2 / \tau_2 / \lambda_{2n} / Span$	1.52±0.54	1.37±0.57	1.19±0.63	1.10±0.56
D1	$\alpha_{s3} / \Phi_{as3} / \psi_3 / \tau_3$	0.18±0.14	0.21±0.19	0.33±0.36	0.23±0.33
D2	$\alpha_{s3} / \Phi_{as3} / \psi_3 / \tau_3 / \lambda_{3n} / Span$	1.39±0.58	1.25±0.59	1.09±0.61	1.02±0.56
E1	$\alpha_{s1} / \Phi_{as1} / \psi_1 / \tau_1 / \lambda_{1n} /$ $\alpha_{s2} / \Phi_{as2} / \psi_2 / \tau_2 / \lambda_{2n} / Span$	1.77±0.47	1.69±0.48	1.58±0.51	1.47±0.50
E2	$\alpha_{s1} / \Phi_{as1} / \psi_1 / \tau_1 / \lambda_{1n} /$ $\alpha_{s2} / \Phi_{as2} / \psi_2 / \tau_2 / \lambda_{2n} /$ $\alpha_{s3} / \Phi_{as3} / \psi_3 / \tau_3 / \lambda_{3n} / Span$	Pas de solution	1.71±0.46	1.65±0.50	1.52±0.49
F1	$\lambda_{1n} / \lambda_{2n}$	0.97±0.59	0.90±0.61	0.89±0.67	0.72 ±0.49
F2	$\lambda_{1n} / \lambda_{2n} / Span$	1.49±0.56	1.32±0.57	1.14±0.61	1.15±0.56
G1	$\bar{\alpha}_c / \bar{\beta}_c$	1.14±0.61	0.97±0.61	0.96±0.69	0.76±0.56
G2	$\bar{\alpha}_c / H$	1.39±0.66	1.24±0.68	1.38±0.71	1.05±0.63
G3	$\bar{\alpha}_c / \bar{\beta}_c / A / H$	1.54±0.58	1.45±0.60	1.59±0.57	1.19±0.61
G4	$\bar{\alpha}_c / \bar{\beta}_c / A / H / span$	1.74±0.49	1.64±0.51	1.66±0.50	1.43±0.53
H1	$F_{ODD} / F_{DBL} / F_{VOL}$	1.71±0.49	1.58±0.56	1.43±0.63	1.42±0.59
H2	$F_{\%ODD} / F_{\%DBL} / F_{\%VOL}$	1.37±0.67	1.27±0.66	1.26±0.70	0.98±0.62
H3	$F_{\%ODD} / F_{\%DBL} / F_{\%VOL} / Span$	1.66±0.50	1.52±0.55	1.47±0.62	1.35±0.57
Y	Landsat TM 1-2-3 et 4	1.83±0.37	N.A	N.A	1.59±0.50
Z	Landsat TM 1-2-3-4-5 et 7	1.91±0.28	N.A	N.A	1.75±0.37

Note 1 : La séparabilité moyenne totale correspond à la moyenne des 210 paires de séparabilités provenant des 21 classes suivantes : **Cultures**: [H1-2] Maïs [H2-1] Blé, [h2-6] Soya, [h1-1] Foin.

Marais: [H1-38] Typha.sp., [H1-35] Acorus Calamus, [h1-26] Scirpus lacustris, [h1-20] Scirpus Americanus, [h1-27] Scirpus fluviatilis, [h1-31] Eleocharis sp., [h2-32] Butomus umbellatus, [H2-88] Phalaris arundinacea, [H2-21] Zizania sp., [H2-89] Calamagrostis canadensis, **Marécages**: [A2-62] Mrg. Arbustif, [A1-130] Marécage Arboré (Acer saccharinum), [A1-131] Marécage Arboré. **Forêts**: [A1-63] Phys. arborés substrat sec. Cl 1, [A1-64] Phys. arborés substrat sec. Cl 2. **Tourbières**: [A3-240] Tourbière ouverte. [A2] Tourbière boisée.

Note 2 : Les séparabilités impliquant les classes d'eau libre [D] et de sol dénudé [D] n'ont pas été comptabilisées dans la séparabilité moyenne totale.

Tableau 13.1-1 : Séparabilité moyenne totale par configuration et par date

En contrepartie, la radiométrie ne permet pas à elle seule d'obtenir de bonnes séparabilités moyennes. La performance moyenne des canaux de polarisation σ_{hh}^0 , σ_{hv}^0 et σ_{vv}^0 en témoigne avec une séparabilité moyenne totale de seulement 1.19 (A4, 8 et 14 juin). D'ailleurs, la configuration A5 qui utilise le paramètre α_{s1} en remplacement des canaux de polarisation σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 (A4) performe un peu mieux que cette dernière. Ceci est attribuable d'une part au paramètre α_{s1} qui est plus sensible que σ_{hh}^0 et σ_{vv}^0 à l'effet d'une végétation émergente de faible densité.

L'introduction progressive des paramètres de la deuxième et troisième composante de la décomposition de Touzi (B2 vs E1 vs E2) permet d'améliorer graduellement la séparabilité moyenne totale, mais souvent que de manière marginale. Le principal bénéfice de l'ajout des 2e et 3e composantes semble être le maintien des séparabilités moyennes totales au cours de l'été par une meilleure prise en compte de l'effet de la rétrodiffusion volumique ou multiple. À titre de comparaison, la performance des paramètres de la décomposition de Cloude (G1 à G4) et de Freeman (H1 à H3) a aussi été évaluée selon diverses combinaisons. La configuration G2 correspond à l'information contenue dans le plan "alpha-entropie" qui demeure aujourd'hui très populaire. Avec une performance maximale de 1.39 (8 et 14 juin), cette configuration se compare avantageusement aux canaux de polarisations mais reste inférieure aux configurations utilisant une plus grande diversité de paramètres polarimétriques. L'introduction de l'anisotropie et de l'angle d'orientation $\bar{\beta}_c$ (G3) permet d'obtenir une performance qui approche celle de la configuration E2 qui utilise les paramètres des trois composantes de Touzi. Les configurations H1 et H2 permettent une autre comparaison de l'effet de la normalisation de la radiométrie pour les paramètres de Freeman. C'est sans surprise que la version normalisée par le *span* (H2) performe moins bien que la version non normalisée (H1) et ce de manière significative au début et à la fin de la saison de croissance. Si l'on réintroduit le *span* avec les paramètres de Freeman normalisés (H3), ce qui techniquement est identique à H2, on obtient des résultats (légèrement) différents qui indiqueraient ici l'effet de la distribution (la gamme dynamique des paramètres) sur l'algorithme de la divergence transformée. Les paramètres de la décomposition de Freeman offrent alors une performance comparable à ceux de la décomposition de Cloude et de Touzi.

Les séparabilités moyennes présentées au Tableau 13.1-1 représentent une interprétation statistique de la performance des divers paramètres. Il est nécessaire de : 1) ventiler ces résultats par classe physiologique et; 2) de confronter les paramètres à la réalité par le biais d'une classification et d'évaluer les résultats à l'aide d'une vérité terrain (voir chapitre 14). En particulier pour le point 1, certains groupes de physiologies se distinguent qu'importe la combinaison de paramètres ce qui peut masquer des différences plus subtiles mais importantes entre certaines physiologies des bas marais par exemple.

13.2. Séparabilités par classe physiologiques

Dans ce qui suit, seules les combinaisons A4, E1, H1 seront examinées plus en détails car elles ont offert les meilleurs résultats de leur groupe respectif.

13.2.1. Classes de marais

Canaux de polarisation

La performance des différents paramètres et canaux de polarisation est généralement meilleure au mois de Juin puisque la séparabilité moyenne est artificiellement augmentée par les classes marais qui sont en majorité dénudés au cours de cette période. Les images acquises en juillet, août et septembre permettent d'obtenir une meilleure idée de la performance réelle des paramètres lorsque les classes physiologiques ont atteint leur maturité.

En juillet, pour les marais ([H1], [H2] et [h1]), les séparabilités intraclasses des classes physiologiques basées sur les canaux de polarisation $\sigma_{hh}^0, \sigma_{hv}^0, \sigma_{vv}^0$ (Tableau 13.2-1) demeurent faibles et généralement inférieures à 1. Pour les classes physiologiques des marais, les séparabilités intraclasses sont le plus souvent inférieures à celle des séparabilités interclasses, l'exception étant la séparabilité entre les classes herbacées haute 1 ([H1]) et haute 2 ([H1]) (Tableau 13.2-1). Comme mentionné, cela est attribuable à la présence de la Zizanie dans la classe [H2], or cette espèce se rapproche plus du typha ([H1-38]) que du Phalaris ([H2-88]). Les séparabilités observées sur une base individuelle entre le Typha, le Phalaris et la Zizanie confirment ce qui a été observé avec les signatures saisonnières. Les physiologies arborées des milieux secs présentent également des signatures saisonnières similaires à celles

des marécages (Figure 12.3-1). De fortes valeurs pour l'ensemble des paramètres sont observées au début du printemps et décroissent par la suite à mesure que le signal sature par une augmentation de la biomasse foliaire. On remarque que la présence de la composante double-bond a eu une influence suffisamment forte sur le signal rétrodiffusé pour entraîner σ_{hv}^0 à la hausse (Figure 12.3-1-D3). La discrimination entre les marécages et les forêts sur substrat sec vers la fin avril n'est pas possible avec σ_{hv}^0 et elle doit plutôt, selon la situation, reposer sur α_{s1} . Cela confirme les observations de la section 11.1, à savoir, que la détection optimale des marécages repose sur différents paramètres selon la saison. Notons que le seul élément notable dans les signatures de cette physionomie concerne l'acquisition du 12 septembre de la série temporelle FQ21 réalisée en conditions sèches. A cette date, autant le type de rétrodiffusion que les paramètres liés à l'intensité (incluant σ_{hv}^0 et λ_3) présentent leurs plus faibles valeurs observée entre le Typha et la Zizanie (d.t =0.24 et 0.10) pour juillet et aout respectivement (Tableau 13.2-1).

	[H1] vs [H2]	[H1] vs [h1]	[H2] vs [h1]	[H1] Intra	[H2] Intra	[h1] Intra	[H2-88] [H2-21]	[H1-38] [H2-21]
*Canaux de polarisation								
A4, 8 et 14 juin	0.60	1.81	1.66	0.35	0.71	0.43	0.76	0.43
A4, 2 et 8 juillet	0.54	1.76	1.73	0.54	0.63	0.52	0.78	0.24
A4, 26 juillet et 1 ^{er} aout	0.64	1.22	1.26	0.18	0.58	0.40	0.99	0.10
A4, 12 et 18 septembre	0.47	0.46	1.04	0.21	0.57	0.31	0.66	0.08
* Paramètres de Touzi								
E1, 8 et 14 juin	1.38	1.93	1.89	1.61	1.43	1.37	1.70	1.18
E1, 2 et 8 juillet	1.75	1.91	1.85	1.93	1.59	1.27	1.74	1.59
E1, 26 juillet et 1 ^{er} aout	1.47	1.86	1.94	1.01	1.52	1.28	1.77	0.70
E1, 12 et 18 septembre	1.01	1.33	1.60	1.09	1.33	0.97	1.51	0.30
* Paramètres de Freeman								
H1, 8 et 14 juin	0.89	1.97	1.87	0.25	0.79	1.05	1.05	0.87
H1, 2 et 8 juillet	0.86	1.96	1.98	0.82	0.75	1.14	1.04	0.38
H1, 26 juillet et 1 ^{er} aout	1.02	1.42	1.56	0.35	1.24	0.62	1.92	0.14
H1, 12 et 18 septembre	1.16	0.85	1.52	0.64	1.40	0.55	1.85	0.12
Note 1 : [H1-38] Typha sp. [H2-88] Phlaris, [H2-21] Zizanie. Intra = séparabilité intraclasse								

Tableau 13.2-1 : Détail des séparabilités entre les classes physionomiques des marais pour les configurations A4, E1 et H1

Un autre point faible des canaux de polarisation concerne surtout les séparabilités entre les classes physionomiques des marais ([H1] et [H2]) et les physionomies arborées et arbustives ([A1], [A2]) qui n'est au mieux que moyenne. Seule la classe [h1] présente une séparabilité

parfaite en juillet ($d.t > 1.9$) (Tableau 13.2-2) puisque l'émergence tardive des espèces de Scirpes fait en sorte qu'en juillet elles présentent encore un mécanisme de rétrodiffusion bien développé. Dès le mois d'août et en septembre, la séparabilité entre la classe [h1] vs [A1] et [A2] diminue fortement tout comme celle entre les classes [H1] et [H2] (Tableau 13.2-2). La seule classe physiologique des milieux humides qui se sépare encore bien des autres classes au cours de cette période est celle de la tourbière ouverte ([A3]), surtout car elle se comporte comme un sol dénudé lorsque les conditions météorologiques sont sèches (Chapitre 16, figure 16.2-2, F3). Il apparaît donc que le suivi des milieux humides avec les canaux de polarisation peut se faire seulement si l'on connaît d'avance la répartition (position) spatiale des différentes classes physiologiques ou, du moins, que si l'on a fortement recours à des données auxiliaires et une interprétation lors de la classification.

	[A1] intra	[A1-130] vs [A2-62]	[A1-130] vs [A3]	[A1-130] vs [H1]	[A1-130] vs [H2]	[A1-130] vs [h1]
* Canaux de polarisation						
A4, 8 et 14 juin	0.18	0.03	1.58	0.68	0.89	1.95
A4, 2 et 8 juillet	0.11	0.04	1.14	1.01	0.84	1.96
A4, 26 juillet et 1 ^{er} août	0.06	0.02	1.13	1.12	0.50	1.57
A4, 12 et 18 septembre	0.19	0.02	1.99	0.20	0.36	0.82
* Paramètre de Touzi						
E1, 8 et 14 juin	0.41	0.32	1.88	2.00	1.94	2.00
E1, 2 et 8 juillet	0.61	0.60	1.63	2.00	1.88	2.00
E1, 26 juillet et 1 ^{er} août	0.43	0.33	1.75	1.98	1.68	2.00
E1, 12 et 18 septembre	0.49	0.35	2.00	1.48	1.25	1.96
* Paramètre de Freeman						
H1, 8 et 14 juin	0.63	0.37	1.99	2.00	1.83	2.00
H1, 2 et 8 juillet	0.69	0.51	1.89	1.98	1.76	2.00
H1, 26 juillet et 1 ^{er} août	0.52	0.24	1.95	1.87	1.36	2.00
H1, 12 et 18 septembre	0.78	0.27	2.00	1.24	1.11	1.87

Tableau 13.2-2 : Détail des séparabilités entre les classes physiologiques arborées et celles des marais pour les configurations A4, E1 et H1

Paramètres polarimétriques

A l'instar des canaux de polarisation, les séparabilités intra-classes sont généralement plus faibles de celles des séparabilités inter-classes avec les paramètres de Touzi et de Freeman pour les classes de marais (Tableau 13.2-1 et Tableau 13.2-2). Une nette amélioration des séparabilités est observée par rapport aux canaux de polarisation, particulièrement pour les mois de juillet et août lorsque les physiologies végétales sont pleinement développées. L'écart entre les paramètres de Touzi et les canaux de polarisation est encore plus marqué

lorsque les physionomies arborées et arbustives sont considérées (Tableau 13.2-2). La séparabilité entre les marécages arborés [A1-130] et les marais de la classe [H1] n'atteint que 1.12 avec les canaux de polarisation alors qu'elle est parfaite avec les paramètres de Touzi ou de Freeman ($d.t. \geq 1.9$) jusqu'à la fin de l'été. La même observation s'applique à la séparabilité entre la classe [A1-130] et les marais de la classe [H2] qui est très forte au début de la saison de croissance pour les paramètres de Touzi et de Freeman pour ensuite diminuer vers la fin juillet et en septembre (Tableau 13.2-2).

La confusion entraînée par la Zizanie reste une source d'erreur pour les divergences transformées calculées avec les paramètres de Touzi ou de Freeman ce qui empêche d'atteindre le seuil des séparabilités parfaites. Une analyse détaillée de cette confusion (Tableau 13.2-2) montre que non seulement la séparabilité évolue avec la saison mais que la source principale de la séparabilité évolue également. Cependant, en comparant les contributions individuelles maximales à la $d.t$ générale, il apparaît que la séparabilité réside dans un espace multidimensionnel plutôt que sur un paramètre en particulier.

	[H1-38] Typha (<i>Typha sp.</i>)			
	8 et 14 Juin	2 et 8 Juillet	26 juillet et 1 ^{er} août	12 et 18 Septembre
[H2-21] Zizanie (<i>Zizania Sp.</i>)	<u>1.18 (E1-Touzi)</u> <i>span</i> (0.25) <u>0.87 (H1-Freeman)</u> F_{VOL} (0.28)	<u>1.59 (E1)</u> ψ_1 (0.35) <u>0.38 (H1)</u>	<u>0.70 (E1)</u> <u>0.14 (H1)</u>	<u>0.30 (E1)</u> <u>0.12 (H1)</u>
[H2-88] Phalaris (<i>Phalaris arundinacea</i>)	<u>1.63 (E1)</u> $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (0.45) <i>span</i> (0.64) <u>1.21 (H1)</u> F_{DBL} (1.03)	<u>1.92 (E1)</u> <i>span</i> (0.82) <u>1.50 (H1)</u> F_{DBL} (1.25)	<u>1.86 (E1)</u> α_{s1} (0.85) <i>span</i> (0.74) <u>1.85 (H1)</u> F_{DBL} (1.74)	<u>1.10 (E1)</u> α_{s1} (0.30), <i>span</i> (0.35) <u>1.53 (H1)</u> F_{DBL} (1.36)

Tableau 13.2-3 : Détail des séparabilités entre le Typha [H1-38] et les espèces végétales de la classe physionomiques [H2] pour les configurations E1 et H1

Les paramètres de Touzi et de Freeman offrent globalement une performance comparable (Tableau 13.1-1) dû à la contribution majoritaire des classes facilement séparables. Par exemple, la séparabilité entre les classes [A1], [A2] vs [H1], [H2] et [h1] (Tableau 13.2-2) repose surtout sur la radiométrie. Les paramètres de Freeman donneront dans tels cas une performance comparable à celle des paramètres de la décomposition de Touzi.

Des différences apparaissent lorsque l'on examine la séparabilité entre des espèces similaires (séparabilité intraclasse) ou à la fin de la saison de croissance lorsque l'effet de l'eau, comme élément rehaussant la structures des physiologies, perd de son importance. Par exemple, les séparabilités entre les classes [H1] et [h1] sont supérieures avec les paramètres de Touzi à la fin juillet et en septembre (d.t = 1.86 et 1.33 vs 1.42 et 0.85, Tableau 13.2-1). Ceci s'applique également aux séparabilités intraclasse des classes physiologiques [H1], [H2] et [h1]. Lorsque la séparabilité s'appuie principalement sur la radiométrie, les paramètres de Freeman offrent une performance équivalente. Pour les différences plus subtiles, les paramètres la décomposition de Touzi offrent une meilleure performance issue d'une meilleure exploitation de l'information polarimétrique. On remarque d'ailleurs au Tableau 13.2-3 l'alternance entre les paramètres radiométriques (*span*) et ceux de structure ($\alpha_{s1}, \Phi_{\alpha s1}, \psi_1$) comme principale source de séparabilité. Il arrive pour certains cas que les paramètres de Freeman aient mieux performé, le cas entre le Typha et le Phalaris en septembre étant le plus notable (Tableau 13.2-3). Il est difficile d'expliquer pourquoi une bonne séparabilité a été atteinte avec les paramètres de Freeman lorsque la principale source de contribution est similaire (la combinaison de α_{s1} et du *span* offre une information semblable à F_{DBL}).

13.2.2. Marais vs milieux secs (agriculture)

Un autre aspect de la séparabilité des classes sera examiné entre les classes physiologiques des marais et celles des cultures sur substrat sec (Tableau 13.2-4). Règle générale, l'importance de disposer d'une image acquise tôt au printemps ou à l'automne est démontrée par les meilleures séparabilités obtenues les 8 et 14 juin ainsi que les 12 et 18 septembre. Certaines paires de physiologies n'apparaissent pas séparables, par exemple le Phalaris [H1-88] et le blé [h1-1] dont la séparabilité maximale n'atteint que 1.3 quelle que soit la combinaison de paramètres considérée (Tableau 13.2-4). Entre ces derniers, une séparabilité parfaite ne sera atteinte qu'en impliquant plus d'une acquisition comme nous le verrons au chapitre suivant portant sur la classification. Finalement, l'avantage d'utiliser une décomposition polarimétrique par rapport aux canaux de polarisation est encore une fois démontrée.

	[H1-38]	[H1-38]	[H2-88]	[H2-88]	[h1]	[h1]
	[H1-2] Maïs	[h1-3] Blé	[H1-2] Maïs	[h1-3] Blé	[H1-2] Maïs	[h1-3] Blé
* Canaux de polarisation						
A4, 8 et 14 juin	<u>1.56</u> σ_{hh}^0 (1.43)	<u>1.13</u> σ_{hh}^0 (0.98)	<u>1.31</u> σ_{hv}^0 (0.76)	<u>0.19</u>	<u>0.77</u>	<u>1.62</u> σ_{hh}^0 (0.86)
A4, 2 et 8 juillet	<u>0.77</u>	<u>0.77</u>	<u>0.56</u>	<u>0.05</u>	<u>1.83</u> σ_{hv}^0 (1.52)	<u>1.72</u> σ_{hv}^0 (1.09)
A4, 26 juillet et 1 ^{er} aout	<u>0.17</u>	<u>0.71</u>	<u>0.43</u>	<u>0.15</u>	<u>1.32</u> σ_{hv}^0 (0.70)	<u>1.43</u> σ_{vv}^0 (0.71)
A4, 12 et 18 septembre	<u>0.31</u>	<u>0.82</u>	<u>0.68</u>	<u>0.68</u>	<u>0.74</u>	<u>1.24</u> σ_{hv}^0 (1.12)
* Paramètre de Touzi						
E1, 8 et 14 juin	<u>2.00</u> α_{s1} (1.99) <i>span</i> (1.55)	<u>1.96</u> <i>span</i> (1.54) $\Phi_{\alpha s1}$ (0.71)	<u>1.99</u> α_{s1} (1.95) λ_{1N} (1.32)	<u>0.76</u>	<u>2.00</u> α_{s1} (1.99) ψ_1 (0.96)	<u>1.93</u> <i>span</i> (0.54) $\Phi_{\alpha s1}$ (0.41)
E1, 2 et 8 juillet	<u>1.97</u> α_{s1} (1.12) Psi1 (0.84)	<u>1.87</u> <i>span</i> (0.78)	<u>1.13</u> <i>span</i> (0.68)	<u>0.29</u>	<u>1.99</u> <i>span</i> (0.82) α_{s1} (0.80)	<u>1.97</u> <i>span</i> (0.55) $\Phi_{\alpha s1}$ (0.45)
E1, 26 juillet et 1 ^{er} aout	<u>1.81</u> α_{s1} (1.08) $\Phi_{\alpha s1}$ (0.45)	<u>1.70</u> α_{s1} (0.66)	<u>1.13</u> <i>span</i> (0.68)	<u>0.24</u>	<u>2.00</u> α_{s1} (1.37) λ_{1N} (0.92)	<u>2.00</u> $\Phi_{\alpha s1}$ (1.21) α_{s1} (1.00)
E1, 12 et 18 septembre	<u>1.29</u> λ_{1N} (0.61)	<u>1.85</u> α_{s1} (1.21) λ_{1N} (1.02)	<u>1.38</u> <i>span</i> (0.66)	<u>1.22</u> λ_{1N} (0.77) λ_{2N} (0.57)	<u>1.61</u> α_{s1} (0.44)	<u>1.97</u> α_{s1} (1.49) <i>span</i> (1.13)
* Paramètre de Freeman						
H1, 8 et 14 juin	<u>2.00</u> F_{DBL} (2.00) F_{VOL} (1.83)	<u>1.99</u> F_{DBL} (1.99)	<u>1.99</u> F_{DBL} (1.99)	<u>1.28</u> F_{DBL} (1.10)	<u>2.00</u> F_{DBL} (1.99) F_{ODD} (1.94)	<u>2.00</u> F_{ODD} (1.77) F_{VOL} (1.96)
H1, 2 et 8 juillet	<u>1.64</u> F_{DBL} (1.56)	<u>1.83</u> F_{DBL} (1.76)	<u>0.98</u> F_{ODD} (0.73)	<u>0.27</u>	<u>2.00</u> F_{VOL} (1.87) F_{ODD} (1.28)	<u>1.99</u> F_{VOL} (1.47)
H1, 26 juillet et 1 ^{er} aout	<u>1.11</u> F_{DBL} (0.9)	<u>1.64</u> F_{DBL} (1.52)	<u>0.76</u>	<u>0.08</u>	<u>1.93</u> F_{DBL} (1.85)	<u>2.00</u> F_{DBL} (1.99)
H1, 12 et 18 septembre	<u>0.73</u>	<u>1.92</u> F_{DBL} (1.90)	<u>1.23</u> F_{DBL} (1.15)	<u>1.10</u> F_{VOL} (0.75)	<u>1.60</u> F_{ODD} (1.13) F_{VOL} (1.08)	<u>2.00</u> F_{DBL} (1.87) F_{VOL} (1.81)

Tableau 13.2-4 : Détail des séparabilités entre les classes physiologiques des marais et celles des cultures pour les configurations A4, E1 et H1

13.2.3. Tourbières ouvertes et boisées vs physiologies arborées

Les signatures saisonnières ont révélé très peu de différence entre les bogs à arbrisseaux [A3] et les fens herbacés pauvres [h1] (Figure 12.4-2) et seront traitées dans ce qui suit comme une seule classe soit la classe de tourbière ouverte [A3]. La fraction non polarisée de la

rétrodiffusion des classes de marécages arborés, des forêts sur substrat sec ainsi que des tourbières boisées [A2] est plus importante que pour les physionomies des marais et il n'est donc pas étonnant de constater la prépondérance du canal σ_{hv}^0 , de la composante volumique de Freeman (F_{VOL}) ou encore des valeurs propres normalisées ($\lambda_{1N}, \lambda_{2N}$) comme paramètres dominant la séparabilité de ces classes (Tableau 13.2-5). Si l'introduction des paramètres de la troisième composante de la décomposition de Touzi (E1 vs E2) ne modifie que la séparabilité totale, on remarque tout de même que λ_{3N} remplace λ_{2N} comme seconde contribution individuelle à la séparabilité (Tableau 13.2-5) même si la différence entre ces derniers est, somme toute, marginale.

L'évolution saisonnière de la séparabilité de ces classes est aussi beaucoup moins marquée pour ces classes qui ne connaissent pas, à l'instar des marais, un cycle complet de croissance passant d'une surface dénudée à une biomasse pleinement développée au cours d'une seule saison. La séparabilité des classes, qu'elle soit basée sur les canaux de polarisation ou encore les paramètres polarimétriques, n'est pas immune aux conditions météorologiques extrêmes. L'acquisition très sèche du 12 septembre 2009 (série FQ21-D) illustre ce phénomène. Les arbrisseaux recouvrant la tourbière ouverte suffisent à produire une rétrodiffusion de surface qui diffèrera de celle d'un sol dénudé. Par temps très sec, leur faible biomasse devient transparente au signal incident et ce dernier atteindra facilement la surface de la tourbe également sèche et il en résultera une rétrodiffusion de surface similaire à celle d'un sol dénudé. Ainsi la séparabilité entre les tourbières ouvertes et les sols dénudés passe de 1.98 en juillet à seulement 0.19 en septembre avec les canaux de polarisation (A4, Tableau 13.2-5). Le même phénomène survient pour les paramètres de Touzi (d.t de 1.99 vs 0.93) et de Freeman (d.t de 1.99 vs 0.58) pour les mêmes dates.

Le phénomène contraire est observé pour la séparabilité entre les tourbières ouvertes et boisées pour lesquelles le temps sec favorise leur séparabilité. La plus forte biomasse des tourbières boisées fait en sorte que cette physionomie ne peut devenir totalement transparente au signal. Un temps sec favorisera une pénétration plus profonde du signal dans la canopée et l'interaction accrue avec les troncs et les branches maintiendra ou augmentera l'importance de la fraction dépolarisée selon le même phénomène qui a été observé pour la classe [A1-64] (cf. §12.3).

	T.ouv. [A3]	T.ouv. [A3]	T.ouv. [A3]	T.ouv. [A3]	T. boisé [A2]	T. boisé [A2]
	T. boisé [A2]	Sol dén. [D]	Mrg .[A1]	[A1-64] F.S	Mrg .[A1]	[A1-64] F.S
* Canaux de polarisation						
A4, 8 et 14 juin	<u>0.97</u> σ_{hv}^0 (0.91)	<u>1.92</u> σ_{hv}^0 (1.76)	<u>1.53</u> σ_{hv}^0 (1.41)	<u>1.18</u> σ_{hv}^0 (1.14)	<u>0.31</u>	<u>0.11</u>
A4, 2 et 8 juillet	<u>0.83</u>	<u>1.98</u> σ_{hv}^0 (1.89) σ_{hh}^0 (1.82)	<u>1.13</u> σ_{hv}^0 (0.99)	<u>1.13</u> σ_{hv}^0 (1.10)	<u>0.13</u>	<u>0.13</u>
A4, 26 juillet et 1 ^{er} aout	<u>0.78</u>	<u>1.45</u> σ_{vv}^0 (1.06)	<u>1.08</u> σ_{hv}^0 (0.96)	<u>1.10</u> σ_{hv}^0 (1.04)	<u>0.09</u>	<u>0.15</u>
A4, 12 et 18 septembre	<u>1.66</u> σ_{hv}^0 (1.55)	<u>0.19</u>	<u>1.99</u> σ_{hv}^0 (1.98)	<u>1.97</u> σ_{hv}^0 (1.95)	<u>0.75</u>	<u>0.44</u>
* Paramètres de Touzi						
E1, 8 et 14 juin	<u>1.59</u> λ_{1N} (1.00) λ_{2N} (0.86)	<u>2.00</u> <i>span</i> (1.99)	<u>1.88</u> λ_{1N} (1.21) λ_{2N} (1.01)	<u>1.91</u> λ_{1N} (1.66) λ_{2N} (1.48)	<u>0.25</u>	<u>0.58</u>
E1, 2 et 8 juillet	<u>1.53</u> λ_{1N} (0.84)	<u>1.99</u> <i>span</i> (1.97)	<u>1.63</u> λ_{1N} (0.77) λ_{2N} (0.61)	<u>1.93</u> λ_{1N} (1.65) λ_{2N} (1.42)	<u>0.22</u>	<u>0.75</u>
E1, 26 juillet et 1 ^{er} aout	<u>1.65</u> <i>span</i> (0.80)	<u>1.99</u> α_{s1} (1.66) <i>span</i> (1.66)	<u>1.73</u> λ_{1N} (0.96) λ_{2N} (0.72)	<u>1.94</u> λ_{1N} (1.52) λ_{2N} (1.28)	<u>0.34</u>	<u>0.76</u>
E1, 12 et 18 septembre	<u>1.91</u> <i>span</i> (1.77)	<u>0.93</u> λ_{2N} (0.40)	<u>1.99</u> <i>span</i> (1.99)	<u>1.99</u> <i>span</i> (1.97)	<u>1.05</u> <i>span</i> (0.42)	<u>1.20</u> λ_{2N} (0.39)
* Paramètres de Freeman						
H1, 8 et 14 juin	<u>1.59</u> F_{VOL} (1.51)	<u>1.99</u> F_{ODD} (1.99) F_{VOL} (1.99)	<u>1.98</u> F_{VOL} (1.93) F_{DBL} (1.28)	<u>1.86</u> F_{VOL} (1.75)	<u>0.86</u>	<u>0.44</u>
H1, 2 et 8 juillet	<u>1.54</u> F_{VOL} (1.49)	<u>1.99</u> F_{VOL} (1.60) F_{ODD} (1.51)	<u>1.83</u> F_{VOL} (1.74)	<u>1.89</u> F_{VOL} (1.78) F_{ODD} (1.24)	<u>0.44</u>	<u>0.46</u>
H1, 26 juillet et 1 ^{er} aout	<u>1.67</u> F_{VOL} (1.55)	<u>1.99</u> F_{ODD} (1.54) F_{DBL} (1.50)	<u>1.90</u> F_{VOL} (1.80)	<u>1.92</u> F_{VOL} (1.83)	<u>0.22</u>	<u>0.49</u>
H1, 12 et 18 septembre	<u>1.97</u> F_{VOL} (1.95)	<u>0.58</u>	<u>2.00</u> F_{VOL} (2.00) F_{DBL} (1.51)	<u>1.99</u> F_{VOL} (1.99)	<u>1.31</u> F_{VOL} (0.94)	<u>0.78</u>

Tableau 13.2-5 : Séparabilités entre les classes physiologiques des tourbières boisées et ouvertes vs les physiologies arborées pour les configurations A4, E1 et H1

Qu'importe les aléas de la température ou la combinaison de paramètres utilisés, les tourbières boisées ne sont pas discriminables des physiologies arborées indiquant les limitations de la bande C. Une séparabilité maximale de 1.20 est atteinte avec les paramètres de Touzi contre 1.31 avec les paramètres de Freeman (Tableau 13.2-5) alors qu'une séparabilité de 1.55 (cf §11.4) a été atteinte avec les paramètres de Touzi en bande L.

	T.ouv. [A3]	T.ouv. [A3]	T.ouv. [A3]	T.ouv. [A3]	T. boisé [A2]	T. boisé [A2]
	T. boisé [A2]	Sol dén. [D]	Mrg. [A1]	[A1-64] F.S	Mrg. [A1]	[A1-64] F.S
E2, 8 et 14 juin	Pas de solution	2.00 <i>span</i> (1.99)	1.85 λ_{1N} (1.21) λ_{3N} (1.05)	2.00 λ_{1N} (1.66) λ_{3N} (1.54)	Pas de solution	Pas de solution
E2, 2 et 8 juillet	1.57 λ_{1N} (0.84) λ_{3N} (0.78)	1.99 <i>span</i> (1.97)	1.66 λ_{1N} (0.77) λ_{3N} (0.65)	1.94 λ_{1N} (1.65) λ_{3N} (1.51)	0.27	0.78
E2, 26 juillet et 1 ^{er} août	1.63 <i>span</i> (0.80) λ_{1N} (0.75)	1.99 α_{s1} (1.66) <i>span</i> (1.66)	1.77 λ_{1N} (0.96) λ_{3N} (0.80)	1.94 λ_{1N} (1.52) λ_{3N} (1.37)	0.40	0.79
E2, 12 et 18 septembre	1.91 <i>span</i> (1.77)	0.99 λ_{2N} (0.40)	1.99 <i>span</i> (1.99)	1.99 <i>span</i> (1.97) λ_{1N} (1.59)	1.09 <i>span</i> (0.49)	1.23 λ_{1N} (0.55)

Tableau 13.2-6 : Séparabilités entre les classes physiologiques des tourbières boisées et ouverte vs les physiologies arborées pour la configuration E2

13.3. Résumé

(Section 13.1) ■ Les paramètres de structure de la décomposition de Touzi (config. B1) offrent de meilleures séparabilités que les canaux de polarisation (A4) (Tableau 13.1-1). L'introduction du *span* au côté des paramètres de structure (B2) améliore fortement les séparabilités observées. ■ L'introduction des paramètres de la seconde (E1) et troisième composante (E3) permet d'augmenter progressivement les séparabilités pour les quatre paires d'images observées même si ces augmentations sont parfois marginales. Le principal bénéfice de l'ajout des 2^e et 3^e composantes semble être le maintien des séparabilités moyennes totales au cours de l'été par une meilleure prise en compte de l'effet de la rétrodiffusion volumique ou multiple. (Section 13.2) ■ Le point faible des canaux de polarisation concerne surtout les séparabilités entre les classes physiologiques des marais ([H1] et [H2]) et les physiologies arborées et arbustives ([A1], [A2]) qui n'est au mieux que moyenne. Seule la classe [h1] présente une séparabilité parfaite en juillet (*d.t.* >1.9) (Tableau 13.2-1 et 13.2-2). ■ Une très bonne séparabilité (*d.t.* 1.7) entre les classes [H1], [H2] et [h1], [A1] et [A3] est atteinte pour au moins une des quatre paires d'images avec les paramètres de Touzi (Tableau 13.2-1 et 13.2-2) mais : → Les marécages arborés et arbustifs ne sont pas discriminables avec les

données RS2 quelque soit la date ou la configuration de paramètres utilisée ; →il est également impossible de discriminer les marécages arborés des physionomies arborées sur substrat sec après le mois d'avril et → Les tourbières boisées ([A2]) ne sont pas séparables des autres physionomies arborées quelque soit la date ou la combinaison de paramètres utilisés. ■ Autant pour les canaux de polarisation, les paramètres de Touzi et ceux de Freeman, les séparabilités intraclasse sont généralement plus faibles que les séparabilités entre les classes physionomiques, signe que le regroupement des espèces végétales en classes physionomiques est un concept qui se tient. ■ La séparabilité entre les milieux secs et les milieux humides repose essentiellement pour une même classe physionomique repose essentiellement sur α_{s1} , $span$, $\Phi_{\alpha s1}$ ainsi que λ_{1N} et λ_{2N} (Tableau 13.2-4). ■ En ce qui concerne la séparabilité entre les tourbières ouvertes ([A3]) et boisées ([A2]) vs les physionomies dénudées ([D]) et arborées ([A1]), elle repose essentiellement sur les paramètres λ_{1N} et λ_{2N} et le $span$ (et par extension sur λ_{3N}) (Tableau 13.2-5). Il n'est pas étonnant de retrouver σ_{hv}^0 et F_{VOL} comme principale pour les canaux de polarisation et la décomposition de Freeman pour ces mêmes classes. → La mesure de σ_{hv}^0 est donc cruciale. On remarque que la séparabilité entre les tourbières ouvertes ([A3]) et les physionomies dénudées ([D]) passe de parfaite à mauvaise lorsque les conditions météorologiques sont très sèches indiquant un *noise floor* plutôt élevé pour RS2 en mode polarisé fin.

CHAPITRE 14

14. ANALYSES PAR CLASSIFICATIONS

Le but de ce chapitre est de présenter nos analyses par classifications utilisant les données multitemporelles RS2 FQ15-A couvrant le secteur des Îles de Sorel. Seul ce secteur a été choisi vu la disponibilité de la carte du Centre Saint-Laurent. La section 14.1 portera sur le développement d'un arbre hiérarchique de classification des physionomies végétales. Le développement de cet arbre hiérarchique constituera une synthèse des connaissances acquises au cours de cette recherche, notamment en ce qui a trait au choix des paramètres de décomposition de Touzi. De plus, les résultats de cette classification seront comparés à une classification par maximum de vraisemblance (MLC) basée sur deux images Landsat-5 acquises la même année. La section suivante (14.2) portera sur le développement d'une classification supervisée des physionomies végétales par une Machine à vecteurs de support (SVM). L'objectif de cette section sera de déterminer si une plus haute dimensionnalité (c.-à-d. plus de paramètres) permet d'obtenir une meilleure classification des physionomies végétales par rapport à l'arbre hiérarchique de classification basé sur un sous-ensemble de paramètres.

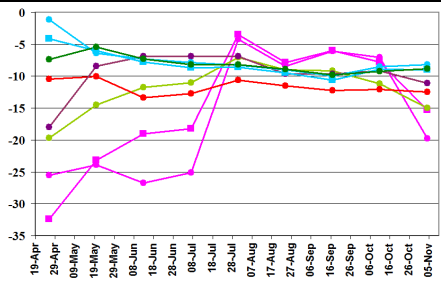
14.1. Classification hiérarchique pour la série FQ15-A

14.1.1. Développement d'un arbre hiérarchique

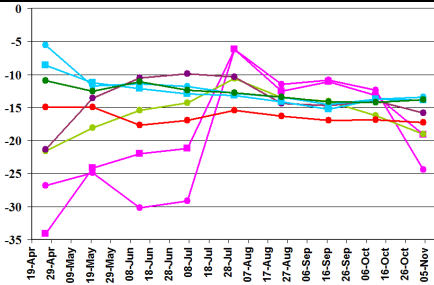
Les signatures saisonnières de chaque classe physionomique ont été présentées individuellement au chapitre 12. Pour faciliter le repérage des images, des paramètres et des seuils importants pour la discrimination des physionomies végétales, les signatures saisonnières ont été regroupées et comparées par paramètre (Figure 14.1-1). Les classes physionomiques ont été conservées pour la classification hiérarchique à l'exception de la classe herbacée haute 2 qui a été divisée en deux classes soit la classe de Zizanie ([H2-21]) et de Phalaris ([H2-88]). Les analyses précédentes ont en effet démontré qu'il est nécessaire de respecter la démarcation entre hauts et bas marais lors du regroupement des espèces végétales.

Deux espèces de Scirpes de la classe herbacée haute 1 ([h1]) sont présentées bien qu'elles aient été classifiées ensemble. Il s'agissait, en contrepois de la classe [H2], de démontrer que le regroupement par physionomie est valide même lorsqu'il y a présence d'une variabilité intraclasse.

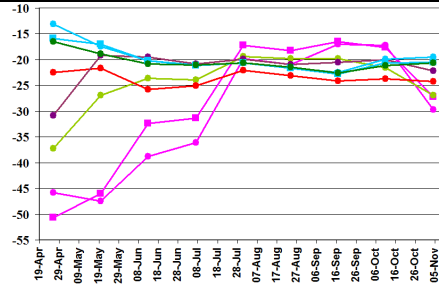
La comparaison des signatures saisonnières met en évidence deux périodes. La première période correspond au printemps et au début de l'été durant laquelle les physionomies montrent le maximum de variabilité dû à la présence de mécanisme de rétrodiffusion bien définis lors de l'émergence. La deuxième période, correspondant à l'été et au début de l'automne, présente une homogénéisation des signatures. Cela est attribuable au développement de la biomasse aérienne qui fait augmenter la proportion de la rétrodiffusions volumique et multiple, à l'exondation de plusieurs sites et à l'homogénéisation de la densité dans les bas marais (nb de tiges par m²). Ces signatures mettent en évidence que la classification des milieux humides sera favorisée par des images acquises durant la première période alors que le suivi de ces milieux à l'aide de paramètres biophysiques (suivi de la biomasse) se fera au cours de l'été. Quatre acquisitions de la série FQ15-A ont été retenues pour le développement de l'arbre hiérarchique de classification : 27 avril, 21 mai, 14 juin et le 1^{er} août.



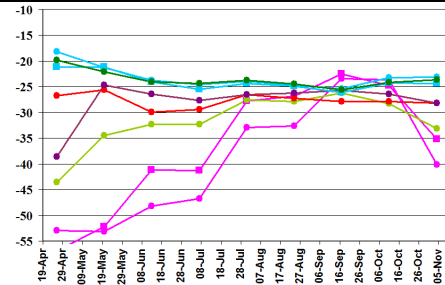
(A) span (dB)



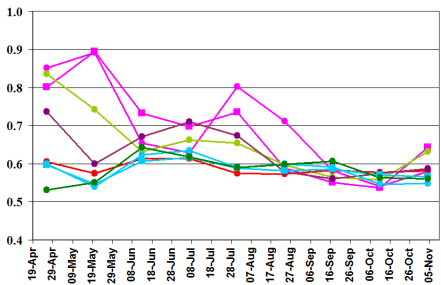
(B) λ_1 (dB)



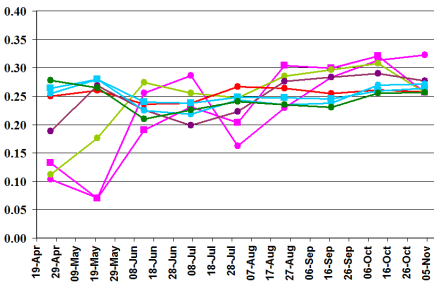
(C) λ_2 (dB)



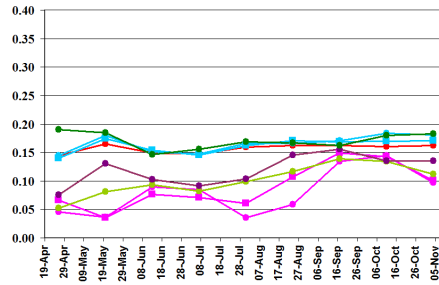
(D) λ_3 (dB)



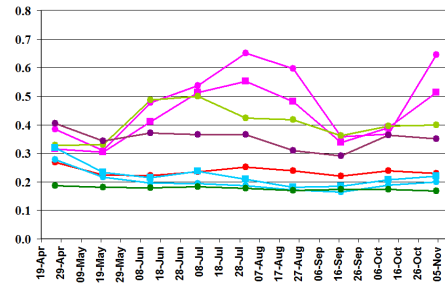
(E) λ_{1N}



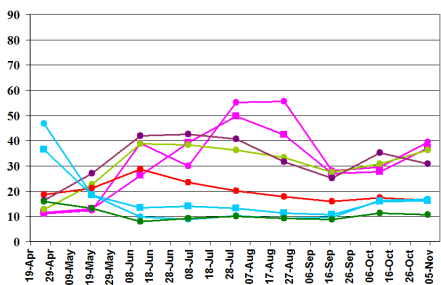
(F) λ_{2N}



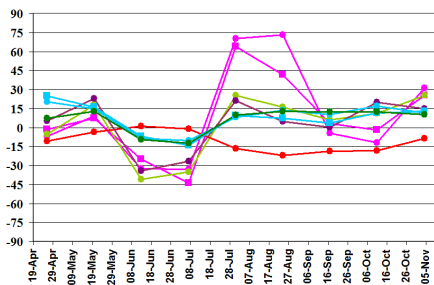
(G) λ_{3N}



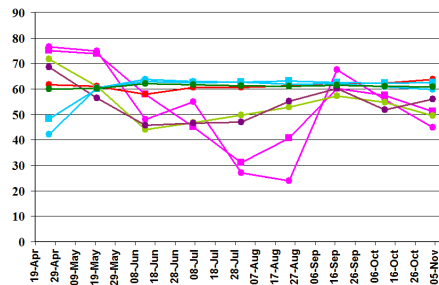
(H) Anisotropy



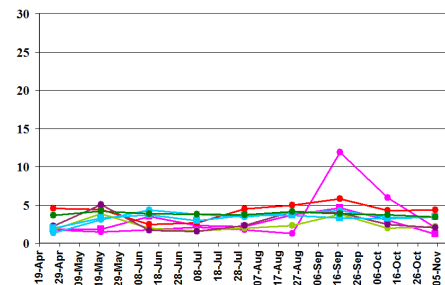
(I) α_{s1}



(J) $\Phi_{\alpha s1}$



(K) α_{s2}



(L) $|\psi_1|$

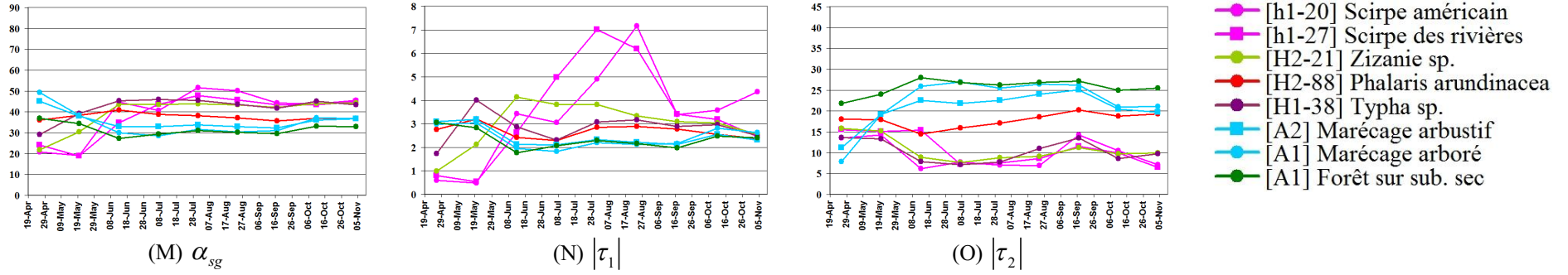
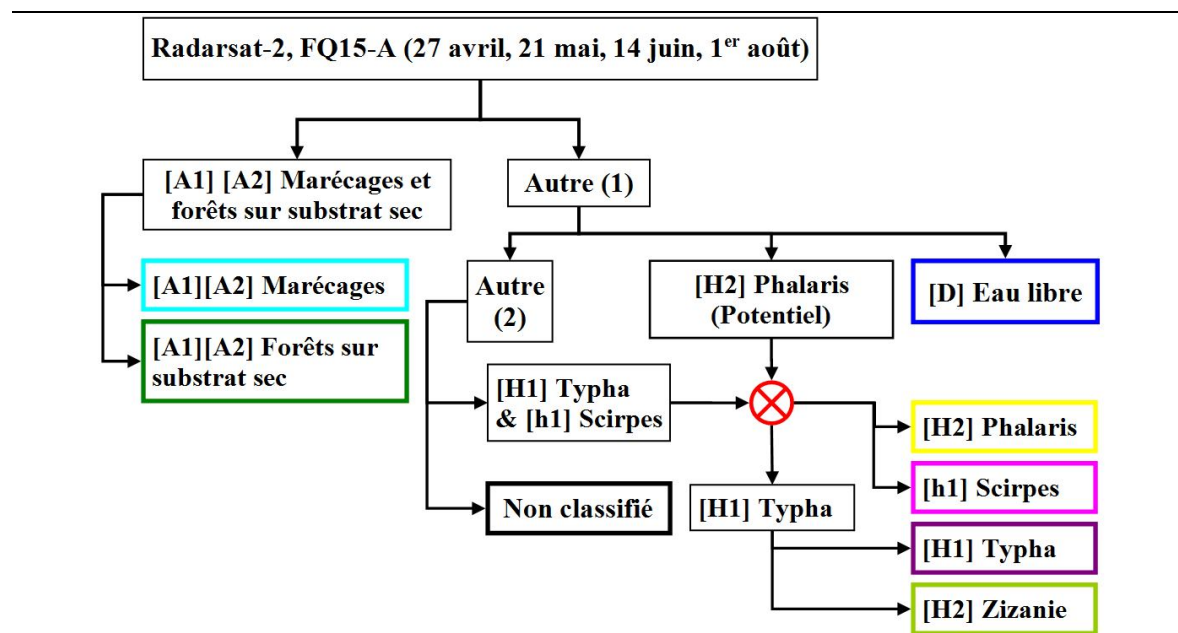


Figure 14.1-1 : Signatures saisonnières comparatives des physionomies végétales du Lac Saint-Pierre par paramètre polarimétriques, série FQ15-A

L'arbre hiérarchique de classification est présenté à la Figure 14.1-2. La classification progresse comme suit : a) séparation des secteurs occupés par les physionomies arborées ou arbustives du reste avec séparation subséquente des marécages et des forêts sur substrat sec; b) dans les secteurs exclus à la première étape (Autre 1), identification des sites potentiels de Phalaris avec séparation de secteurs couverts par l'eau libre ainsi que les bas marais (Autre 2); c) identification des différentes physionomies des bas marais à l'intérieur du masque défini à l'étape précédente (Autre 2). Ces étapes sont décrites par la suite en détail.



Paramètres importants :

- i. Marécages vs Forêts sur substrat sec : λ_3 (4 images) et α_{s1} (27 avril)
- ii. Phalaris (*Phalaris arundinacea*): $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (27 avril et 1er août) & λ_{1N} (4 images)
- iii. Zizanie: α_{s1} (27 avril et 21 mai)
- iv. Typha vs Scirpes : α_{s1} (1^{er} août), *span* (4 images) & $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (1^{er} août)

Figure 14.1-2 : Arbre hiérarchique de classification

Étape 1 : Marécages et forêts sur substrat sec

La localisation de l'ensemble des secteurs de physionomies arborées ou arbustives ([A1], [A2]) fut basée sur la présence d'une forte composante volumique et multiple et sur la stabilité de leur signature saisonnière tout au long de la saison de croissance. La troisième valeur propre (Figure 14.1-1-D) a offert le meilleur potentiel pour identifier ces physionomies et un

masque correspondant à $\lambda_3 \geq -24\text{dB} \cup \lambda_3 \geq -24\text{dB} \cup \lambda_3 \geq -26\text{dB} \cup \lambda_3 \geq -26\text{dB}$ pour les images du 27 avril, du 21 mai, du 14 juin et du 1^{er} août respectivement, a été créé.

La distinction entre marécages et forêt sur substrat sec a ensuite été établie par le seuillage du paramètre α_{sI} . La limite entre les marécages et les forêts sur substrats secs correspond plus à un gradient (transition) qu'à une frontière nette de sorte que la valeur du seuil utilisé a un impact direct sur la superficie occupée par chacune de ces classes. Pour l'image du 27 avril, le seuil $\alpha_{sI} \geq 30^\circ$ (Figure 14.1-1-I) a permis d'obtenir la meilleure carte possible des marécages par comparaison visuelle avec la vérité terrain. Quelques signatures temporelles ont présenté un écart entre les marécages arborés ([A1]) et arbustifs ([A2]) au printemps. Les marécages arborés, composés principalement de peuplements d'érables argentés (*Acer Saccharinum*) dont les troncs hauts, larges et espacés, produisent en moyenne de plus fortes valeurs de α_{sI} et de *span* comparativement aux marécages arbustifs composés de peuplements denses d'Aulne (*Alnus sp*) ou de Saule (*Salix sp.*) aux troncs très ramifiés. Cependant, aucun paramètre ou combinaison de paramètres n'a permis d'établir une distinction claire après seuillage entre ces deux physionomies. Il est à noter que la classification du Centre Saint-Laurent présentait aussi une certaine confusion entre les marécages arbustifs et arborés. Pour résoudre ce problème, les auteurs de cette carte ont eu recours à une interprétation visuelle des images Ikonos possible grâce à la fine résolution spatiale de ces images (4m).

Étape 2 : Sites potentiels de Phalaris, bas marais et eau libre

La localisation des sites potentiels de Phalaris ([A2-88]) fut aussi basée sur la stabilité saisonnière de sa signature et l'absence de rétrodiffusion dipolaire ou double bond. Cette carte a été formée de tous les pixels identifiés par $\Phi_{\alpha_{sI}} < 5^\circ \cup \lambda_{IN} < 0.70$ pour les quatre retenues en excluant les pixels déjà identifiés comme étant des marécages ou des forêts sur substrat sec. La carte comportait à cette étape une erreur de commission importante afin de ne pas omettre de larges secteurs de cette plante envahissante dont le suivi est primordial. Une confusion est aussi noté à cette étape entre le Phalaris ([A2-88]) et les physionomies herbacées des milieux agricoles, en particulier les céréales (blé, avoine) et les fourrages (foin) ce qui reflète la volonté de ne pas utiliser de données auxiliaires. Cette confusion peut être réglée en bonne partie par le contexte au sens où il est généralement aisé pour un interprète de distinguer un

secteur agricole d'un milieu humide.

Les pixels n'appartenant pas aux sites potentiels de Phalaris ont par la suite été évalués afin de séparer les bas marais (incluant les sites de Typha ([H1]), de Scirpes ([h1]) et de Zizanies ([H2-88])) de l'eau libre. Le paramètre α_{s1} a été l'élément déterminant pour cette étape. Divers seuillages des 4 images utilisées ont montré qu'il est possible d'identifier les secteurs de bas marais soit par l'absence de végétation au printemps ou par la détection de la rétrodiffusion dipolaire au cours de l'été. Le recours aux images du printemps comporte cependant deux désavantages. Le premier étant que certains secteurs de bas marais où la végétation de l'année précédente est encore émergente se confondent avec les marécages. Le second désavantage étant que la limite entre le bas marais et l'eau libre peut être difficile à déterminer. Le seuil correspondant à $\alpha_{s1} > 20^\circ$ pour l'image du 1^{er} août a été suffisant pour extraire l'ensemble des bas marais. Un seuillage de α_{s1} pour les images du 21 mai et du 14 juin a été utilisé pour éliminer la confusion avec les milieux agricoles. Au cours de cette étape, une partie des pixels initialement attribués à la carte de potentiel du Phalaris ont été réattribués au masque de bas marais basé sur la faible probabilité du Phalaris à être caractérisé par une rétrodiffusion dipolaire ou double bond.

En résumé, après cette opération nous avons obtenu quatre « masques » : a) le masque définitif avec les sites de Phalaris; b) le masque définitif de l'eau libre; c) le masque des bas marais qui a été traité par la suite pour identifier les sites occupés par différentes classes de végétation, ainsi que; d) un masque comprenant surtout les milieux agricoles (indiqué Non classifié dans la Figure 14.1-2).

Étape 3 : Classes des bas marais

Les pixels sous le masque des bas marais ont été traités afin de différencier dans un premier temps les bas marais à Scirpe des bas marais à Typha. La phase $\Phi_{\alpha s1}$ (Figure 14.1-1-J) s'est montré être le meilleur paramètre pour discriminer ces deux classes. En utilisant la classification du Centre Saint-Laurent (CSL) comme guide visuel, le seuil de $\Phi_{\alpha s1} \geq 40^\circ$ a été

utilisé pour identifier les secteurs de bas marais à Scirpes [h1], les pixels sous ce seuil ont été attribués à la classe des bas marais à Typha ([H1-38]). À l'instar de la distinction entre marécages et forêts sur substrat sec, la distinction entre les classes [H1] et [h1] s'apparente plus à un gradient qu'à une frontière nette et le choix de la valeur du seuil possède un effet significatif sur la superficie occupée par chaque classe respective.

Finalement, la dernière opération consista à identifier les secteurs de Zizanies ([H2-21]) sous le masque des bas marais à Typha ([H1]). Selon les données disponibles, seule l'émergence tardive de cette espèce par rapport au Typha pouvait être utilisée comme critère de discrimination. Le meilleur résultat a été obtenu avec le type global de rétrodiffusion symétrique (α_{sg} , Figure 14.1-1-M) avec un seuil correspondant à $\alpha_{sg} < 23^\circ$ (27 avril) \cup $\alpha_{sg} < 35^\circ$ (21 mai). Il est intéressant de noter que la séparabilité maximale entre ces deux classes a été obtenue avec α_{sg} et non pas avec α_{s1} . Cela s'explique par la tendance de l'angle α_{s2} à être complémentaire de α_{s1} ce qui a pour effet de centrer α_{sg} vers 45° lorsque la seconde composante (λ_2) contribue significativement à α_{sg} . Cet effet d'aplatissement sur les signatures introduit par la somme pondérée est visible à la Figure 14.1-1-M. Pour le Typha ([H1]) c'est la plus contribution de λ_2 et λ_3 ($\lambda_{2N} = 0.27$ et $\lambda_{3N} = 0.13$) comparé à la Zizanie en émergence ($\lambda_{2N} = 0.18$ et $\lambda_{3N} = 0.08$) qui a créé l'écart entre leurs valeurs α_{sg} respectives le 21 mai.

Mentionnons finalement qu'une classification supervisée par maximum de vraisemblance (MLC) a été réalisée sur deux images Landsat-5 (14 avril et 19 septembre 2009). Cela fut fait afin d'obtenir une base de comparaison à la classification hiérarchique RS2 pour la même année et à une résolution spatiale équivalente.

14.1.2. Interprétation des résultats

La Figure 14.1-3 présente la classification finale obtenue avec les images Landsat-5 et RS2 alors que les Figure 14.1-4 à 14.1-6 comparent en détail ces deux classifications pour trois sites particuliers (Figure 14.1-3-A). L'un des premiers points de comparaison concerne la superficie occupée par les marécages sur la classification RS2 qui apparaît être sous-estimée

par rapport à la classification CSL (Figure 14.1-3 et Figure 14.1-4). Mentionnons que la classification CSL a utilisé la carte écoforestière du Québec comme donnée auxiliaire et que cette carte utilise des critères comme la probabilité d'inondation sur 20 ans, le type de sol ou d'essence forestière pour établir la limite entre marécages et forêt sur substrat sec. Évidemment, ces critères influencent peu ou pas le signal radar.

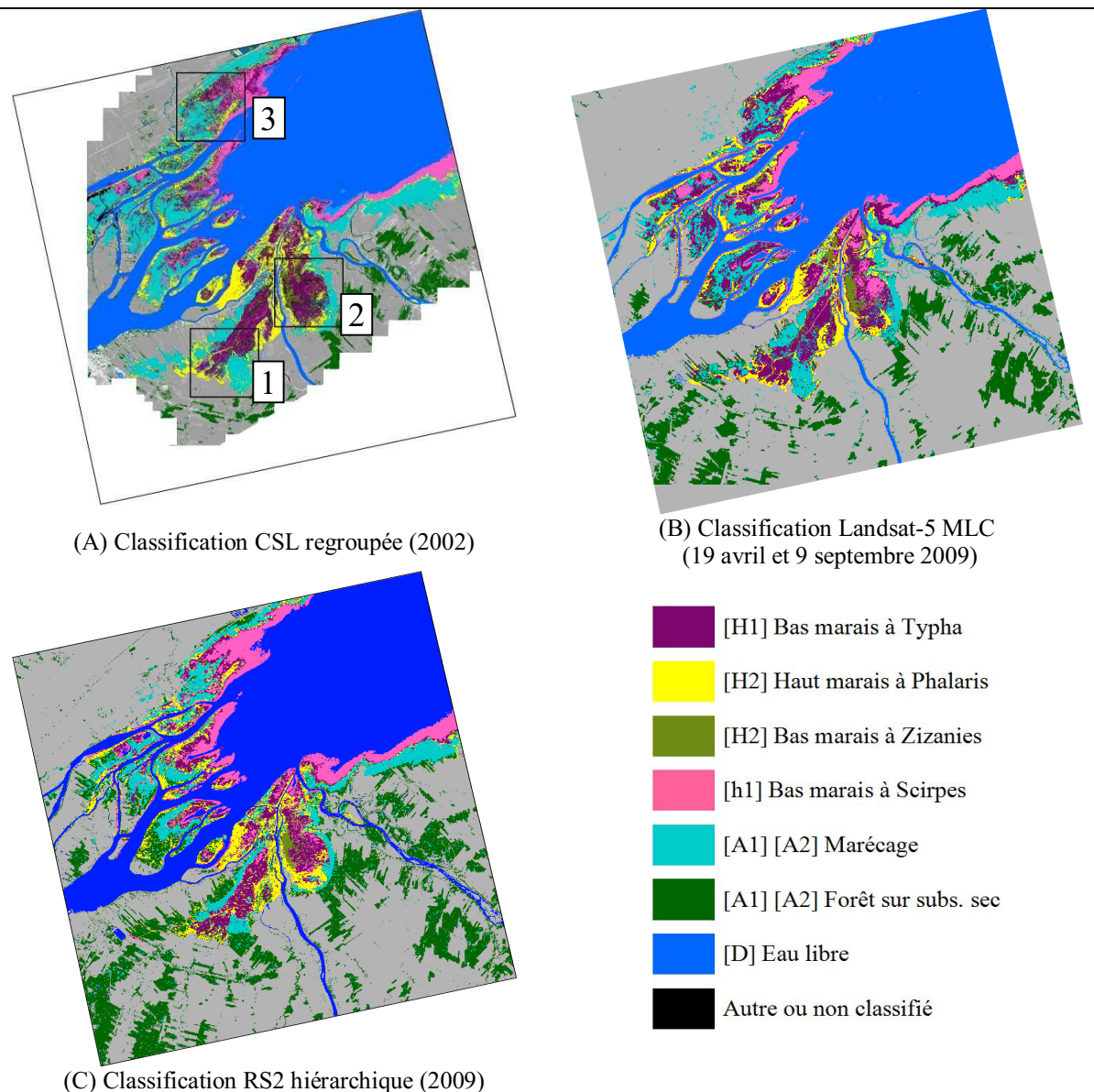


Figure 14.1-3 : Classification finales

Pour le radar, la distinction entre marécages et milieux secs dépend du périmètre d'inondation ou d'un substrat saturé qui entraînent à la hausse les canaux de polarisation et le paramètre α_{s1} .

Mais dans l'ensemble, les marécages et les forêts sur substrat sec ont été relativement bien classifiés (et sans recours à des données auxiliaires) autant pour la classification RS2 que la classification Landsat-5 dans la mesure où la confusion se situe entre ces deux classes et non avec les autres classes physiologiques (Tableau 14.1-1). La classification RS2 a offert de meilleurs résultats que la classification Landsat-5 avec un taux de succès de 71.06% vs 62.4% (Tableau 14.1-1). Comme les signatures saisonnières l'ont laissé entrevoir, aucune distinction satisfaisante n'a pu être établie entre les physiologies arborées et arbustives d'où leur regroupement en une seule classe.

Le Phalaris ([H2-88]) a été bien classifié avec un taux de succès de 82.61% pour la classification hiérarchique RS2 (Tableau 14.1-1). Quelques secteurs de Phalaris n'ont pu être classifiés (4.12%) ou ont été confondus avec les forêts sur substrat sec [A1-65] lorsqu'il y a des clairières. Une légère confusion est aussi notée avec le Typha [H1-38], notamment dans la partie sud de la Baie Saint-François (Figure 14.1-4) probablement attribuable à une exondation complète de ce secteur au cours de la saison 2009. Un changement temporel permanent entre 2002 et 2009 n'est pas la cause ici puisque ce secteur a été correctement classifié avec les images Landsat-5, le Phalaris possédant une teinte blanchâtre caractéristique au printemps ce qui facilite sa classification (97.05%, Tableau 14.1-1). La classe [h1] a été très bien classifiée avec un taux de succès de 96.10% comparativement à 75.09% pour la classe [H1]. Ces résultats sont comparables ou mieux que ceux obtenus avec la classification Landsat-5 avec des taux de 90.5% ([h1]) et 72.6% ([H1]) (Tableau 14.1-1). Le fort taux de classification de la classe [h1] est ici attribuable à un seuillage de α_{s1} «plus bas que haut» ce qui a résulté en une surestimation de l'abondance du Scirpe (Figure 14.1-5 et Figure 14.1-6, A vs C). Il aurait été possible pour les classes [H1] et [h1] de créer des sous-classes basées sur la densité en utilisant les autres paramètres polarimétriques notamment l'anisotropie (A) ou la première hélicité ($|\tau_1|$). Mais ces sous-classes n'ont de sens que si les classes du niveau supérieur sont très bien ou parfaitement délimitées.

La classification de la Zizanie reste problématique autant pour la classification RS2 que la classification Landsat-5 un taux de succès respectif de 43.23% et 65.5% et c'est sans surprise que l'on identifie la classe [H1] comme la principale source de confusion (Tableau 14.1-1). Le problème posé par la mixité des physiologies est important et concerne tout autant la

classification RS2 que la classification Landsat. Ce problème est lié tout autant à la plus faible résolution spatiale des deux capteurs par rapport à l'image Ikonos qu'à la propension de certaines espèces, ici la Zizanie, à ne pas former de grandes colonies monotypiques.

La classification RS2 présentée ici constitue néanmoins une amélioration significative par rapport à d'autres classifications plus générales du lac Saint-Pierre qui ont été proposées pour atteindre les objectifs de l'inventaire canadien des milieux humides (ICTH, Fournier *et al.*, 2007). Par exemple, Li et Chen (2005) ont utilisé deux images RS1 (C-HH, S5, mai et août) combinées à une image Landsat pour produire une classe générale de marais et une autre de marécages malgré l'utilisation de plusieurs données auxiliaires. Toujours dans le cadre de l'ICTH, Grenier *et al.* (2007) ont proposé une classification orientée objet basée sur de multiples indices dérivés des images RS1 et Landsat pour identifier les 7 classes de l'ICTH (marais, marécages, bog, fen, tourbière boisée, prairie humide et eau peu profonde). Pour ces deux études, le rôle du radar est limité à l'identification des périmètres d'inondations qui revient toujours à l'hypothèse de base selon laquelle les zones brillantes au printemps correspondent à des marécages et celles qui connaissent une augmentation brusque de leur radiométrie entre le printemps et l'été correspondent aux marais. Bien que ces classes répondent plus à un besoin d'inventaire à l'échelle nationale que de suivi, on observe tout de même une confusion importante entre marécages et marais (voir Grenier *et al.*, 2007). L'intensité de la polarisation HH (ou HV ou VV) ne permet pas à elle seule d'appréhender la complexité de la rétrodiffusion des milieux humides et seule la polarimétrie radar permet d'en saisir les multiples subtilités.

A) Classification Radarsat-2 hiérarchique (27 avril, 21 mai, 14 juin et 1 ^{er} août 2009)								
	[H2-21] Zizanie	[h1] Scirpes	[H1] Typha	[H2-88] Phalaris	[A1][A2] Mrg.	[A1][A2] Forêts	8 Eau	9- N.C
[H2-21]B.M. Zizanie sp.	<u>47.23</u>	18.68	26.76	3.72	0.00	0.00	2.26	1.35
[h1] B.M. à Scirpes	0.17	<u>96.10</u>	2.58	0.00	0.00	0.00	1.07	0.08
[H1] B.M. à Typha sp.	3.77	13.42	<u>75.09</u>	6.34	0.31	0.02	0.09	0.96
[H2-88] H.M. à Phalaris	0.75	0.84	6.49	<u>82.61</u>	1.91	2.94	0.34	4.12
[A1] [A2] Marécages	0.00	0.12	0.54	0.52	<u>71.06</u>	27.02	0.00	0.74
[A1] [A2] Forêts subs. secs	0.00	0.06	0.30	0.41	5.45	<u>91.82</u>	0.00	1.96
Précision globale : 77.3%								
B) Classification Landsat-5 MLC (19 avril et 10 septembre 2009)								
	[H2-21] Zizanie	[h1] Scirpes	[H1] Typha	[H2-88] Phalaris	[A1][A2] Mrg.	[A1][A2] Forêts	8 Eau	9- N.C
[H2-21]B.M. Zizanie sp.	<u>65.55</u>	23.41	7.02	3.01	1.00	0.00	0.00	xx
[h1] B.M. à Scirpes	0.05	<u>90.05</u>	7.81	0.64	0.00	0.00	1.44	xx
[H1] B.M. à Typha sp.	11.54	8.12	<u>72.96</u>	2.90	4.48	0.00	0.00	xx
[H2-88] H.M. à Phalaris	0.00	0.00	2.57	<u>97.05</u>	0.15	0.23	0.00	xx
[A1] [A2] Marécages	0.00	0.00	6.93	0.25	<u>62.34</u>	30.48	0.00	xx
[A1] [A2] Forêts subs. secs	0.00	0.00	0.23	0.08	13.15	<u>86.54</u>	0.00	xx
Précision globale : 79.1%								

Tableau 14.1-1 : Matrices de confusion, classification RS2 hiérarchique et Landsat-5 MLC, saison 2009, série FQ15-A

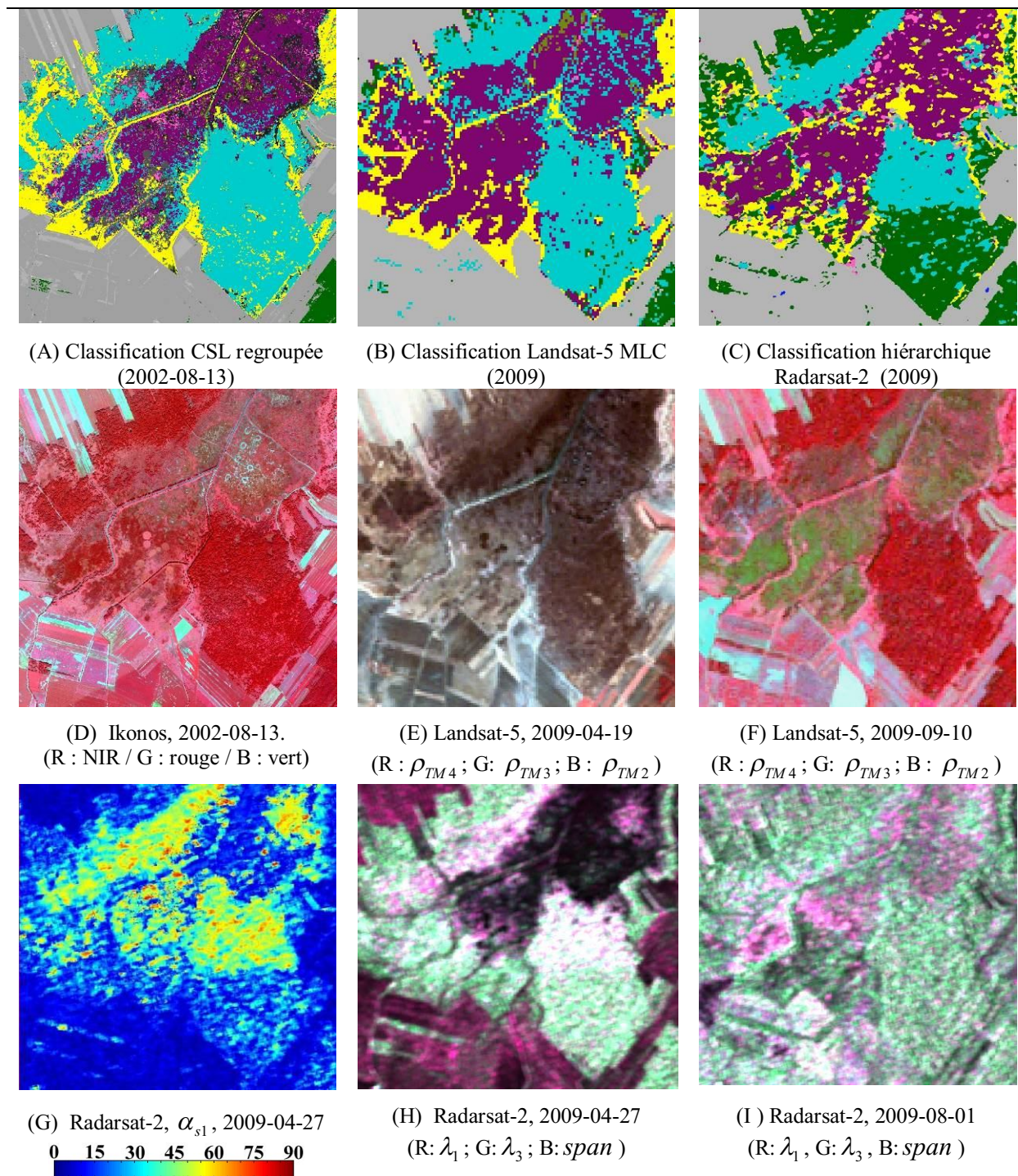


Figure 14.1-4 : Comparaison des classifications, zone 1

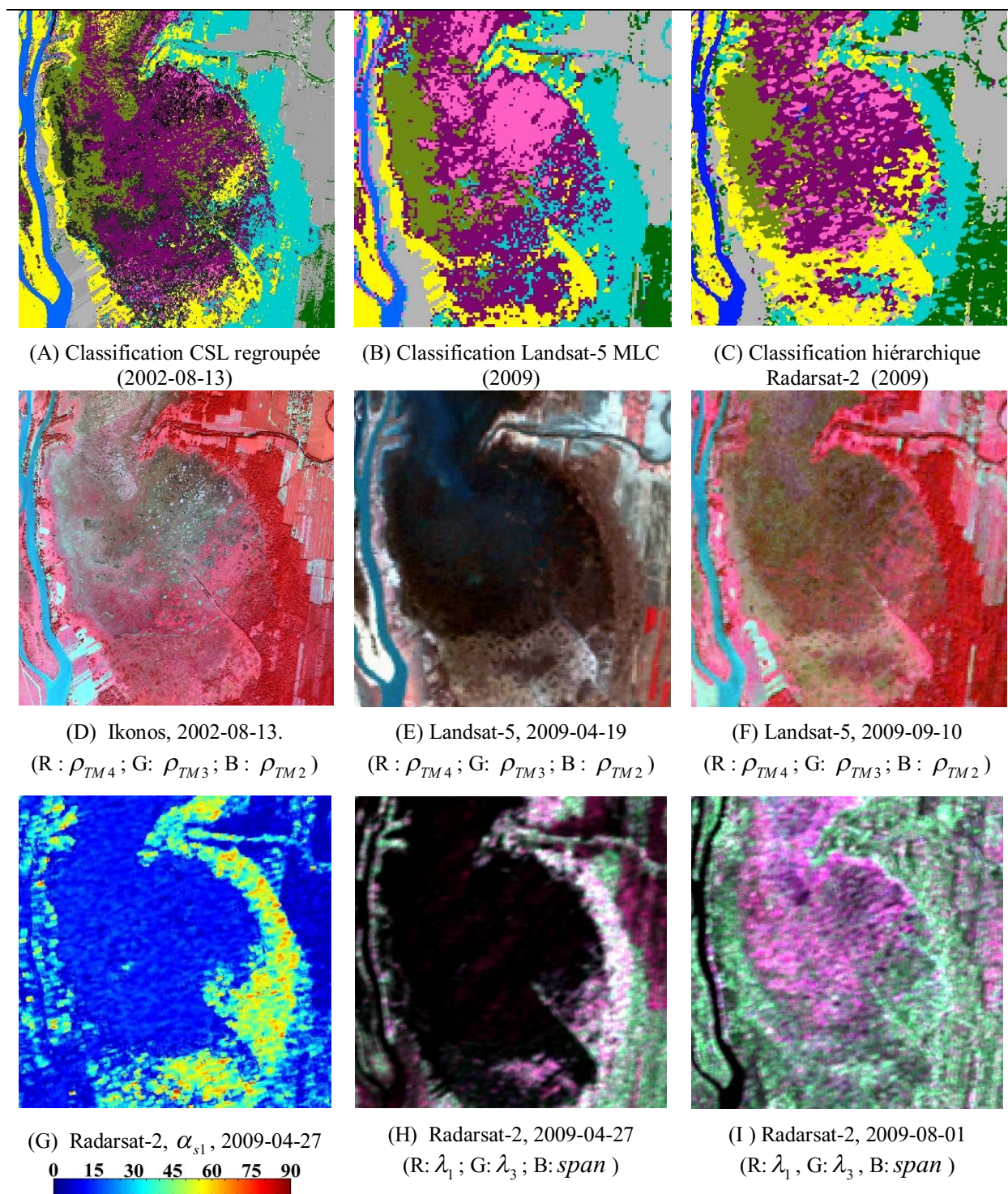


Figure 14.1-5 : Comparaison des classifications, zone 2

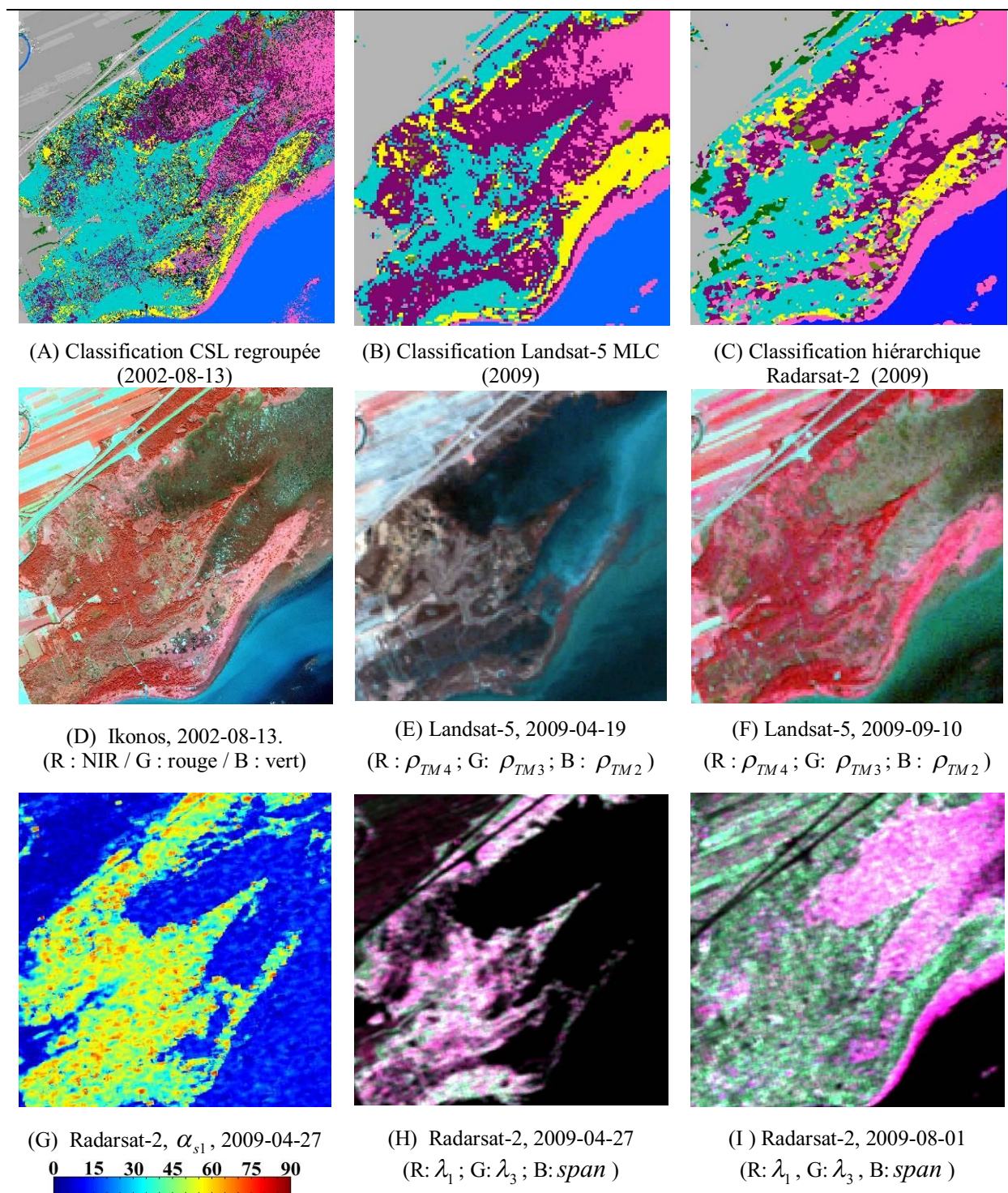


Figure 14.1-6 : Comparaison des classifications, zone 3

14.2. Classification SVM et reproductibilité des résultats

L'arbre hiérarchique présenté à la section précédente est robuste et général au sens où le processus de classification est parfaitement connu de l'utilisateur (pas de boîte noire). Cette classification est facilement applicable à d'autres jeux de données polarimétriques et en appliquant les mêmes critères, connus de l'utilisateur, on obtient des classifications comparables. De plus, les seuillages sont empiriquement déterminés ce qui convient à la classification des paramètres polarimétriques de distributions statistiques hétéroclites. Cependant les paramètres forment un espace multidimensionnel qu'il est difficile à maîtriser durant l'étape du seuillage. L'expertise de l'utilisateur permet de contourner en partie ce problème par la sélection d'un sous-ensemble de paramètres assurant à eux seuls un bon pourcentage de la séparabilité totale. Les analyses de séparabilités des classes (cf. §11.4 et §13.2) ont montré que :

- i. La séparabilité entre deux classes physiologiques évolue au cours de la saison et que le paramètre assurant le maximum de séparabilité évolue également avec le temps (également démontré avec l'analyse des erreurs d'omission et de commission (§11.1));
- ii. Le paramètre assurant le maximum de séparabilité entre deux classes ne représente souvent qu'une fraction de la séparabilité totale.

Il est donc probable que la classification des physiologies végétales sera amélioré en augmentant le nombre de paramètres utilisés lors de la classification. Le classificateur SVM a été retenu pour les raisons évoquées à la section 8.5.2 : sa nature non paramétrique, sa capacité d'opérer peu importe la forme de la distribution des classes et son pouvoir de généralisation.

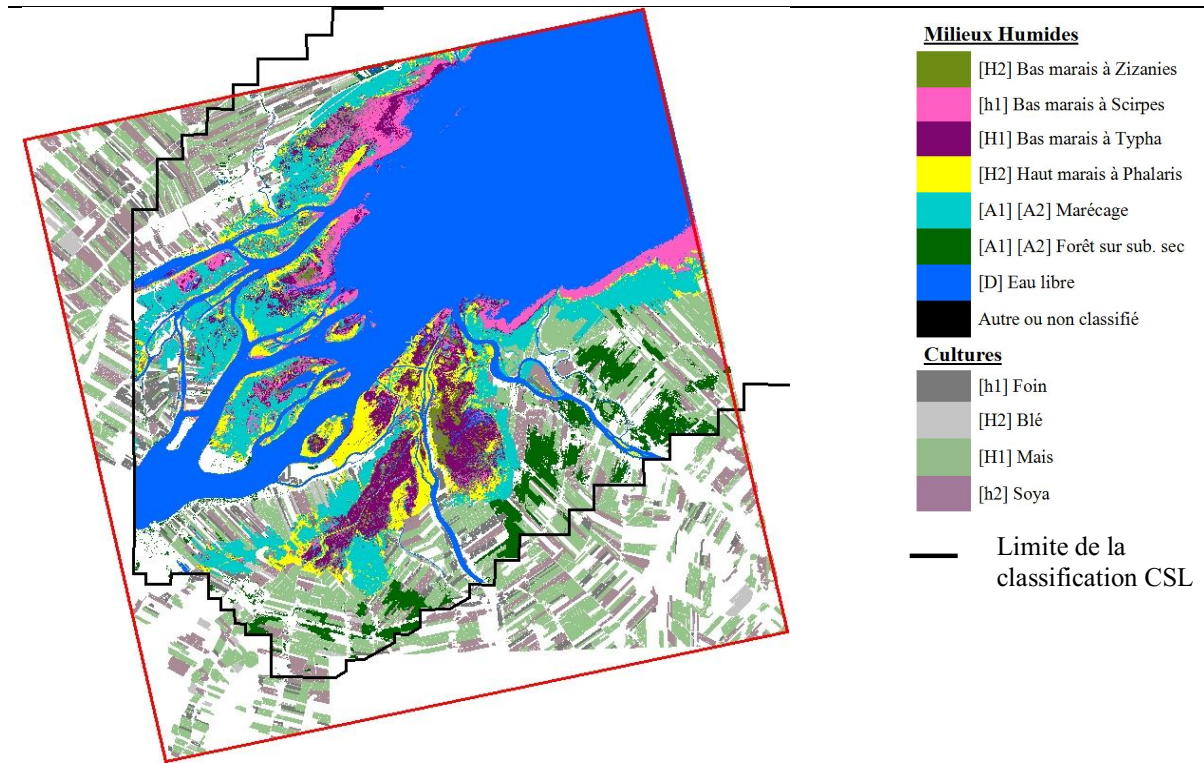


Figure 14.2-1 : Vérité terrain, Classification CSL regroupée et cultures

14.2.1. Configurations

Plusieurs combinaisons de paramètres ont été testées selon différentes configurations (Tableau 14.2-1) pour vérifier différents aspects de la classification des physionomies végétales soit :

- i. Les configurations 1A et 1B comprenant le même sous-ensemble de paramètres que ceux utilisés pour la classification hiérarchique. La configuration 1A inclura les cultures alors que la 1B n'inclura que les milieux humides et les forêts sur substrat sec.
- ii. Les configurations 1C et 1D utiliseront un plus grand nombre de paramètres pour vérifier si une dimensionnalité accrue se traduira par de meilleurs résultats. La configuration 1C sera appliquée avec des classes à la fois de cultures et de milieux humides alors que la configuration 1D ne s'appliquera que sur les milieux humides.
- iii. Les configurations 2A et 2B reposeront sur les canaux de polarisation σ_{hh}^0 , σ_{hv}^0 et σ_{vv}^0 et seront utilisées pour évaluer quel est l'apport des paramètres polarimétriques (c.-à-d. de la polarimétrie vs la multipolarisation) au problème concret qu'est celui de la classification.
- iv. Finalement, les configurations 3A et 3B reposeront sur les différentes bandes spectrales du visible et de l'infrarouge du satellite Landsat-5.

Pour conserver le coté opérationnel (et réaliste) d'une éventuelle application, seules 4 des 9 images de la série FQ15-A ont été utilisées et correspondent à celles utilisées pour le développement de la classification hiérarchique. Notons aussi que les mêmes objets d'entraînement et de vérification ont été utilisés pour l'ensemble des classes physiologiques et des configurations.

Configuration	Classes [nombre total de paramètres]	Dates et liste des paramètres
1A	Cultures et Milieux humides [28]	27 avril, 21 mai, 14 juin et 1 ^{er} août $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1 , \tau_1 , \lambda_1, \lambda_3, span$
1B	Milieux humides [28]	27 avril, 21 mai, 14 juin et 1 ^{er} août $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1 , \tau_1 , \lambda_1, \lambda_3, span$
1C	Cultures et Milieux humides [52]	27 avril, 21 mai, 14 juin et 1 ^{er} août $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1 , \tau_1 , \lambda_1, \lambda_3, span$ $\alpha_{s2}, \Phi_{as2}, \psi_2 , \tau_2 , \lambda_2, \alpha_{sg}$
1D	Milieux humides [52]	27 avril, 21 mai, 14 juin et 1 ^{er} août $\alpha_{s1}, \Phi_{as1}, \psi_1 , \tau_1 , \lambda_1, \lambda_3, span$ $\alpha_{s2}, \Phi_{as2}, \psi_2 , \tau_2 , \lambda_2, \alpha_{sg}$
2A	Cultures et Milieux humides [12]	27 avril, 21 mai, 14 juin et 1 ^{er} août $\sigma_{hh}^0, \sigma_{hv}^0, \sigma_{vv}^0$
2B	Milieux humides [12]	27 avril, 21 mai, 14 juin et 1 ^{er} août $\sigma_{hh}^0, \sigma_{hv}^0, \sigma_{vv}^0$
3A	Cultures et Milieux humides [8]	19 avril et 10 septembre $\rho_{tm2}, \rho_{tm3}, \rho_{tm4}, \rho_{tm5}$
3B	Milieux humides [8]	19 avril et 10 septembre $\rho_{tm2}, \rho_{tm3}, \rho_{tm4}, \rho_{tm5}$

Tableau 14.2-1 : Paramètres et images utilisés pour les différentes classifications SVM

14.3. Interprétation et comparaison des résultats

Si l'on ne tient compte que de la précision globale, le classificateur SVM ne se démarque pas de la classification hiérarchique, signe que la sélection manuelle des paramètres (basée sur la connaissance des signatures saisonnières) était pratiquement optimale. La configuration 1B du classificateur SVM, celle qui se compare directement avec le classificateur hiérarchique offre une performance de 77.9% comparativement à 77.3% (Tableau 14.3-1-A). L'ajout de paramètres (config. 1D) ne permet pas d'améliorer significativement la précision globale avec une performance de 79.1% (Tableau 14.3-1-C). Ce résultat est d'autant plus décevant lorsque

l'on constate que les canaux de polarisation (config. 2B) offrent une performance équivalente de 75.3%.

Configuration	Classification cultures et milieux humides		C) Classification milieux humides seulement. Précision globale pondérée
	A) Précision globale pondérée	B) Somme des confusions cultures vs milieux humides (%)	
1A	61.4%	58.2%	-- --
1B	-- --	-- --	77.9%
1C	67.4%	39.6%	-- --
1D	-- --	-- --	79.1%
2A	59.2%	88.2%	-- --
2B	-- --	-- --	75.3%
3A	57.9%	80.5%	-- --
3B	-- --	-- --	73.0%

Tableau 14.3-1 : Résultats des classifications SVM

Si l'on considère les cultures lors de la classification, le gain offert par un nombre accru de paramètres est plus évident avec une performance de 67.4% (1C) contre 61.4% (1A) pour un nombre réduit de paramètres et 59.2% pour les canaux de polarisation (2A). La prise en compte des cultures lors de la classification fait baisser la séparabilité moyenne, le maïs et le blé n'étant jamais bien classifiés (à l'exception du maïs pour la config. 1C).

Ce n'est pas tant la justesse de la classification des différents types de cultures qui importe mais de savoir si elles se confondent avec les physionomies des milieux humides. Les matrices de confusions suivantes (Tableau 14.3-2 à Tableau 14.3-5) soulignent en jaune la confusion entre les cultures et les milieux humides, la somme des pourcentages de ces zones est présentée au Tableau 14.3-1-B. Il apparaît clairement que la contribution des paramètres polarimétriques et d'une plus haute dimensionnalité se fait surtout sentir dans la discrimination entre milieux secs et milieux humides. La sommation de la confusion entre cultures et milieux humides n'est que 39.6% pour la configuration 1C contre 88.8% pour les canaux de polarisation et 80.5% pour les bandes spectrales Landsat-5. La confusion entre milieux secs et humides constitue d'ailleurs la principale faiblesse des classifications basées sur les images Landsat-5. Cela se remarque aisément par la prolifération du Phalaris dans les milieux secs (Figure 14.3-3-A). Une autre faiblesse de la classification Landsat-5 concerne le Typha qui est sous-représenté et confondu largement avec la Zizanie et les bas marais à Scirpes (Tableau 14.3-5) qu'importe si l'on tient compte des cultures (config. 2A) ou non (config. 2B).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	nb pix.
1 [h1-1] Foin	80.1	5.4	11.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.2	1.1	0.0	0.0	53019
2 [H1-2] Mais	3.2	53.7	2.8	39.7	0.0	0.0	0.3	0.0	0.2	0.0	0.0	245547
3 [H2-3] Blé	48.2	8.0	34.0	7.4	0.1	0.0	0.1	0.8	1.4	0.0	0.0	95610
4 [h2-6] Soya	5.0	20.8	1.2	72.3	0.0	0.0	0.1	0.3	0.3	0.1	0.0	193519
5 [H2-21] B.M à Zizanie	0.2	14.7	1.9	3.7	15.9	41.9	15.8	0.0	3.1	0.0	2.6	6599
6 [h1] B.M à Scirpes	0.0	2.4	0.1	0.7	0.0	95.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.7	28127
7 [H1] B.M à Typha	0.1	1.6	10.0	1.1	10.3	11.6	59.5	1.1	0.7	4.2	0.0	33468
8 [A1][A2]Forêt sub. Sec	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	97.5	0.0	2.5	0.0	10621
9 [H2-88] H.M à Phalaris	12.5	0.0	2.7	0.7	3.2	0.0	8.9	11.2	60.6	0.2	0.0	14129
10 [A1][A2] Marécages	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.2	16.1	3.7	73.4	0.0	19266
11 [D] Eau libre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	5358
	Précision globale (moyenne de la diagonale)											67.5%
	Précision globale pondérée (nb. pixels)											61.4%

Tableau 14.3-2 : Matrice de confusion, classification SVM configuration 1A

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	nb pix.
1 [h1-1] Foin	86.6	5.9	3.3	1.4	0.0	0.0	0.0	0.1	2.4	0.4	0.0	53019
2 [H1-2] Mais	1.5	72.3	0.6	25.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	245547
3 [H2-3] Blé	47.2	10.9	34.7	3.2	0.0	0.0	0.1	0.6	3.3	0.0	0.0	95610
4 [h2-6] Soya	1.6	32.6	0.4	65.2	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	193519
5 [H2-21] B.M à Zizanie	0.6	1.3	10.2	4.4	17.4	48.4	15.9	0.0	0.9	0.0	1.0	6599
6 [h1] B.M à Scirpes	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	99.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	28127
7 [H1] B.M à Typha	0.0	0.0	0.2	0.0	9.6	15.8	71.4	0.0	2.0	0.9	0.0	33468
8 [A1][A2]Forêt sub. Sec	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	98.6	0.0	1.4	0.0	10621
9 [H2-88] H.M à Phalaris	11.9	0.0	3.2	0.0	0.2	0.1	7.3	9.4	63.4	4.4	0.0	14129
10 [A1][A2] Marécages	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.4	17.3	0.5	75.5	0.0	19266
11 [D] Eau libre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	5358
	Précision globale (moyenne de la diagonale)											71.3%
	Précision globale pondérée (nb. pixels)											67.4%

Tableau 14.3-3 : Matrice de confusion, classification SVM configuration 1C

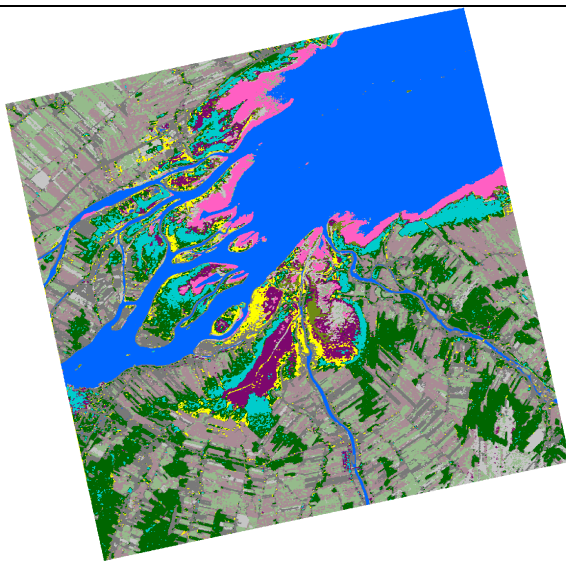
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	nb pix.
1	[h1-1] Foin	82.5	3.6	6.0	3.2	0.3	0.0	0.1	0.8	3.5	0.1	0.0	53019
2	[H1-2] Mais	6.8	48.2	1.8	42.2	0.1	0.4	0.1	0.3	0.2	0.0	0.0	245547
3	[H2-3] Blé	50.7	4.5	32.8	6.8	0.0	0.0	0.3	1.4	3.5	0.0	0.0	95610
4	[h2-6] Soya	7.5	17.0	1.3	71.5	0.0	0.1	0.2	1.7	0.6	0.1	0.0	193519
5	[H2-21] B.M à Zizanie	0.1	33.4	0.3	7.7	17.7	23.0	14.7	0.0	1.9	0.0	1.2	6599
6	[h1] B.M à Scirpes	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	98.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	28127
7	[H1] B.M à Typha	0.0	10.6	5.1	4.6	8.7	6.2	56.9	1.4	2.1	4.4	0.0	33468
8	[A1][A2]Forêt sub. Sec	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	95.7	0.1	3.6	0.0	10621
9	[H2-88] H.M à Phalaris	8.1	0.1	1.8	0.9	5.3	0.0	9.5	12.3	61.1	1.0	0.0	14129
10	[A1][A2] Marécages	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.9	20.9	1.7	70.6	0.0	19266
11	[D] Eau libre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	5358
		Précision globale (moyenne de la diagonale)											66.8%
		Précision globale pondérée (nb. pixels)											59.2%

Tableau 14.3-4 : Matrice de confusion, classification SVM configuration 2A

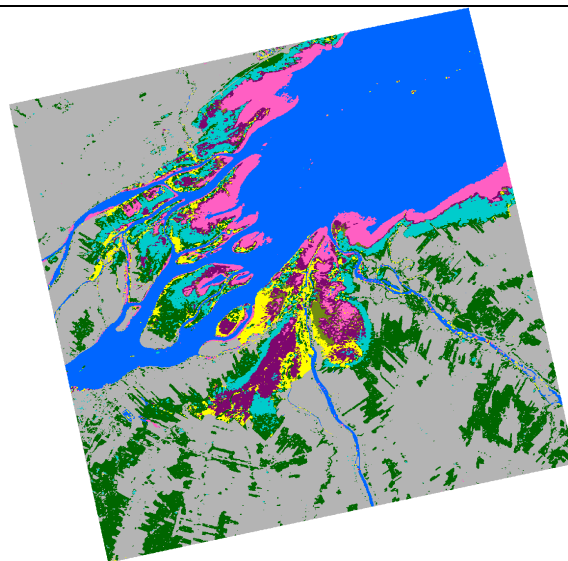
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	nb pix.
1	[h1-1] Foin	78.9	4.9	2.1	8.3	0.0	0.0	0.1	0.0	5.6	0.1	0.0	53019
2	[H1-2] Mais	0.8	53.8	2.5	20.3	0.0	0.1	0.1	0.0	19.7	2.9	0.0	245547
3	[H2-3] Blé	43.3	2.6	38.2	11.0	0.0	0.0	0.5	0.1	4.2	0.0	0.0	95610
4	[h2-6] Soya	0.6	13.3	5.7	59.7	0.0	0.3	0.2	0.0	19.7	0.5	0.0	193519
5	[H2-21] B.M à Zizanie	0.0	0.0	0.0	0.0	29.3	57.8	7.0	0.0	0.0	5.9	0.0	6599
6	[h1] B.M à Scirpes	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	92.8	0.3	0.0	0.0	0.0	6.7	28127
7	[H1] B.M à Typha	0.0	0.0	0.0	0.0	28.7	11.6	53.5	0.0	0.1	6.1	0.0	33468
8	[A1][A2]Forêt sub. Sec	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	96.3	0.0	2.6	0.0	10621
9	[H2-88] H.M à Phalaris	7.1	15.3	0.0	1.5	0.3	7.0	0.1	0.0	56.2	12.6	0.0	14129
10	[A1][A2] Marécages	0.2	0.3	0.0	1.4	2.7	0.0	23.3	0.7	4.3	67.2	0.0	19266
11	[D] Eau libre	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100.0	5358
		Précision globale (moyenne de la diagonale)											66.0%
		Précision globale pondérée (nb. pixels)											57.9%

Tableau 14.3-5 : Matrice de confusion, classification SVM configuration 3A

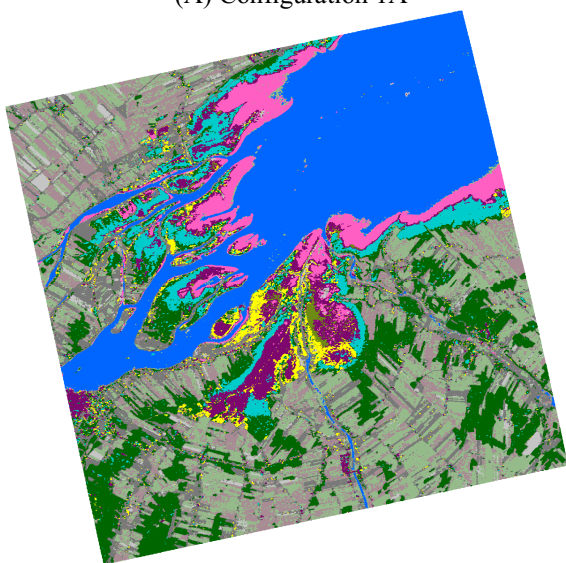
Note : résultats par lignes (somme = 100%)



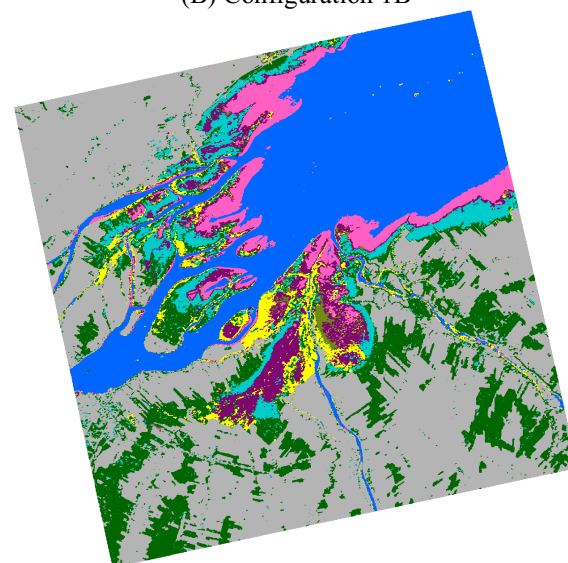
(A) Configuration 1A



(B) Configuration 1B



(C) Configuration 1C



(D) Configuration 1D

Légende pour 1A et 1C

Milieux Humides

[H2] Bas marais à Zizanies	[H2] Haut marais à Phalaris	[D] Eau libre
[h1] Bas marais à Scirpes	[A1] [A2] Marécage	Autre ou non classifié
[H1] Bas marais à Typha	[A1] [A2] Forêt sur sub. sec	

Cultures

[h1] Foin	[H2] Blé	[H1] Mais	[h2] Soya
-----------	----------	-----------	-----------

Légende pour 1B et 1D

Milieux Humides

[H2] Bas marais à Zizanies	[H2] Haut marais à Phalaris	[D] Eau libre
[h1] Bas marais à Scirpes	[A1] [A2] Marécage	Autre ou non classifié
[H1] Bas marais à Typha	[A1] [A2] Forêt sur sub. sec	Milieu sec

Figure 14.3-1 : Classification SVM, configuration 1A à 1D

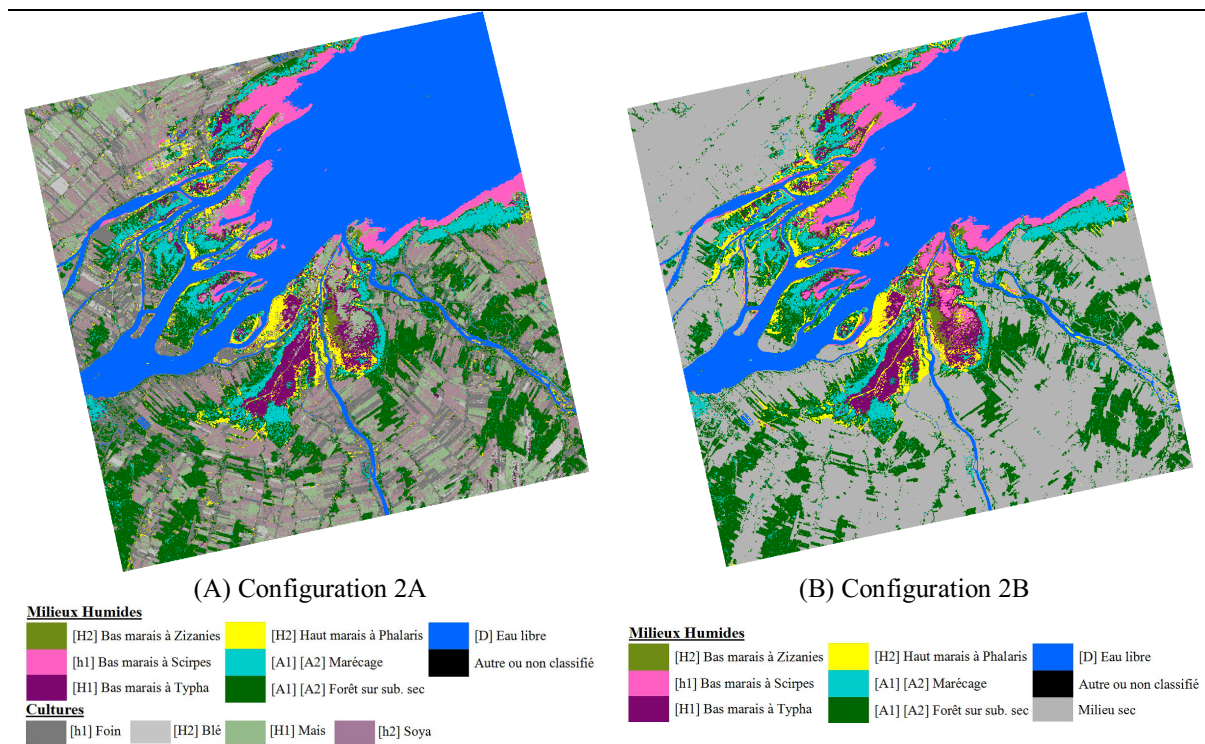


Figure 14.3-2 : Classification SVM, configuration 2A et 2B

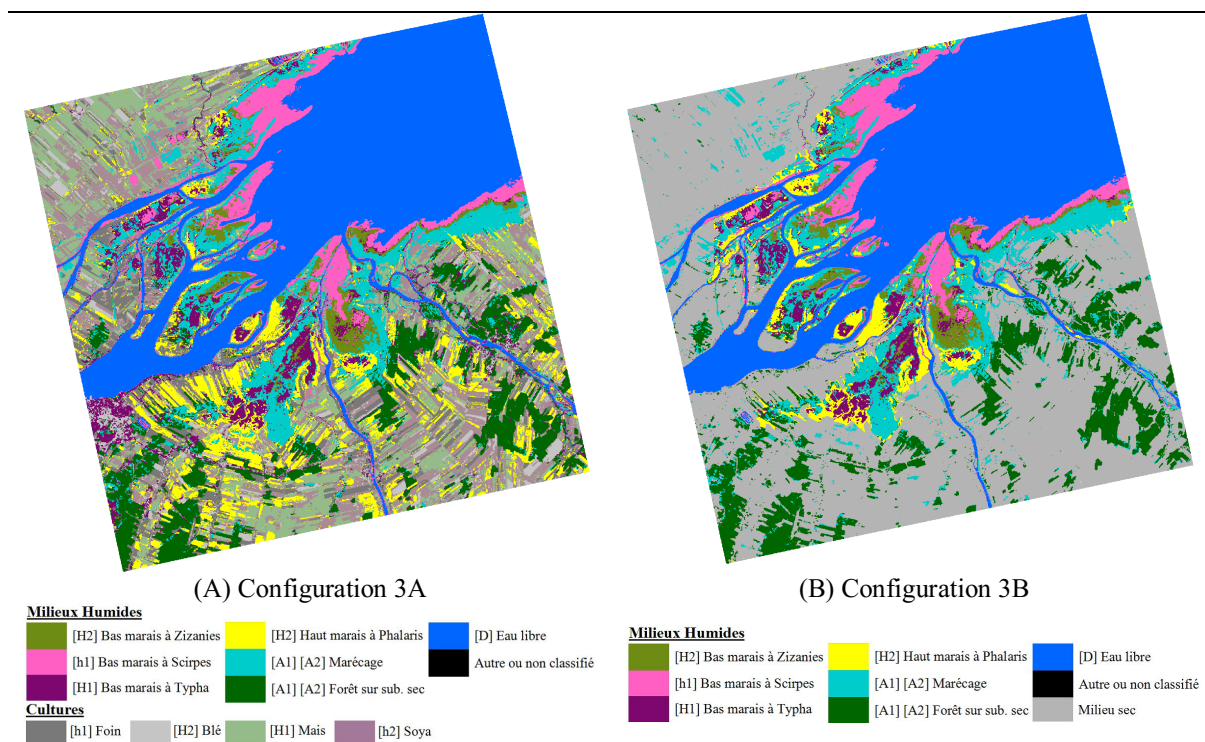


Figure 14.3-3 : Classification SVM, configuration 3A et 3B (Landsat-5)

La classification supervisée SVM (config. 1D) a offert une performance légèrement supérieure comparativement à la classification hiérarchique (79.1% vs 77.3% respectivement). Une comparaison classe par classe de ces deux classifications présente cependant des différences importantes (Figure 14.3-4, Tableau 14.3-6) qu'il convient d'examiner plus en détail.

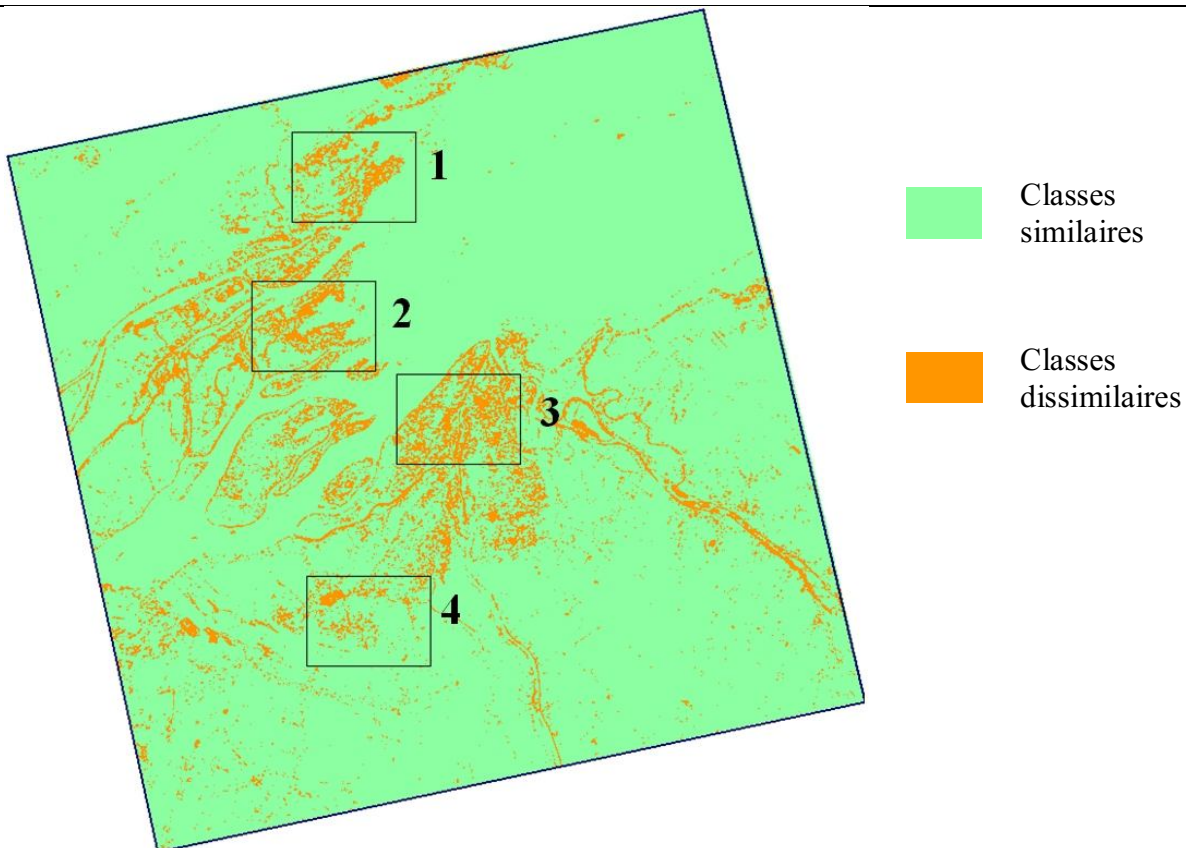


Figure 14.3-4 : Vue générale, similarité / disimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D

En comparant les deux classifications, sans référence à la vérité terrain pour l'instant, il apparaît que (Tableau 14.3-6-B):

- i. La classification hiérarchique sous-estime la superficie occupée par les forêts sur substrat sec par rapport à la classification SVM-1D (-17.41 km^2);
- ii. Elle sous-estime la superficie occupée par les bas marais à Scirpes (-4.14 km^2) ainsi que celle des bas marais à Typha (-2.98 km^2);

- iii. En contrepartie, la classification hiérarchique surestime la superficie occupée par les hauts marais à Phalaris (+3.68 km^2), l'eau libre (+10 km^2) et les diverses classes de milieux secs (+8.59 km^2).

Cette comparaison se résume donc par une surestimation apparente des milieux secs par la classification hiérarchique ou, inversement, par une surestimation de la superficie occupée par les milieux humides par la classification SVM-1D selon le point de vue.

(A) Par classe physiologique										
		1	2	3	4	5	6	7	8	nb pix
1	[H2-21] B.M à Zizanie	48.9	2.3	25.2	9.1	4.1	0.9	8.7	0.8	62944
2	[h1] B.M à Scirpes	0.3	81.6	11.9	1.5	1.6	0.6	0.2	2.3	457809
3	[H1] B.M à Typha	2.6	22.7	62.1	5.2	2.5	2.1	2.5	0.2	449518
4	[H2-88] H.M à Phalaris	1.2	1.1	19.2	46.2	21.1	8.3	2.6	0.2	407913
5	[A1][A2]Forêt sub. Sec	0.0	0.0	0.3	1.1	89.1	0.7	8.9	0.0	1407160
6	[A1][A2] Marécages	0.0	0.0	5.2	0.6	14.7	78.5	1.0	0.0	584517
7	Autre, milieux secs	0.0	0.2	0.6	0.7	4.4	1.0	93.0	0.1	4652742
8	[D] Eau libre	0.0	1.2	0.2	2.6	1.0	0.1	1.1	93.9	2831976
Lignes : classification hiérarchique, colonne :SVM-1D. Résultats par ligne (somme =100%)										
(B) Superficies occupées par classe physiologique										
	Classes physiologiques	Classif. Hiérarchique (km^2)	SVM-1D (km^2)	Différence (km^2)						
1	[H2-21] B.M à Zizanie	4.028	3.204	0.82						
2	[h1] B.M à Scirpes	29.300	33.442	-4.14						
3	[H1] B.M à Typha	28.769	31.744	-2.98						
4	[H2-88] H.M à Phalaris	26.106	22.422	3.68						
5	[A1][A2]Forêt sub. Sec	90.058	107.463	-17.41						
6	[A1][A2] Marécages	37.409	35.990	1.42						
7	Autre, milieux secs	297.775	289.187	8.59						
8	[D] Eau libre	181.246	171.244	10.00						
	Somme (km^2)	694.7	694.7	0.02						

Tableau 14.3-6 : Comparaison entre la classification hiérarchique et la classification SVM (config. 1D)

Une analyse détaillée de la correspondance entre les deux classifications montre cinq sources dominantes (>10%,³¹) de dissimilarité, soit (Tableau 14.3-6-A) :

- i. 22.7% des marais à Typha de la classification hiérarchique classifié comme étant des marais à Scirpes par la classification SVM-1D et, inversement;
- ii. 11.9% des marais à Scirpes de la classification hiérarchique rapportée comme étant des marais à Typha par la classification SVM-1D;

³¹ En excluant les bas marais à Zizanies qui ne représentent que de 3 à 4 km^2 de marais.

- iii. 19.2% des hauts marais à Phalaris de la classification hiérarchique ayant été classifiés comme étant des bas marais à Typha par la classification SVM-1D;
- iv. 21.1% des hauts marais à Phalaris de la classification hiérarchique ayant été classifiés comme étant des forêts sur substrat sec par la classification SVM-1D;
- v. 14.7% des marécages arborés de la classification hiérarchique ont été classifiés comme étant des forêts sur substrat sec par la classification SVM-1D.

Des dissimilarités précédentes, la confusion entre les bas marais à Scirpes ([h1]) et les bas Marais à Typha ([H1]) apparaît être secondaire. Ce problème est lié au phénomène du gradient entre ces deux classes physiologiques où l'utilisateur, ou encore l'algorithme, doit déterminer arbitrairement une valeur seuil pour séparer ces deux classes, certes différentes, mais se recoupant dû à la variabilité naturelle de ces dernières en termes de hauteur, densité et de mixité (problème augmentant de pair avec la résolution spatiale). La Figure 14.3-5 présente un exemple de cette dissimilarité pour laquelle la superficie des bas marais à Scirpes est clairement surévaluée par la classification SVM-1D (image C vs B et D). Le même phénomène est aussi observé à la Figure 14.3-6 pour laquelle quelques secteurs de bas marais à Typha sont absents sur la classification SVM-1D.

La dissimilarité observée entre les marécages et les forêts sur substrat sec est également un problème de gradient reposant sur le choix (plus ou moins arbitraire) de la valeur à seuiller pour un paramètre spécifique. Pour la classification hiérarchique, la valeur de seuillage de α_{s1} a été directement établie en fonction d'une comparaison visuelle avec la classification CSL. La même explication s'applique à la distinction entre marécages et forêts sur substrat sec. Concernant les 14.7% de marécages arborés classifiés comme forêt sur substrat sec par la classification SVM-1D, il ne s'agit pas d'erreur de classification concernant de grandes zones. Il s'agit plutôt d'une accumulation de petites zones mal classifiées liées à la plus grande généralisation de la classification SVM (c.-à-d. une classification moins pixelisée que celle de l'arbre hiérarchique) et à l'effet de seuil discuté précédemment. Visuellement, la similarité entre la classification SVM-1D et la classification hiérarchique est grande comme en témoigne la Figure 14.3-8 où les deux classifications ont tracé la limite entre marécages et forêts sur substrat sec au même endroit (C vs D).

La dissimilarité observée entre les hauts marais à Phalaris ([H2]), bas marais à Typha [H1]) et forêts sur substrat sec ([A1, A2]) est plus problématique tant sur le plan écologique que méthodologique. Sur le plan écologique car c'est une espèce envahissante dont le suivi est important et méthodologique car les signatures saisonnières ont démontré que le Phalaris est distinct des autres classes physiologiques des marais et marécages (même en tenant compte des écarts-types). La similarité entre les deux classifications radar n'est que de 46.2% (Tableau 14.3-6-A) et une comparaison visuelle avec la vérité terrain donne l'avantage à la classification hiérarchique. De larges portions de hauts marais à Phalaris sont en effet absentes de la classification SVM-1D comme en témoigne la Figure 14.3-5 (C vs D). La stratégie consistant à produire une carte de potentiel du Phalaris avec un seuillage permissif de la phase (pour limiter l'erreur d'omission) pour ensuite retrancher des portions de cette carte au profit des bas marais à Typha, à Scirpes ou à Zizanies semble mieux performé que la stratégie multiparamètres (plus forte dimensionnalité) dans laquelle la phase $\Phi_{\alpha 1}$, le paramètre clé avec λ_{1N} , ne semble pas avoir eu toute l'influence qu'elle aurait dû avoir. La dissimilarité entre Phalaris (classif. hiérarchique) et forêts ou marécages (SVM-1D) peut avoir été causés par la valeur de λ_{1N} qui est caractéristiquement faible pour ces trois classes. Mentionnons cependant, par souci de transparence, qu'il n'y a pas eu outre mesure de tentative d'optimisation de l'algorithme SVM. L'un des points de questionnement concernant l'algorithme LISBVM (section 8.5.2) est la technique utilisée pour sélectionner les paramètres importants lors de la discrimination des classes. Un autre point concerne la normalisation (*scaling*) des paramètres appliqués avant la classification et qui pourrait affecter plusieurs paramètres et en particulier la phase.

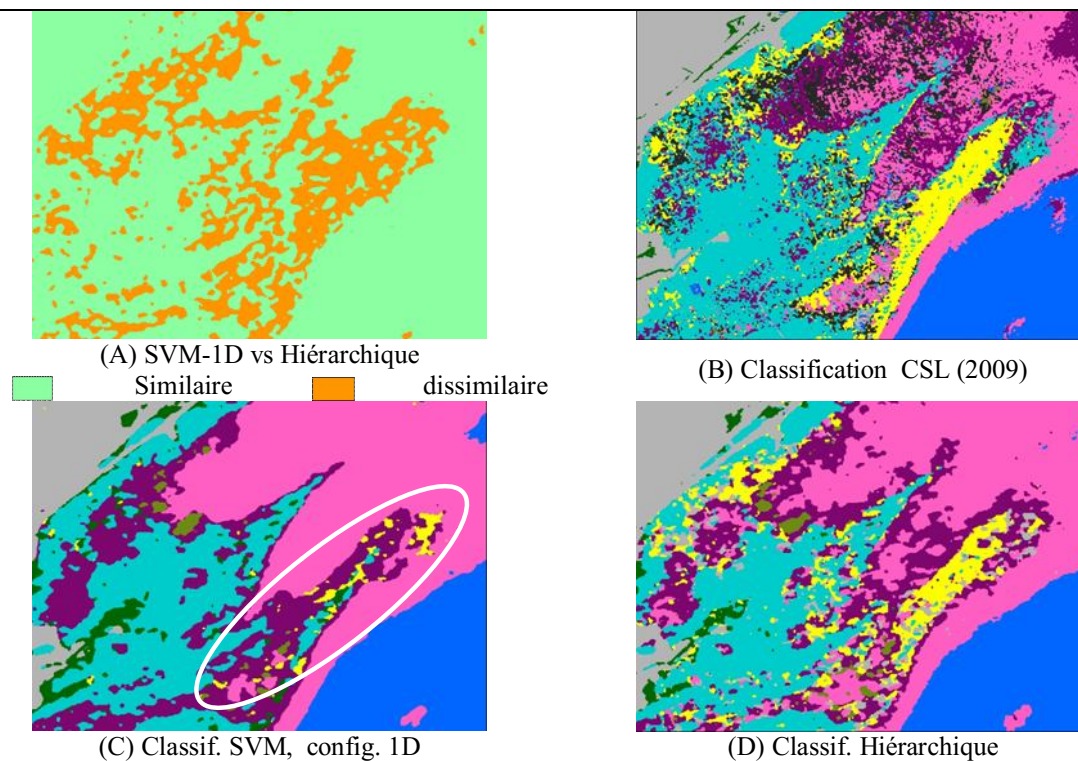


Figure 14.3-5 : Détail de la similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D, série FQ15-A, 2009, zone 1

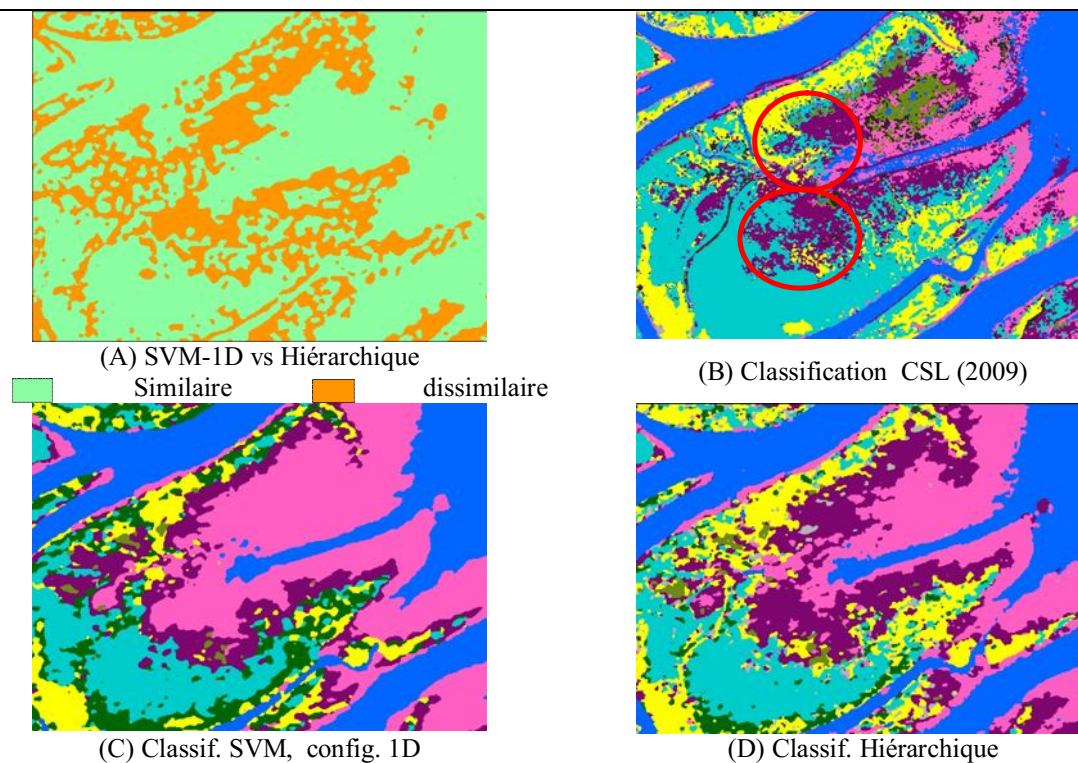


Figure 14.3-6 : Détail de la similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D, série FQ15-A, 2009, zone 2

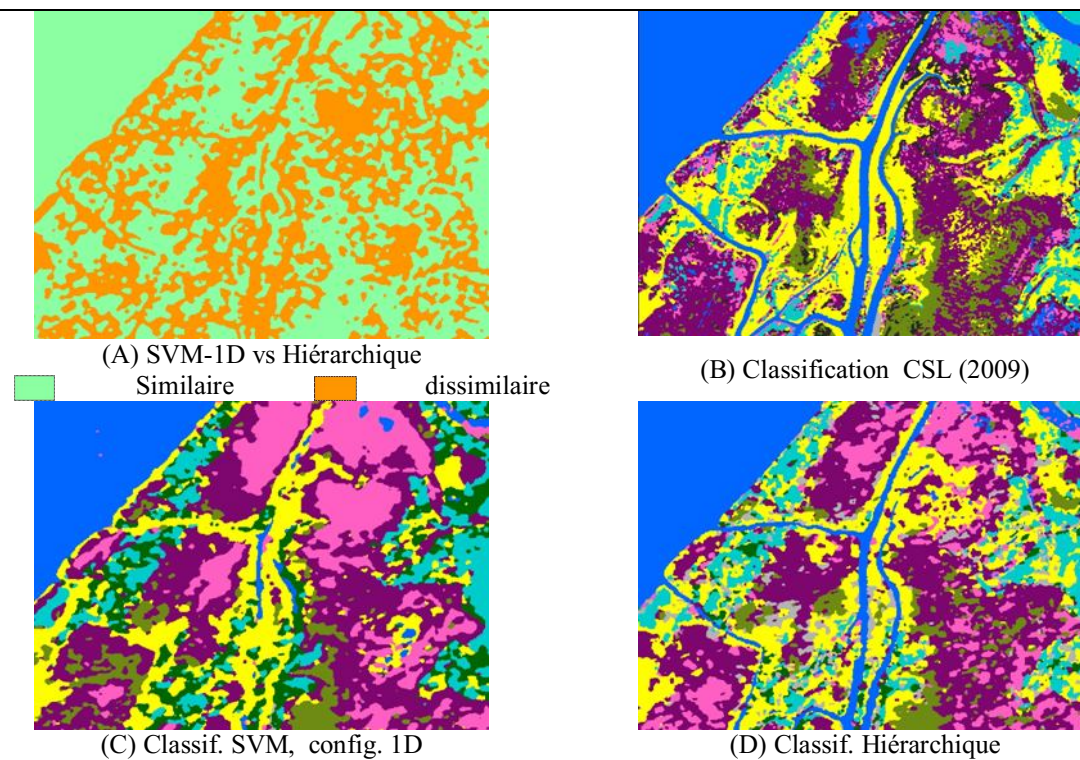


Figure 14.3-7 : Détail de la similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D, série FQ15-A, 2009, zone 3

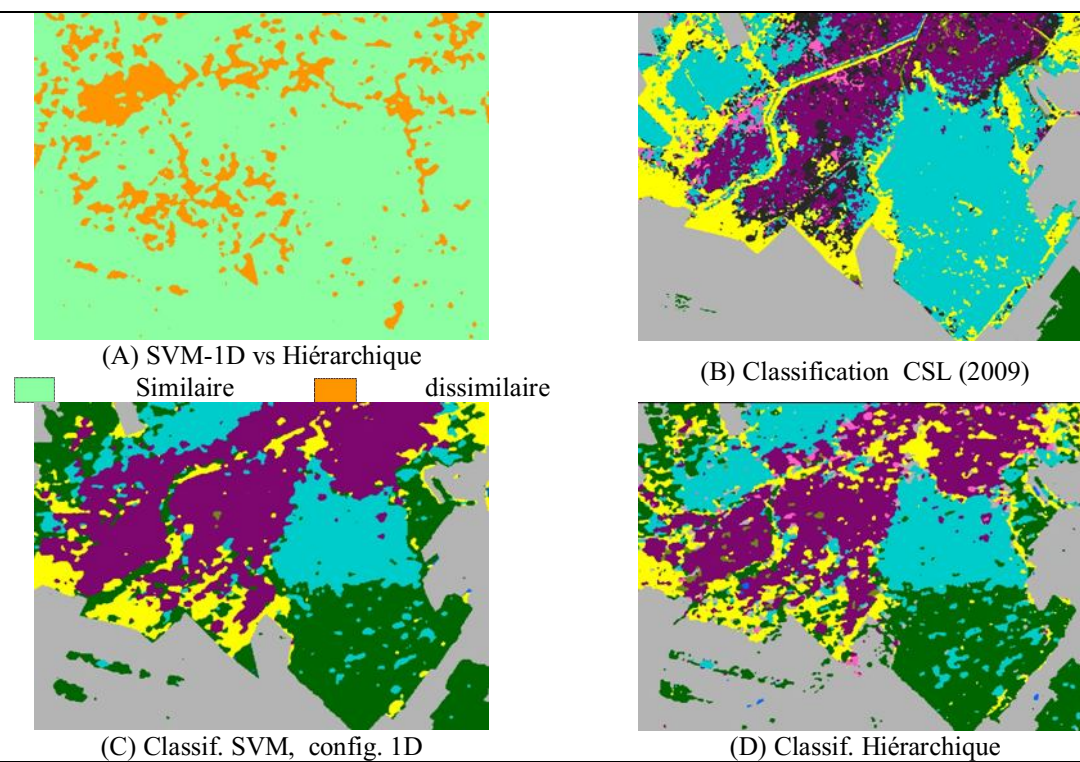


Figure 14.3-8 : Détail de la similarité / dissimilarité entre la classification hiérarchique et la classification SVM configuration 1D, série FQ15-A, 2009, zone 4

14.4. Résumé

(Section 14.1) ■ La limite entre les marécages arborés et les forêts arborées sur substrat sec correspond plus à un gradient qu'à une frontière nette de sorte que la valeur du seuil utilisé a un impact direct sur la superficie occupée par chacune de ces classes. Pour l'image du 27 avril, un seuil de $\alpha_{s1} \geq 30^\circ$ a permis d'obtenir le meilleur résultat marécages par comparaison visuelle avec la classification CSL. ■ De même, la limite entre les classes [H1] et [h1] s'apparente aussi à un gradient plus qu'à une frontière nette et le choix de la valeur du seuil possède un effet significatif sur la superficie occupée par chaque classe respective. ■ La classification de la Zizanie (H2-21) reste problématique autant pour la classification RS2 que la classification Landsat-5 avec un taux de succès respectif de 43.23% et 65.5% et est confondu avec la classe [H1] (Tableau 14.1-1) ce qui confirme les observations du chapitre 12 et 13. Le problème posé par la mixité des physionomies est important et concerne tout autant la classification RS2 que la classification Landsat-5. Ce problème est lié tout autant à la plus faible résolution spatiale des deux capteurs par rapport à l'image Ikonos qu'à la propension de certaines espèces, ici la Zizanie [H2-22], à ne pas former de grandes colonies monotypiques. ■ La confusion entre les classes de bas marais [H1] et [h1] est majoritairement limitée entre ces deux classes de même que la confusion entre les classes [A1] [A2] (milieux secs) et [A1] [A2] (Marécages). ■ La classification hiérarchique RS2 constitue une amélioration significative par rapport à d'autres classifications plus générales du lac Saint-Pierre qui ont été proposées pour atteindre les objectifs de l'inventaire canadien des milieux humides (ICTH, Fournier *et al.*, 2007).

(Section 14.3) ■ Les classifications SVM ont été introduites pour vérifier si une plus forte dimensionnalité entraînerait de meilleures classifications comparativement à la classification hiérarchique. → La configuration SVM-1B, qui se compare directement avec la classification hiérarchique, a offert une performance globale de 77.9% comparativement à 77.3%. → Une plus forte dimensionnalité (SVM-1D) a donné une performance globale de 79.1% ce qui est décevant, mais souligne que la sélection manuelle des paramètres pour la classification hiérarchique RS2 a été presque optimale. Ce résultat est d'autant plus décevant lorsque l'on constate que les canaux de polarisation (config. 2B) offrent une performance équivalente de 75.3% (Tableau 14.3-1). ■ La contribution des paramètres polarimétriques et d'une plus haute

dimensionnalité est particulièrement évidente pour la discrimination entre milieux secs et milieux humides. La sommation des confusions entre cultures et milieux humides n'est que 39.6% pour la configuration SVM-1C contre 88.8% pour les canaux de polarisation (config. 2A) (Tableau 14.3-1). ■ Une comparaison visuelle entre la classification hiérarchique RS2 (chapitre 13) et SVM-1D donne un avantage à la première. → Ces différences sont surtout liées à la nature du gradient entre les classes [h1] et [H1] et les forêts sur substrat secs [A1] vs les marécages [A1] pour lesquelles la classification hiérarchique a offert de meilleurs résultats puisqu'ajustée visuellement en fonction de la classification CSL.

PARTIE VI : HYDROLOGIE DES TOURBIÈRES

Tel que mentionné au chapitre 6, la caractérisation du régime hydrique des tourbières est l'un des axes de recherche utilisant l'imagerie radar pour la caractérisation des milieux humides. Les quelques études effectuées jusqu'à présent avec les canaux de polarisation n'ont cependant pas abouti à des résultats probants. Les études en polarimétrie radar par Touzi *et al.* (2007, 2009) pour la mer Bleue (Ottawa), ainsi que celle effectuée avec nos données ALOS sur la tourbière de la Baie de Mines (Touzi et Gosselin, 2010), ont montré qu'il est possible en utilisant la phase $\Phi_{\alpha s1}$ d'obtenir une information plus précise sur le niveau de la nappe phréatique des tourbières ouvertes. En se fondant sur les résultats de ces études, l'apport de la phase polarimétrique dans ce domaine sera examiné à nouveau au chapitre 16. Les analyses portent non seulement sur les données ALOS (section 16.1) mais s'étendront aussi aux données RS2 (section 16.2) afin de mieux comprendre l'impact de la longueur d'onde sur la caractérisation de l'hydrologie des tourbières. Mais d'abord, un bref aperçu théorique de l'hydrologie des tourbières sera donné au chapitre 15.

CHAPITRE 15

15. POTENTIEL DE LA POLARIMÉTRIE RADAR POUR LA CARACTÉRISATION DE L'HYDROLOGIE DES TOURBIÈRES

15.1. L'hydrologie des tourbières

La détection des milieux humides, en particulier des tourbières, repose souvent sur l'hypothèse que ces milieux sont plus humides que leur environnement immédiat. Ceci se justifie pour les tourbières par une nappe phréatique située près ou au-dessus de la surface du sol (Dai et *al.*, 1974; Price, 2001). Mais la réalité est plus nuancée, car leur régime hydrologique diffère dépendant de l'interaction entre la lithologie locale (la géologie, le sol, la topographie) et le climat, ce dernier déterminant l'écoulement et l'emmagasinage de l'eau (Price, 2001). Ainsi l'amplitude des fluctuations des niveaux d'eau dépend de la durée et de la quantité des précipitations ainsi que de l'interception, l'évapotranspiration et la transpiration de la végétation (Dai et *al.*, 1974).

Le régime hydrologique d'une tourbière peut être représenté par une équation décrivant son équilibre hydrique, c'est-à-dire la variation de l'emmagasinage de l'eau (ΔEm). Pour les fens cette équation prend la forme suivante :

$$\text{Fen } \Delta Em = P + SO_{De} + SU_{De} - (E_v + SO_{Ds} + SU_{Ds}) \quad (15.1-1)$$

où P représente les précipitations; SO_{DE} et SU_{DE} correspondent respectivement aux débits entrant de l'eau souterraine et superficielle; E_v à l'évapotranspiration; SU_{DS} et SO_{DS} aux débits sortants de l'eau superficielle et souterraine respectivement. Cette équation se simplifie pour les bogs en l'absence d'un apport significatif des eaux souterraines et superficielles aux débits entrants³² :

$$\text{Bog } \Delta Em = P - (E_v + SO_{DS} + SU_{DS}) \quad (15.1-2)$$

Quelques observations sur le bilan hydrique des tourbières en milieu tempéré froid, d'intérêt pour cette recherche, peuvent se résumer comme suit (Brooks, 1992; Holden, 2006) :

³² La formule de l'équilibre hydrique du Bog est tirée de Brooks (1992). La formulation originale a été adaptée pour être similaire à celle du Fen tirée de Price (2001).

- i. Sur une base annuelle, l'évapotranspiration (E_v) excède de beaucoup les débits sortants (SU_{Ds}) des tourbières;
- ii. Pour une tourbière, la profondeur de la nappe phréatique contrôle l'ampleur de la réponse des débits sortants en fonction des intrants en eau et aux pertes par évapotranspiration;
- iii. La majorité des écoulements souterrains horizontaux se produisent dans la couche supérieure de tourbe (acrotelme). Les écoulements survenant dans la couche inférieure de tourbe (catotelme) sont négligeables;
- iv. Le plus grand pourcentage de l'écoulement annuel (débits sortants) des tourbières survient au printemps et il résulte de la fonte des neiges;
- v. Les tourbières emmagasinent temporairement la majorité des précipitations, ainsi l'écoulement de pointe des débits d'orages³³ est atténué. Mais la capacité d'emmagasinage dépend du niveau de la nappe phréatique avant les précipitations. Cette capacité est donc plus forte en été qu'au printemps. Les bassins versants contenant des bogs tendent à présenter des crues plus brutales où l'eau est rapidement libérée. Le comportement de la nappe phréatique des fens n'est pas seulement fonction des conditions météorologiques (Ingram, 1981) mais aussi de la nature du bassin versant avoisinant;
- vi. L'écoulement en provenance des tourbières est généralement réduit au cours de l'été à cause des taux plus élevés d'évapotranspiration. La réduction de l'écoulement est plus prononcée pour les bogs que pour les fens car l'écoulement de ces derniers est soutenu par une connexion aux aquifères avoisinants. Le niveau de la nappe phréatique est plus stable dans les fens que dans les bogs. Les pertes par évapotranspiration des bogs à sphaignes avec des couverts d'herbacées et d'éricacées sont les plus fortes lorsque la nappe phréatique se situe à moins de 10 cm de la surface;
- vii. La hauteur de nappe phréatique, plus que le type de végétation, influence les pertes par évapotranspiration. Lorsque la nappe phréatique est de 30 à 40 cm sous la surface des dépressions, les pertes par évapotranspiration sont similaires à celles des sols minéraux.

³³ Traduction du terme anglais *stormflow* et désigne la partie de la précipitation qui, en peu de temps, s'écoule à la surface du sol hors du bassin versant (de la tourbière). GDT BDL.

15.2. L'acrotelme et le catotelme

Le concept de l'acrotelme et du catotelme a été développé par les scientifiques russes au milieu du 20e siècle pour comprendre le fonctionnement des tourbières et particulièrement leur hydrologie (Ingram, 1981; Holden, 2006). Le Tableau 15.2-1 présente leurs principaux traits distinctifs.

<u>Acrotelme</u>	<u>Catotelme</u>
Échanges intensifs (soutenus) d'eau avec l'atmosphère et les régions avoisinantes.	Échanges d'eau très lents avec le substrat sous-jacent et les régions avoisinantes.
Fluctuations fréquentes du niveau de la nappe phréatique et de la teneur en eau volumétrique.	Constamment saturé.
Haute conductivité hydraulique qui décroît avec la profondeur.	Faible conductivité hydraulique.
Populations nombreuses de micro-organismes aérobiques menant à une décomposition rapide.	Micro-organismes anaérobiques et activités de décomposition réduites.
Systèmes racinaires denses et grande diversité en invertébrés.	Enracinement des plantes vasculaires réduit et très peu d'invertébrés.

Tableau 15.2-1 : Principales distinctions entre l'acrotelme et le catotelme d'une tourbière

Source : Rydin et Jeglum (2006) (modifiée d'Ivanov, 1981), traduction libre par l'auteur

Si ce concept est actuellement appliqué indistinctement à tous les types de tourbières, nombreux sont les chercheurs mentionnant que ce concept est plus approprié à la description des bogs et particulièrement des bogs perchés (Rydin et Jeglum, 2006; Holden, 2006).

L'acrotelme représente la couche «active» et aérée qui débute au-dessus du plus bas niveau de la nappe phréatique (Figure 15.2-1) et dans laquelle cette dernière oscille (Rydin et Jeglum, 2006). Sous l'acrotelme se trouve le catotelme qui est une couche inactive, anoxique et constamment saturée, mais qui constitue la plus grande partie du volume de tourbe de la tourbière (Rydin et Jeglum, 2006). L'épaisseur de l'acrotelme reflète la microtopographie locale. Les tapis et les dépressions se caractérisent par des acrotelmes très minces voir absents alors que les pelouses un acrotelme d'une épaisseur de 5 à 20cm contre 20 à 50 cm pour les buttes (Rydin et Jeglum, 2006). Les parties boisées d'un bog sont situées dans les parties les milieux drainés des bordures de la tourbière là où l'acrotelme est le plus épais. Ce sont les processus hydrologiques qui se produisent à l'intérieur de l'acrotelme qui donnent lieu à la création d'une quantité importante de modelés de tourbe et de mares à la surface des bogs.

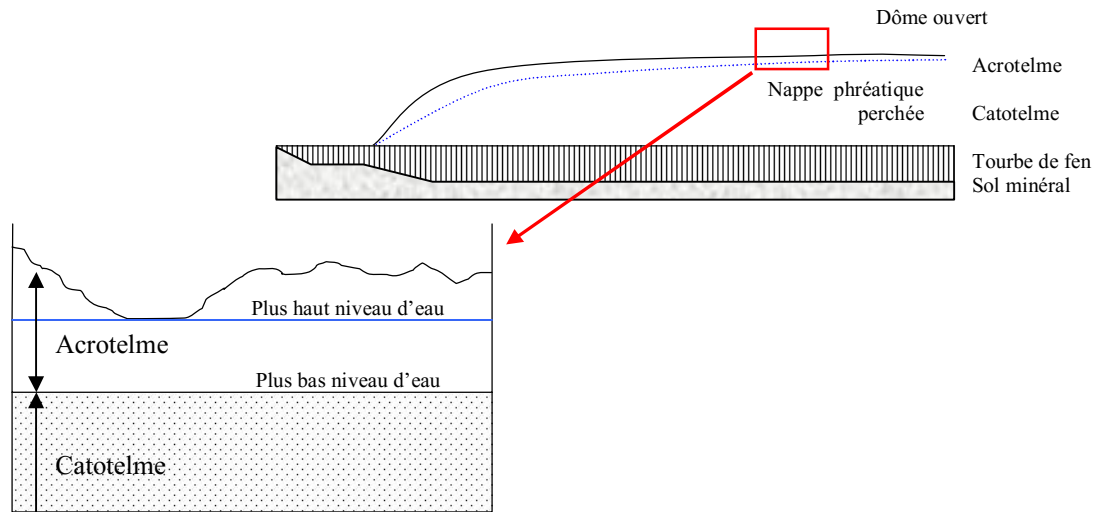


Figure 15.2-1 : Représentation de l'acrotelme et du catotelme

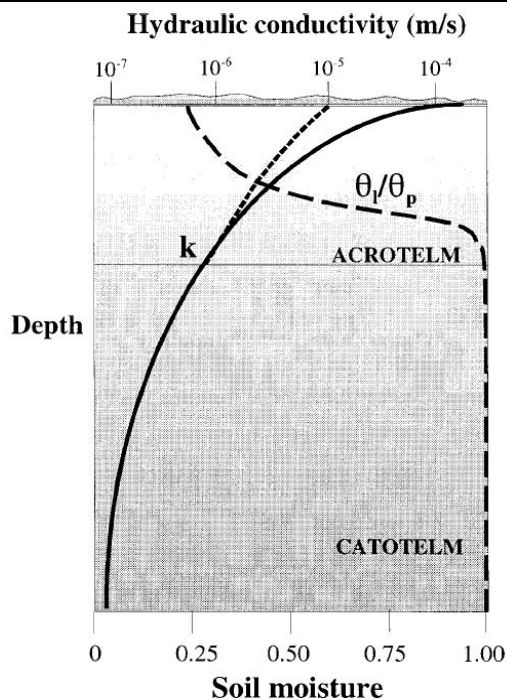
Source : Reproduction partielle de Rydin et Jeglum (2006), fig. 8.3, p.145

15.3. Conductivité hydraulique et profondeur de la nappe phréatique

Pour les bogs, la nappe phréatique est habituellement située près de la surface ou un peu en dessous. Cependant, les bogs continentaux peuvent être des milieux relativement secs (Vitt 1994). Plus la tourbe est décomposée, moindre elle sera sa capacité de retenir l'eau (Dai et *al.*, 1974) car plus poreuse, elle aura donc une plus forte conductivité hydraulique (Ingram, 1981). Dépendamment de l'épaisseur de l'acrotelme, le niveau d'eau pourra donc être situé à quelques mètres sous la surface.

La conductivité hydraulique de la tourbe (k) peut décroître de cinq ordres de magnitude entre 0.4 et 0.8 m sous la surface (Figure 15.3-1). L'humidité de la tourbe augmente rapidement en fonction de la profondeur pour atteindre 100%, c'est-à-dire un état de saturation, lorsque le catotelme est atteint. La forte conductivité hydraulique des premiers centimètres de tourbes, en conjonction avec sa forte porosité, fait en sorte que les premiers centimètres de tourbes seront probablement secs à moins que :

- i. La nappe phatique soit affluente comme dans les dépressions;
- ii. On mesure l'humidité de la tourbe immédiatement après une importante averse.



La ligne pointillée illustre que la conductivité hydraulique (k , ms^{-1}) est réduite lors de l'assèchement de la tourbe. L'humidité de la tourbe est contrôlée par le rapport entre sa teneur en eau volumétrique (θ_l) et sa porosité (θ_p). La porosité des sols minéraux varie de 0.4 à 0.6 alors que celle de la tourbe est rarement en deçà de 0.8.

La conductivité hydraulique est donnée par :

$$k = k_s \cdot [\theta_l / \theta_p]^{2b+3}$$

où

b = est un paramètre d'ajustement permettant de tenir compte de la texture de la tourbe.

k_s = conductivité hydraulique en conditions saturées.

Figure 15.3-1 : Caractéristiques typiques de deux paramètres décrivant la conductivité hydraulique (k) des sols organiques

Source : Letts et al. (2000), fig.1, p.143.

15.4. Capacité de pénétration du signal radar

La capacité d'une onde radar à pénétrer profondément un sol dépend d'une foule de paramètres dont celles d'opération du radar (fréquence, puissance, angle d'incidence et polarisation) ainsi que des paramètres de surface comme la densité, la texture, l'humidité volumétrique ainsi que la présence des couches avec des propriétés de rugosité et électriques différentes.

Dans le cas des diélectriques la profondeur de pénétration équivaut à la longueur d'onde du rayonnement selon certains auteurs (Lewis et Henderson, 1998) ou à une fraction de la longueur d'onde selon d'autres (Moran et al., 2004). Ce qui est certain est que plus la teneur en humidité volumétrique (m_v) d'un sol est élevée, plus sa conductivité électrique sera élevée et donc moindre sera la pénétration du signal. À titre d'exemple, Nolan et Flatland (2003) rapportent une pénétration de la bande L de 50 cm sous la surface pour $m_v=0\%$ contre seulement 4 cm lorsque l'humidité volumétrique est comprise entre 20 et 40%. Ces résultats sont rapportés pour un sol composé à 51% de sable et 13 % d'argile ce qui en fait un milieu

peu dense comme l'est la tourbe. En effet, un calcul selon les paramètres mesurés de la masse volumique apparente de la tourbe, de la masse de la tourbe après séchage, de son volume non perturbé et saturé ainsi que de sa porosité le démontrent. À titre d'exemple, Paavilainen et Päivänen (1995) constatent que la masse volumique apparente mesurée dans des tourbières en Finlande et au Minnesota ne dépassait pas les 0.30 g cm^{-3} tandis sa porosité pour une tourbe non décomposée est d'environ 97% contre 81 à 85% pour une tourbe fortement décomposée. À titre de comparaison, la masse volumique apparente d'un sol minéral peut atteindre les 2.0 g cm^{-3} tandis que sa porosité varie entre 30 et 65%. Comme la tourbe constitue un matériau peu dense et donc elle présente une forte conductivité hydraulique, une tourbière ombrotrophe aura tendance à s'assécher rapidement après une précipitation, tout au moins sa partie supérieure (l'acrotelme) caractérisée par une tourbe peu décomposée. Sa couche inférieure (le catotelme) est plus dense et saturée en eau en permanence. On peut donc s'attendre à ce que le signal radar pourrait atteindre la nappe phréatique à une certaine profondeur tout dépendant du volume de précipitations durant une période proche de l'acquisition des données radar.

Quelques études (Racine *et al.*, 2005; Clark *et al.*, 2009; Kasischke *et al.*, 2009) ont tenté d'établir une relation entre le coefficient de rétrodiffusion radar et divers paramètres représentatifs de l'état hydrologique des tourbières dont l'humidité de la tourbe (teneur en eau volumétrique) liée entre autres aux fluctuations du niveau d'eau dans l'acrotelme. Que ce soit avec C-VV (Kasischke *et al.*, 2009) ou C-HH (Racine *et al.*, 2005) aucune relation entre σ^0 et l'état des tourbières n'a pu être établie. Les raisons évoquées sont d'une part la présence de la couverture végétale (arbustes et formations herbacées) qui atténue le signal et d'autre part un niveau d'eau hors de portée du signal incident pour des profondeurs aussi faibles que 15 cm sous la surface (Kasischke *et al.*, 2009). Il est évident que la caractérisation de l'hydrologie des tourbières par le biais de l'amplitude du signal nécessite l'utilisation d'une plus grande longueur d'onde moins sensible à la présence d'un couvert végétal bas tout en étant en mesure de pénétrer plus profondément sous la surface. La résolution spatiale du capteur est également importante comme le souligne Racine *et al.* (2005) puisque l'humidité volumétrique de la tourbe peut être fortement variable sur de faibles distances.

CHAPITRE 16

16. UTILISATION DE LA PHASE $\Phi_{\alpha s1}$ POUR LE SUIVI DE L'HYDROLOGIE DES TOURBIÈRES

16.1. Analyses avec ALOS-PALSAR (2006-2007)

Lasne et *al.*, (2004) mentionnent qu'une pénétration du signal radar de plus de 1.5m a été observée en bande L dans les sédiments sableux du sud de l'Égypte. Leur étude, portant sur la dune de Pyla (France), présentait des résultats similaires, mais plus important, les auteurs constatèrent que la différence de phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ est plus sensible que l'amplitude du signal aux propriétés sous la surface pour une profondeur de plus de 2 m. Grâce à cette sensibilité accrue de la phase, ils ont été en mesure de détecter enfouie sous la dune un paléosol plus humide et compact invisible avec les canaux de polarisation.

Les causes à l'origine d'une différence entre les phases copolaires ont été expliquées à la section 10.3.2. Pour la Baie des Mines, la différence de phase polarimétrique observée avec les données ALOS entre novembre 2006 et mai 2007, combinée à l'absence de changements significatifs de la puissance rétrodiffusée, élimine l'hypothèse de la rétrodiffusion double-bond en surface (voir section 11.3). L'évolution temporelle observée pour $\Phi_{\alpha s1}$ serait donc liée à une fluctuation du niveau d'eau sous la surface. Cette idée, déjà abordée dans Touzi et Gosselin (2009), est ici reprise et approfondie.

En novembre 2006, la phase $\Phi_{\alpha s1}$ présente des valeurs négatives pour la majorité du secteur ouvert de la tourbière de la Baie des Mines (Figure 16.1-1-A.1). Suite aux précipitations et aux températures fraîches, il est plausible que le niveau de la nappe phréatique soit demeuré assez élevé et près de la surface pour avoir influencé la phase. En utilisant les explications fournies dans Lasne et *al.*, (2004) et en les transposant au cas de tourbières, la phase négative $\Phi_{\alpha s1}$ représenterait la contribution de la surface d'eau dans le catotélme dont le signal s'ajouterait à celle de la surface. La valeur négative de $\Phi_{\alpha s1}$ indiquerait que les deux sources de rétrodiffusion des tourbières ne seraient pas en phase.

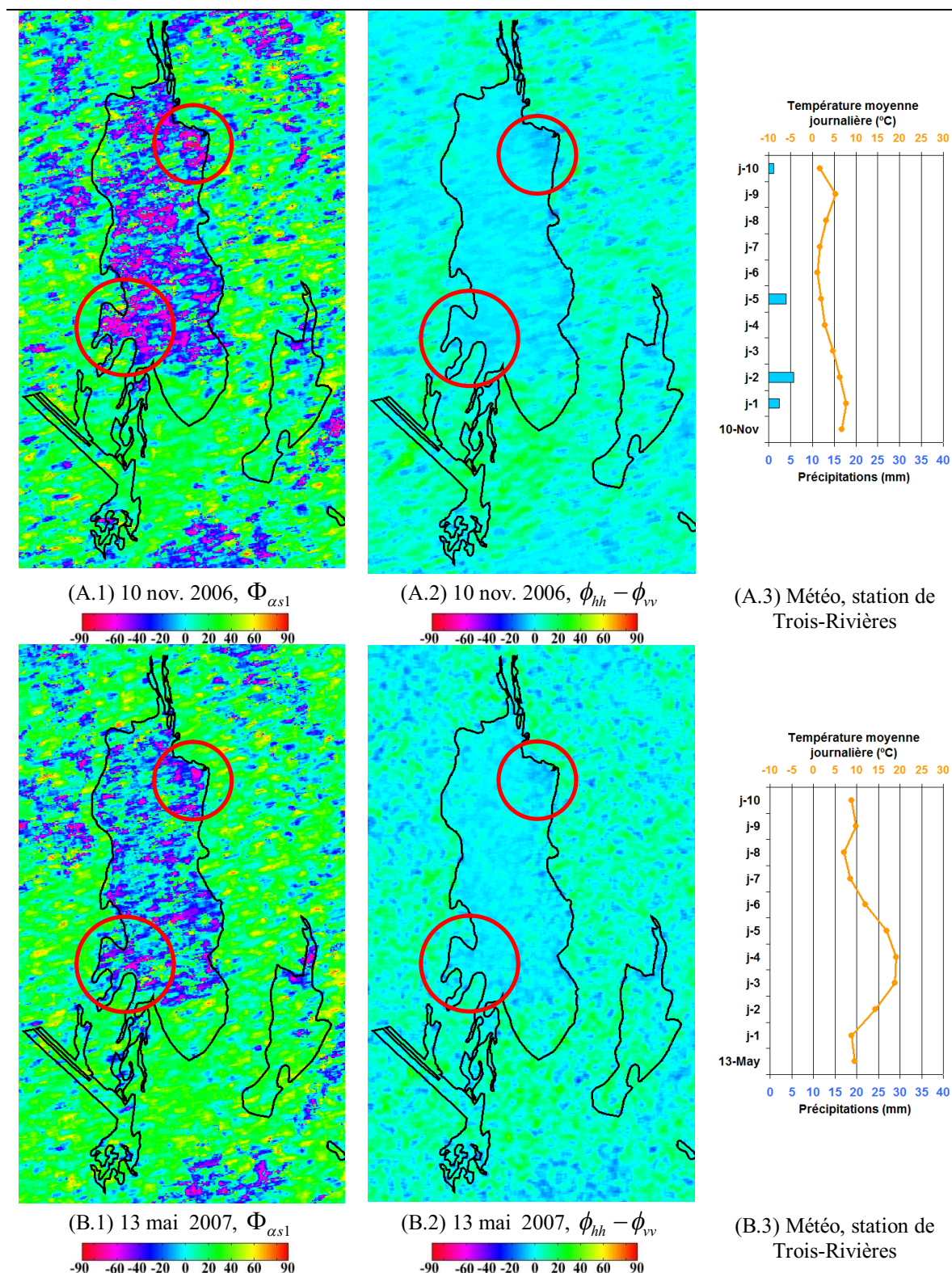


Figure 16.1-1 : Baie des Mines, évolution temporelle de la phase $\Phi_{\alpha s1}$ et de la différence de phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$, 2006 et 2007

En mai 2007, les températures plus douces et surtout les conditions sèches observées (Figure 16.1-1-C.3) seraient associées à un plus bas niveau d'eau sous la surface et hors d'atteinte des ondes. En l'absence d'une contribution du sous-sol, seule resterait la réflexion de surface (bond unique) d'où une phase $\Phi_{\alpha s1} \approx 0^\circ$. On remarque cependant qu'il reste tout de même des zones de phase $\Phi_{\alpha s1}$ négatives en mai (Figure 16.1-1-B1). Deux de ces secteurs, identifiés par des cercles, correspondent à des Fens herbacés pauvres. Contrairement aux Bogs dont l'apport en eau dépend entièrement des précipitations, l'apport en eau des Fens provient à la fois des précipitations et du système hydrologique régional (souterrain ou surfacique) et demeure ainsi pratiquement constant (section 15.1). En se fiant au réseau hydrographique et à la topographie comme indicateurs, on remarque d'ailleurs que les fens se situent soit au point d'entrée, soit au point de sortie de la tourbière (Figure 16.1-2). Un apport constant en eau associée à un acrotelme plus mince pour les fens (Figure 16.2-5) fait en sorte que la probabilité d'un niveau d'eau près de la surface est forte pour ces secteurs. Cela a été confirmé pour le secteur sud de la Baie des Mines lors d'une visite sur le terrain en novembre 2009.

Il reste à expliquer pourquoi la phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$ n'a pas été aussi sensible que $\Phi_{\alpha s1}$ aux variations du niveau d'eau à l'intérieur du catotelme. L'explication la plus plausible concerne la topographie de la tourbière. Le niveau d'eau sous la surface n'est pas parfaitement horizontal comme le laisse supposer la Figure 15.2-1 mais suit plutôt les ondulations de la surface créé par l'alternance des buttes et dépressions. La différence de phase créée par l'addition de la réflexion du signal de l'eau sous la surface à celle de la surface ne serait donc que rarement dans la base H-V. La Figure 16.1-3 montre d'ailleurs que l'angle ψ_1 s'éloigne significativement de 0° pour les deux acquisitions ALOS ce qui indique qu'une rotation de la base de polarisation a été appliquée lors de la décomposition.

Le fait que $\Phi_{\alpha s1}$ est estimée sous de meilleures conditions de cohérence puisqu'elle ne concerne que la portion dominante du signal apparait être un autre élément de réponse. De plus, si les deux sources de rétrodiffusion de surface peuvent ne pas être en phase ($\Phi_{\alpha s1}$ fortement négatif), c'est aussi évoquer à l'inverse la possibilité qu'elles aient pu l'être avec un niveau d'eau différent sous la surface. Dans un tel cas, il aurait été possible d'obtenir une phase $\Phi_{\alpha s1} \approx 0^\circ$ même si l'eau sous la surface aurait été à la portée du signal. Cette idée est

démontrée dans Boisvert et *al.*, (1997) à l'aide d'une modélisation d'un sol agricole à deux couches. Puisque la phase est cohérente, elle s'additionne ou s'annule en fonction de la distance parcourue dans le sol. La réflexivité cohérente à la surface du sol suit ainsi un cycle oscillatoire qui est fonction de l'épaisseur de la première couche de sol sèche (Boisvert et *al.*, 1997, voir la figure 1). L'amplitude des oscillations diminue en fonction de la profondeur jusqu'à l'atténuation du signal mais il est possible d'obtenir, par exemple, une plus forte réflexivité si la couche humide se situe à 3 cm sous la surface qu'à 2.5cm. La réflexivité incohérente suit une tendance plus linéaire où elle décroît selon l'augmentation de l'épaisseur de la première couche sèche jusqu'à que l'épaisseur de cette dernière excède la capacité de pénétration du signal. Il est à noter que les effets de la rétrodiffusion volumique ne sont pas pris en compte par Boisvert et *al.* (1997) ou Lasne et *al.* (2004).

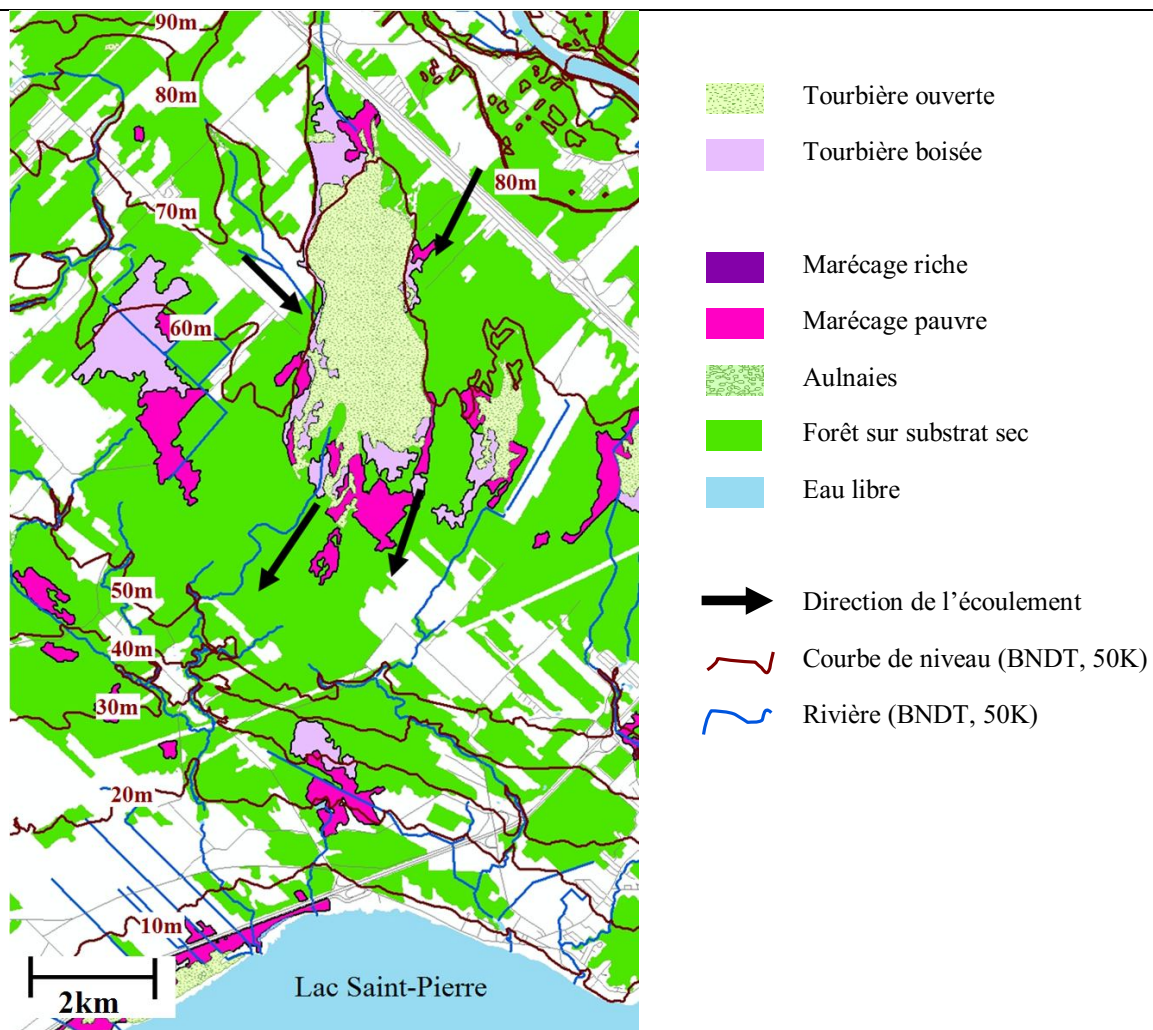


Figure 16.1-2 : Tourbière de la Baie des Mines, situation régionale et direction de l'écoulement de l'eau

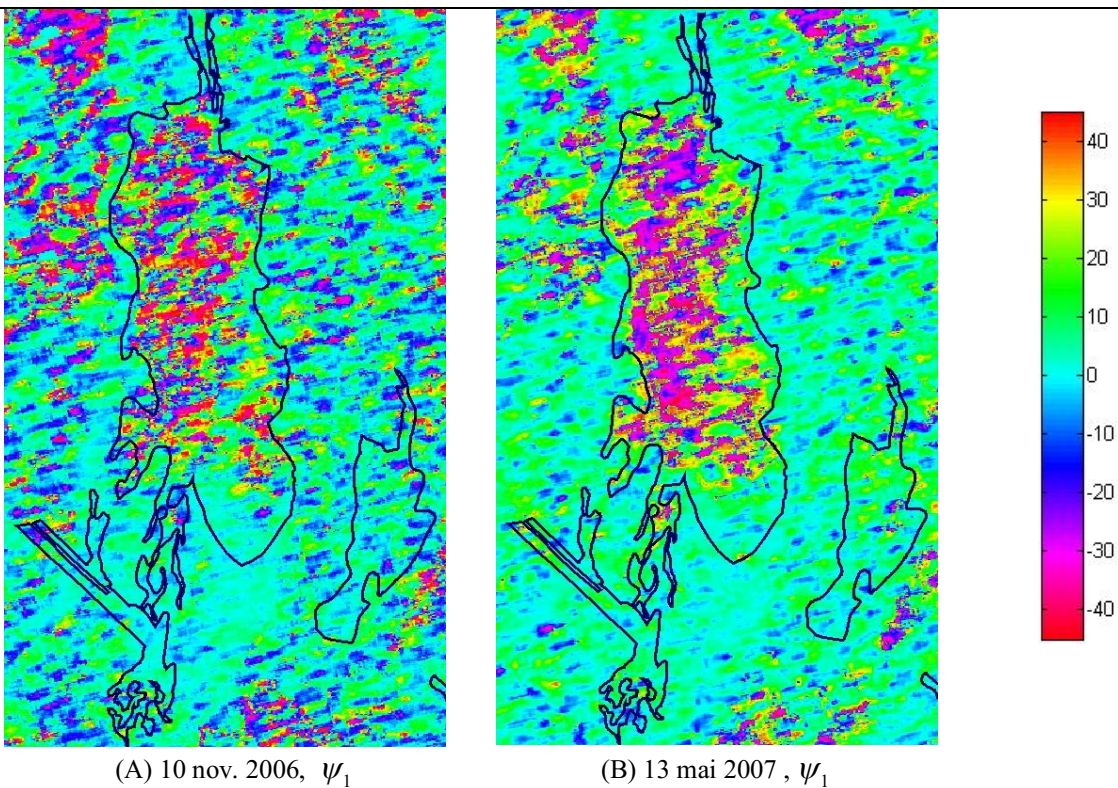


Figure 16.1-3 : ALOS-PALSAR, tourbière de la Baie des Mines, angle d'orientation ψ_1 , nov. 2006 et mai 2007

Par manque de données et d'un modèle physique pour caractériser l'hydrologie de la tourbière, il n'est pas possible d'affirmer si les variations de la phase peuvent être liées au niveau de l'eau dans l'acrotelme. Des mesures précises sur le terrain seront bien sûr nécessaires dans le futur pour étayer les observations de cette section. Il est plus prudent à cette étape de parler de présence ou d'absence d'eau (c.-à-d. atteignable ou non pas le signal incident) sous la surface. Il apparaît toutefois que si l'on veut lier la phase polarimétrique à la présence d'eau, cela doit se faire dans un contexte où le type de rétrodiffusion ne varie pas beaucoup comme ce fut le cas entre l'automne 2006 et le printemps 2007 avec les images ALOS

16.2. Analyse des données RADARSAT-2 (2009)

La série temporelle RS2 FQ21-D acquise au dessus de la région de la Baie des mines permettra d'étendre les observations faites avec les données ALOS sur l'ensemble d'une saison de croissance. Une caractérisation de l'état de la végétation (présence ou non de biomasse foliaire, teneur en eau des feuilles) basé sur 7 images Landsat-5 de la même année

sera d'abord effectuée (16.2.1) pour aider à mieux comprendre l'évolution de $\Phi_{\alpha s1}$ pour la même période.

16.2.1. Réflectance

Pour caractériser l'état de la végétation durant la saison de croissance 2009 nous utiliserons deux indices de végétation, l'indice standard NDVI ainsi que l'indice infrarouge (IRR) :

$$NDVI = (\rho_{TM4} - \rho_{TM3}) / (\rho_{TM4} + \rho_{TM3}) \quad (16.2-1)$$

$$IRR = (\rho_{TM4} - \rho_{TM5}) / (\rho_{TM4} + \rho_{TM5}) \quad (16.2-2)$$

L'évolution temporelle du NDVI (Figure 16.2-1) montre que la végétation de la tourbière de la Baie des Mines amorce sa croissance dès le mois de mai pour atteindre un maximum en juin-juillet avant de présenter des signes évidents de sénescence vers la fin septembre. Au début du printemps, la végétation des bogs (Éricacées) et des Fens (herbes du type *Carex* sp.) présente un plus fort NDVI que les tourbières boisées ou les forêts sur substrats secs. Cette situation s'inverse cependant au cours de l'été lorsque la biomasse foliaire des feuillus (en plus grande quantité dans les forêts sur substrat sec que pour les tourbières boisées) s'est pleinement développée.

L'indice IRR (Hardisky et al., 1983) est utilisé comme une estimation de la teneur en eau relative contenue dans les feuilles. Un indice IRR négatif est généralement indicatif d'une végétation desséchée avec une influence d'un substrat clair. À l'inverse, un fort IRR indique que la biomasse foliaire possède une forte teneur en eau. Tel que montré par la Figure 16.2-1-B, la végétation des tourbières ouvertes présente un IRR relativement stable par rapport aux tourbières boisées ou aux forêts sur substrat sec qui n'atteint pas les valeurs négatives. Ceci est attribuable, surtout pour les Éricacées des Bogs, à une biomasse foliaire plus clairsemée, plus persistante et aussi à la contribution significative du tapis de Sphaignes (et des mousses) (voir Bubier et al., 1997). Pour les forêts sur substrat sec, le maximum de teneur en eau dans les feuilles est atteint en juin et juillet et se maintient jusqu'au début octobre ou il décline fortement, ne bénéficiant pas de l'apport des sphaignes.

Tel qu'indiqué par le NDVI et l'IRR, les Fens et les Bogs évoluent spectralement de manière similaire mais demeurent séparables au cours de l'été.

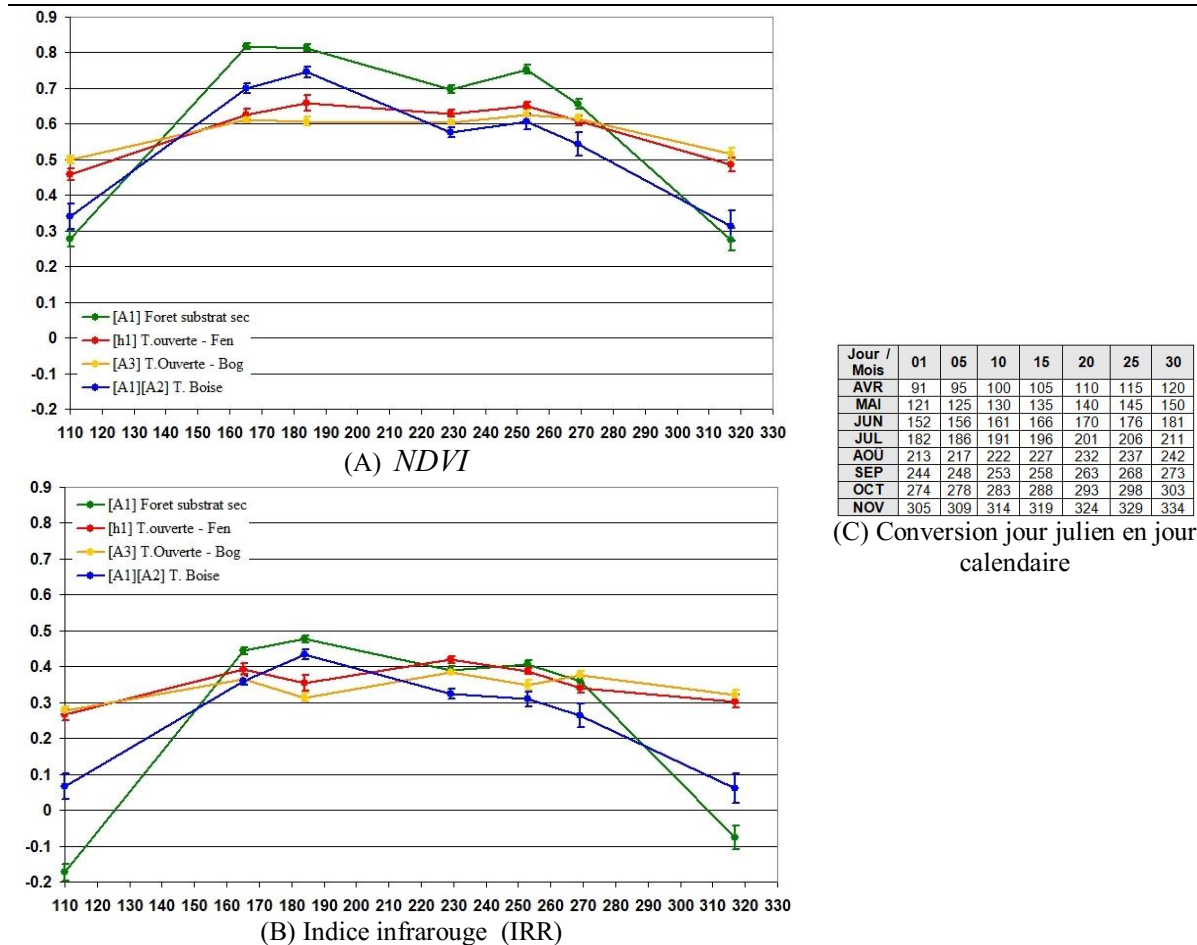


Figure 16.2-1 : Évolution de la réflectance (Saison 2009)

16.2.2. Observation sur les valeurs propres

Un examen de la série temporelle FQ21-D constituée des deux premières valeurs propres et de σ_{hv}^0 (Figure 16.2-2) montre trois situations typiques pour les secteurs de tourbière ouverte (A3, h1) et correspondant de près aux conditions météorologiques soit :

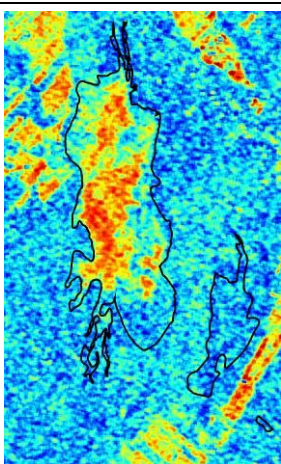
- i. Conditions sèches et très sèches [12 septembre (F), 30 octobre (H), 23 novembre (I)]. Pour ces conditions, la polarisation croisée est faible, inférieure à -25dB, alors que λ_{1N} domine avec des valeurs >0.8 .
- ii. Conditions très humides [2 juillet (C) et 26 juillet (D)] pour lesquelles des précipitations ont été enregistrées la journée même de l'acquisition. Pour ces conditions, σ_{hv}^0 affiche des

valeurs moyennes situées entre -15dB et -17dB alors que la première valeur propre se situe entre 0.7 et 0.8;

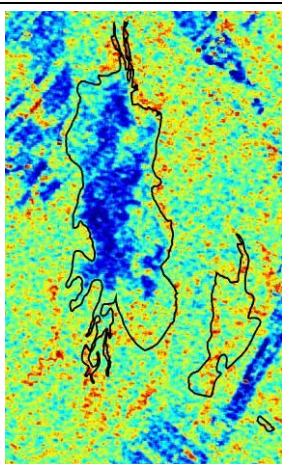
- iii. Pour les autres dates [5 mai (A), le 8 juin (B), le 6 octobre (G)], on retrouve des conditions météorologiques similaires à celles de l'acquisition ALOS du 10 novembre 2006. Des précipitations en quantité significative ont été enregistrées la journée précédant l'acquisition accompagnée de températures diurnes généralement fraîches. Pour ces images, σ_{hv}^0 se situe en moyenne vers -17dB et λ_{1N} entre 0.7 et 0.8

Les deux extrêmes (i et ii) démontrent clairement que les conditions météorologiques ont une influence marquée sur la radiométrie (σ_{hv}^0) et la pureté de la polarisation (λ_{1N}). L'eau interceptée par la biomasse foliaire des arbrisseaux augmente "l'opacité" de cette physiologie d'où l'augmentation de la rétrodiffusion volumique. Ce phénomène se remarque aussi pour le secteur boisé autour de la Baie des Mines alors que l'image du 15 mai (Figure 16.2-2-A) montre une rétrodiffusion volumique et multiple supérieure à celle du 8 juin (Figure 16.2-2-B) ce qui est opposée à l'évolution de la réflectance pour la même période (Figure 16.2-1). Au milieu de l'été, alors que la teneur en eau des végétaux est à son maximum, l'effet d'une forte précipitation a un effet moins marqué sur le signal (Figure 16.2-2, D vs E). Plus tard au cours de la saison, alors que la teneur en eau des végétaux chute (Figure 16.2-1), les précipitations auront un effet beaucoup plus marqué sur le signal (Figure 16.2-2, F vs G).

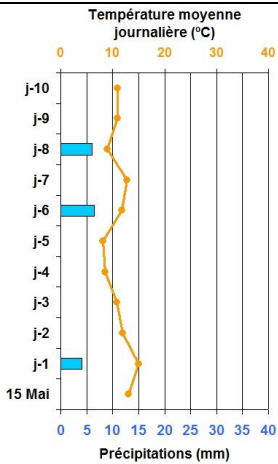
Ainsi, en bande C, la biomasse des arbrisseaux peut constituer un facteur d'influence sur le signal au cours de l'été et durant le printemps et l'automne en conditions très humides. Reste à voir comment la phase Φ_{ω_1} est affectée par ces conditions.



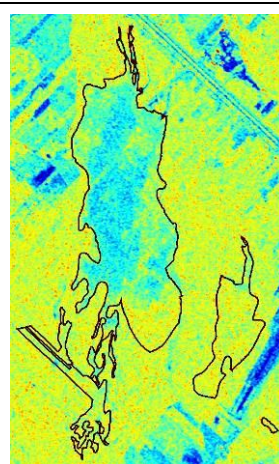
(A1) 2009-05-15, λ_{1N}



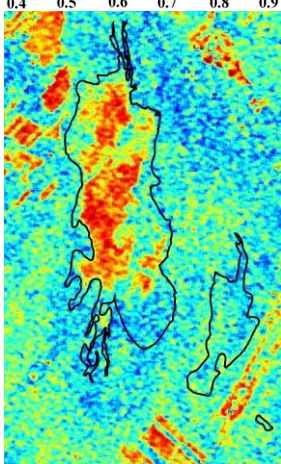
(A2) 2009-05-15, λ_{2N}



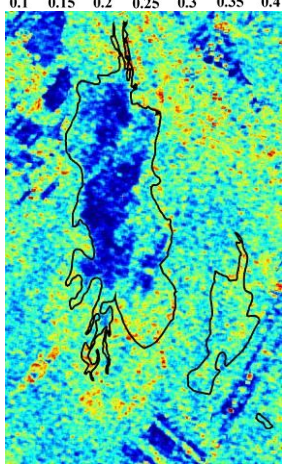
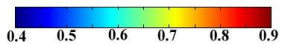
(A3) 2009-05-15
Météo



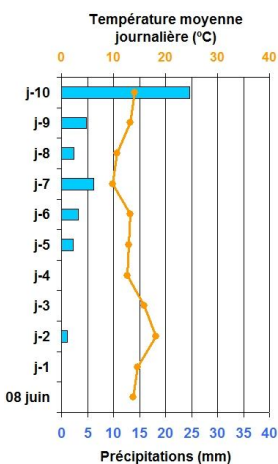
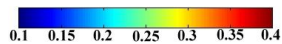
(A4) 2009-05-15, σ_{hv}^0



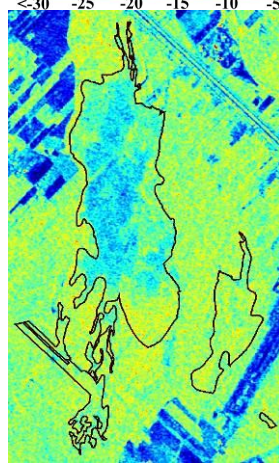
(B1) 2009-06-08, λ_{1N}



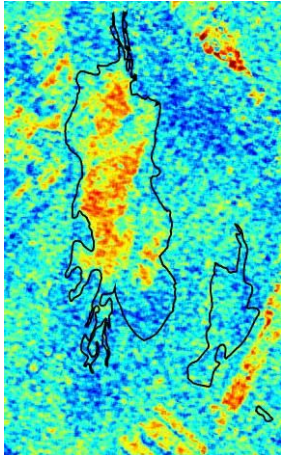
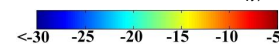
(B2) 2009-06-08, λ_{2N}



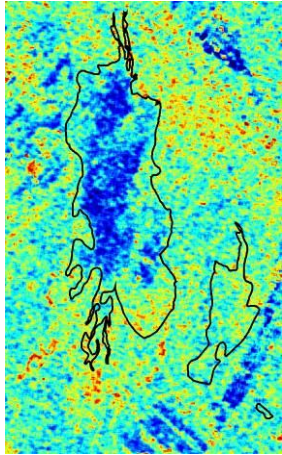
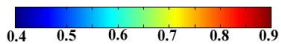
(B3) 2009-06-08
Météo



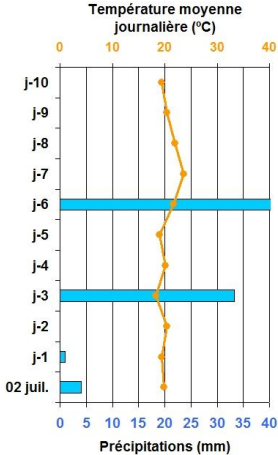
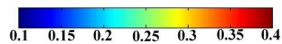
(B4) 2009-06-08, σ_{hv}^0



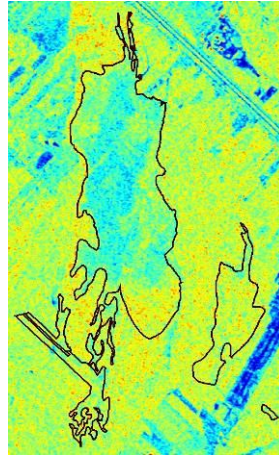
(C1) 2009-07-02, λ_{1N}



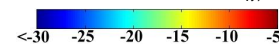
(C2) 2009-07-02, λ_{2N}

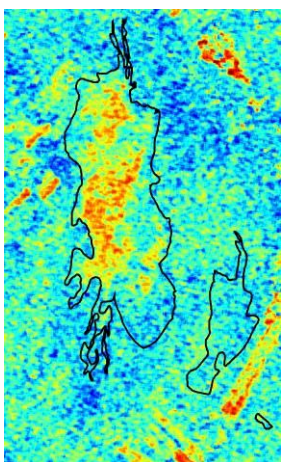


(C3) 2009-07-02
Météo

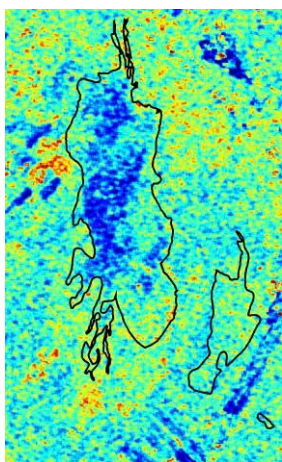
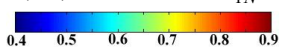


(C4) 2009-07-02, σ_{hv}^0

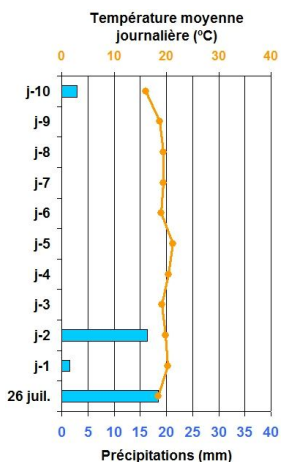
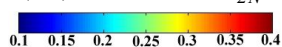




(D1) 2009-07-26, λ_{1N}

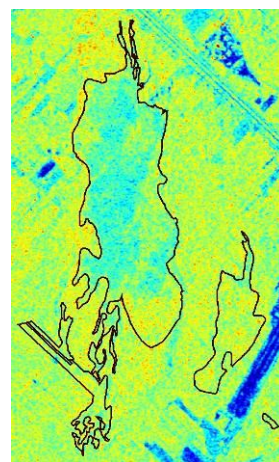


(D2) 2009-07-26, λ_{2N}

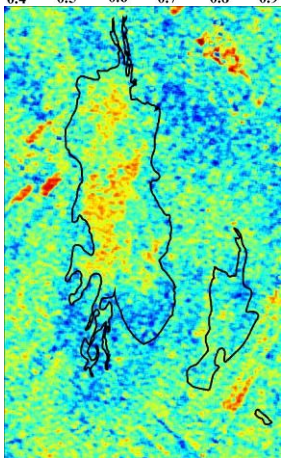
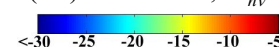


(D3) 2009-07-26

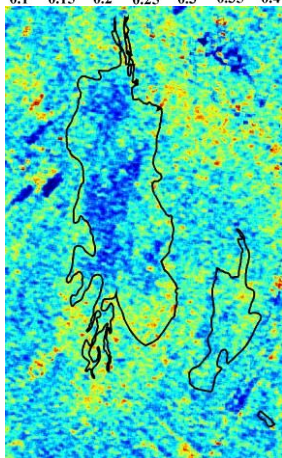
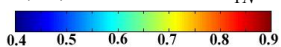
Météo



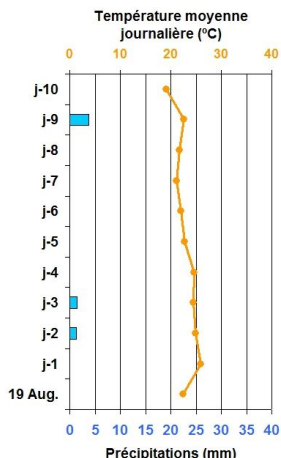
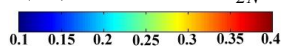
(D4) 2009-07-26, σ_{hv}^0



(E1) 2009-08-19, λ_{1N}

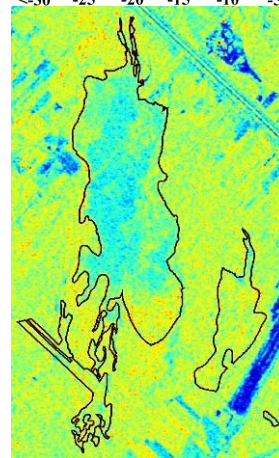


(E2) 2009-08-19, λ_{2N}

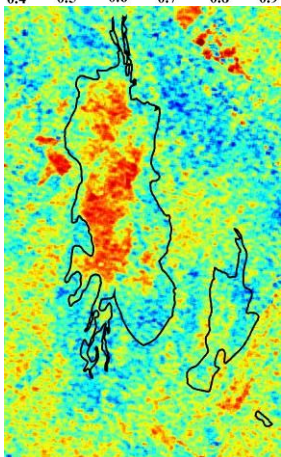
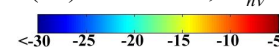


(E3) 2009-08-19

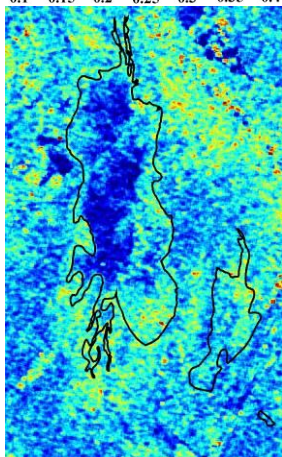
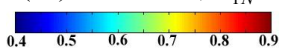
Météo



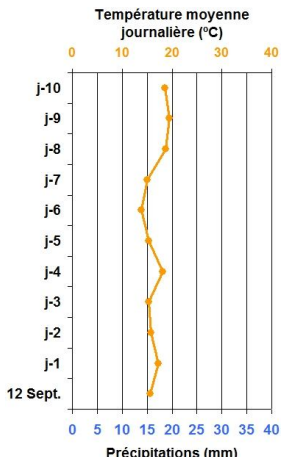
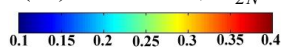
(E4) 2009-08-19, σ_{hv}^0



(F1) 2009-09-12, λ_{1N}

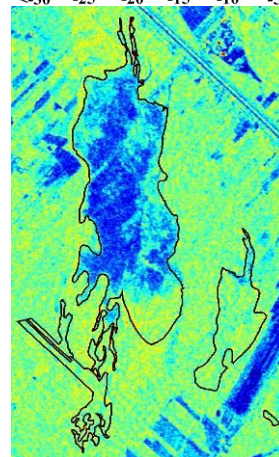


(F2) 2009-09-12, λ_{2N}

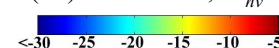


(F3) 2009-09-12

Météo



(F4) 2009-09-12, σ_{hv}^0



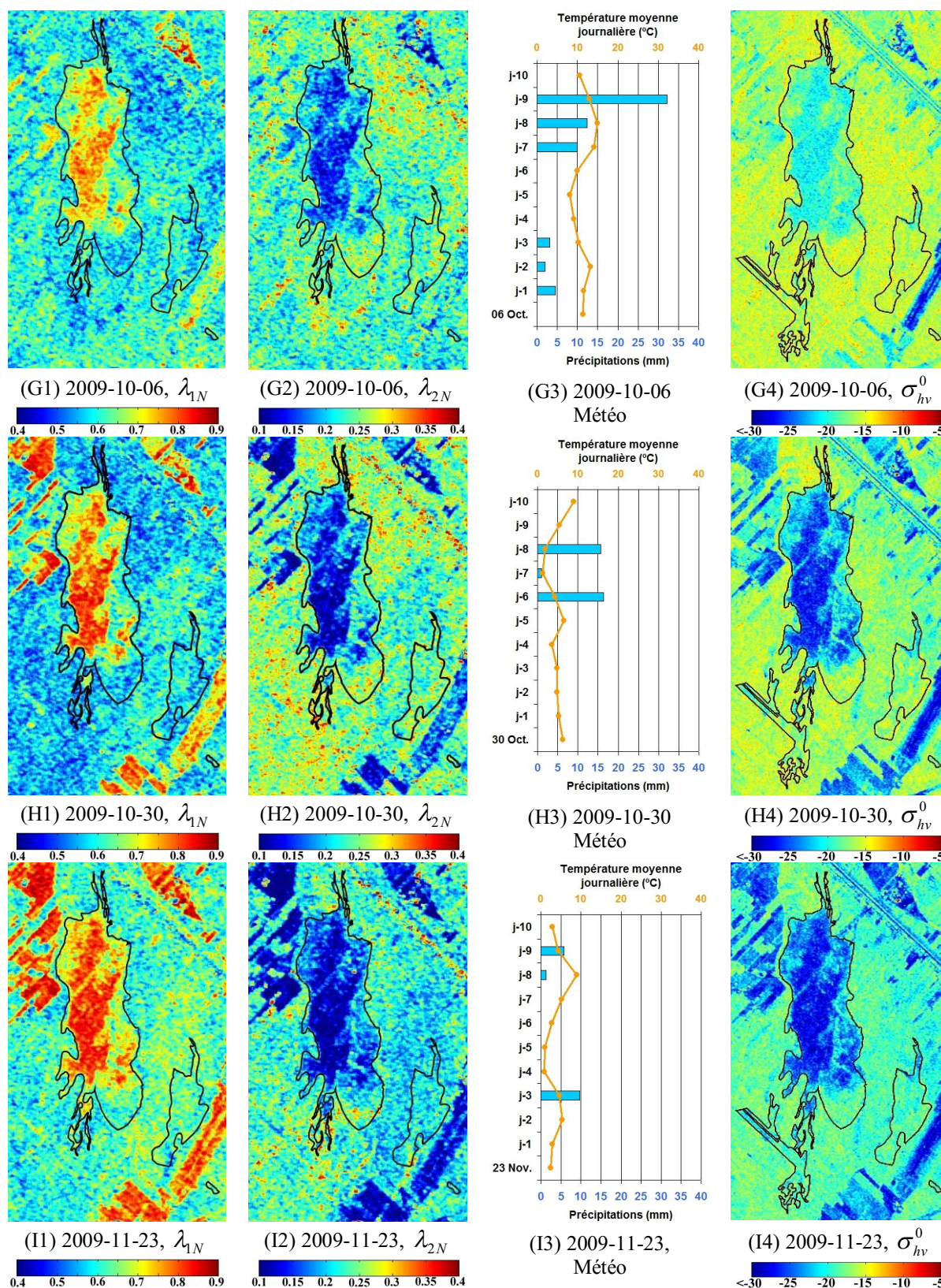
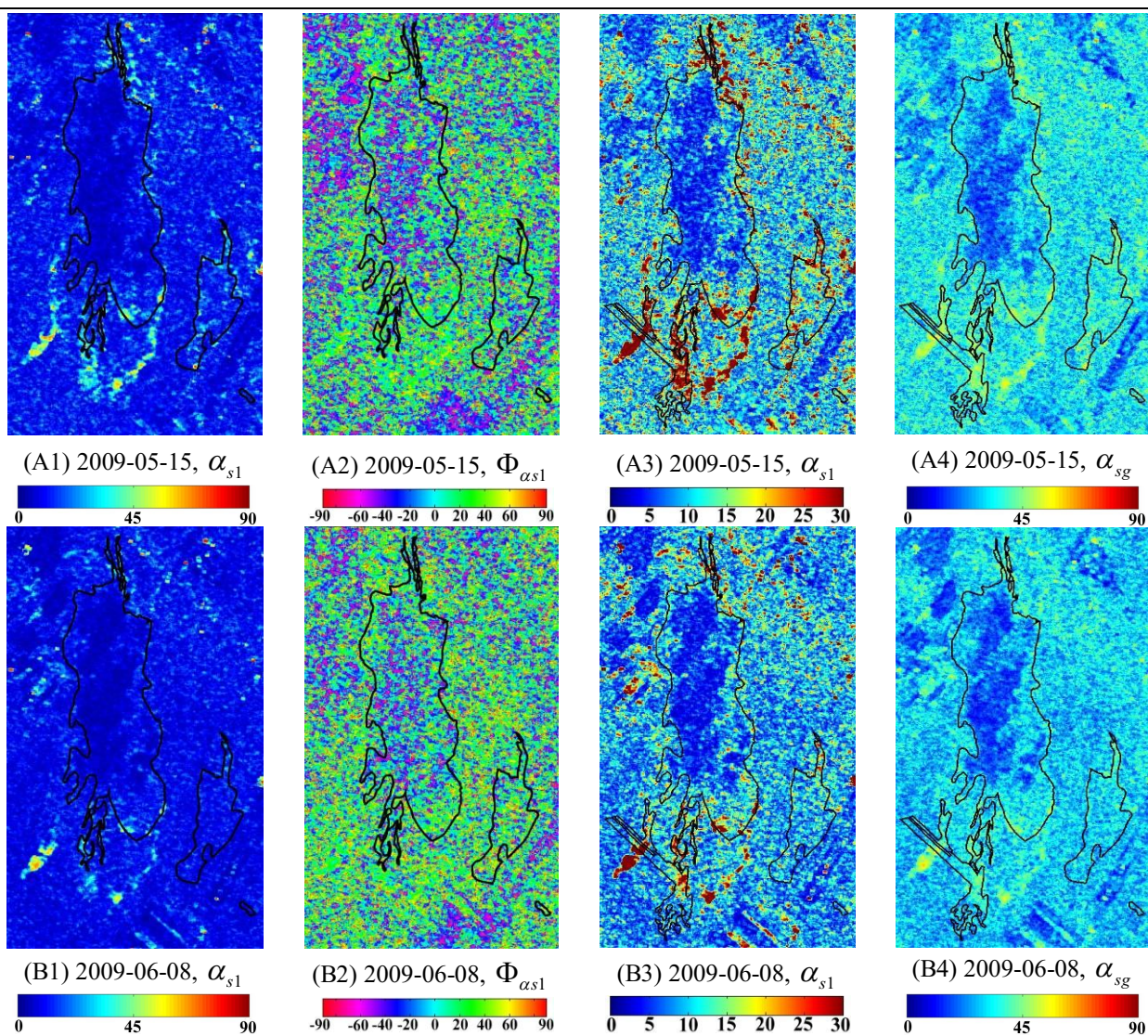
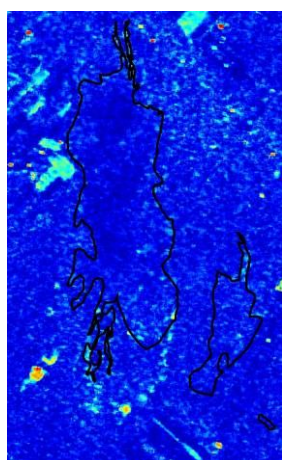
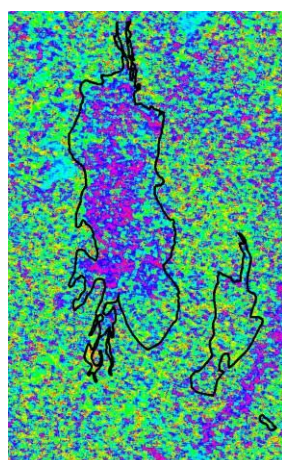
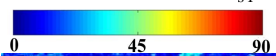
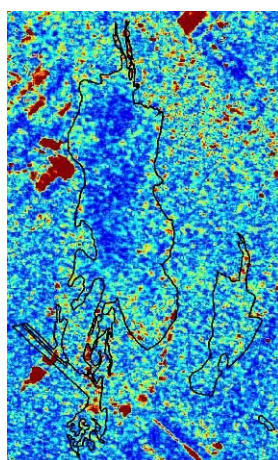
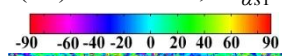
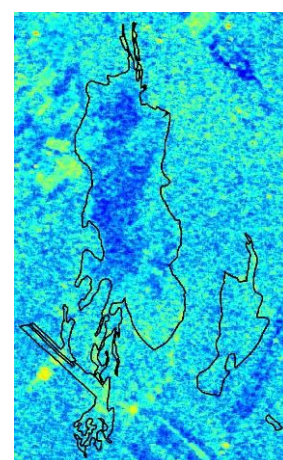
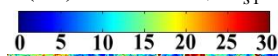
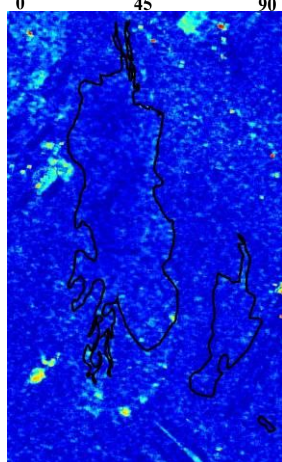
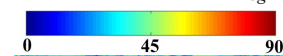
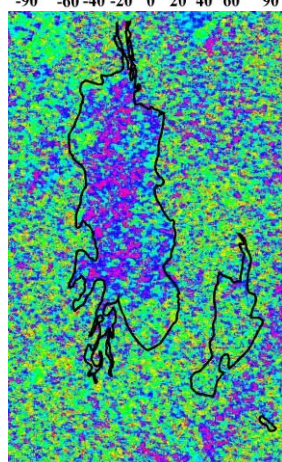
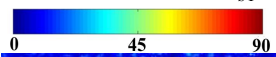
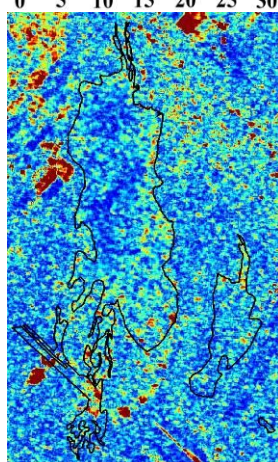
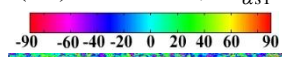
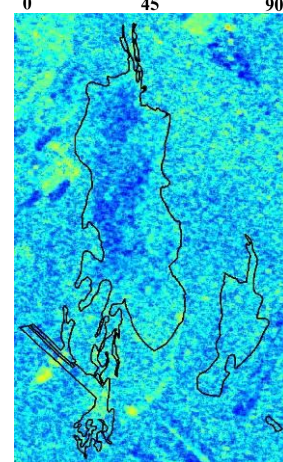
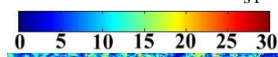
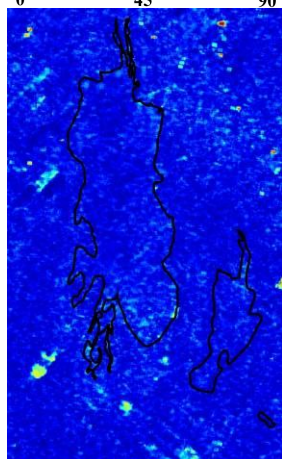
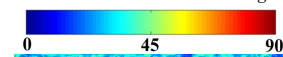
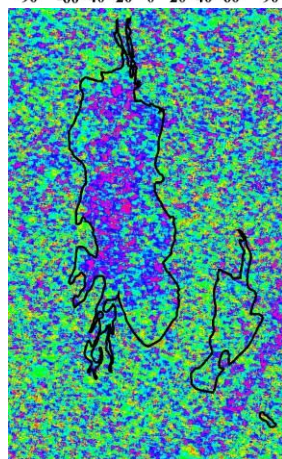
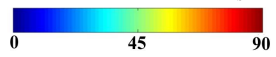
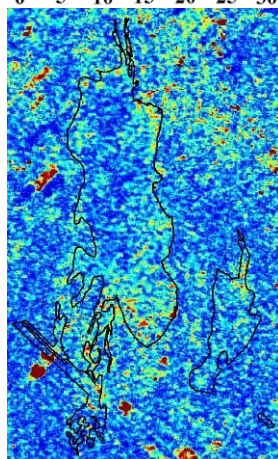
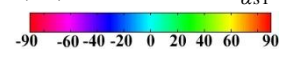
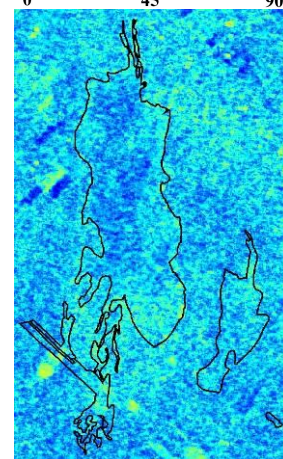
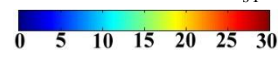
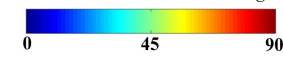


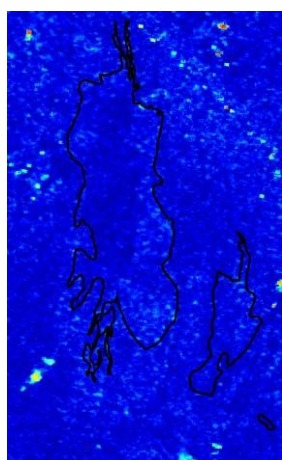
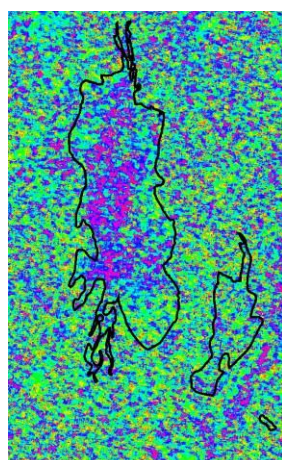
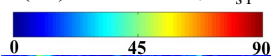
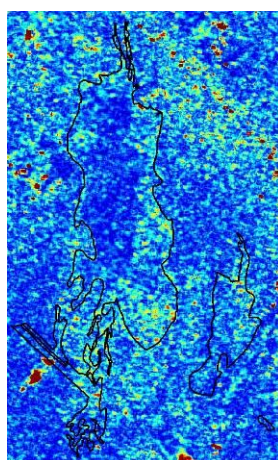
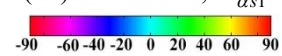
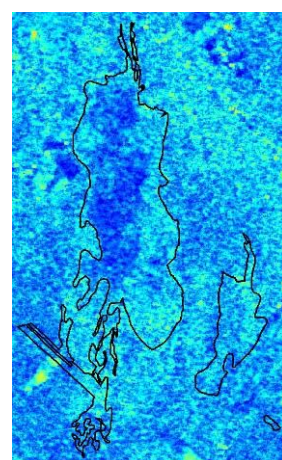
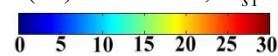
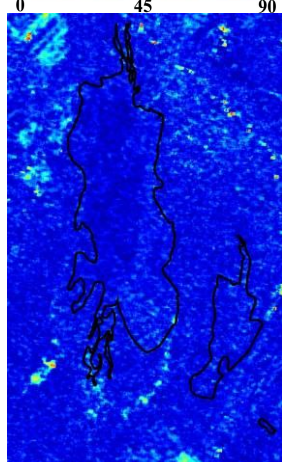
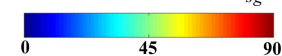
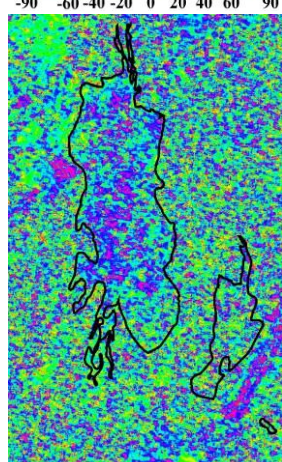
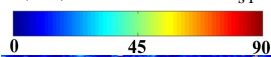
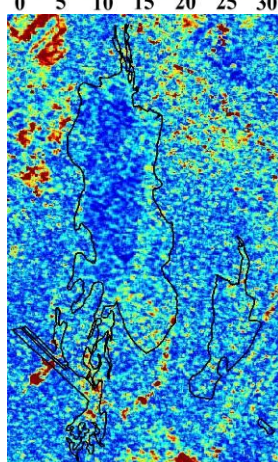
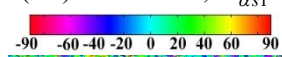
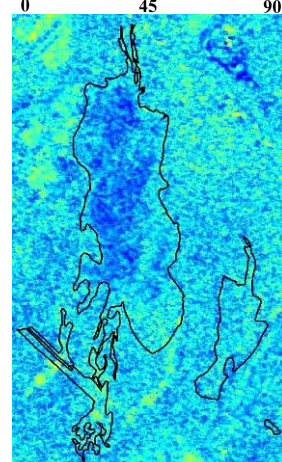
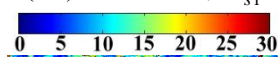
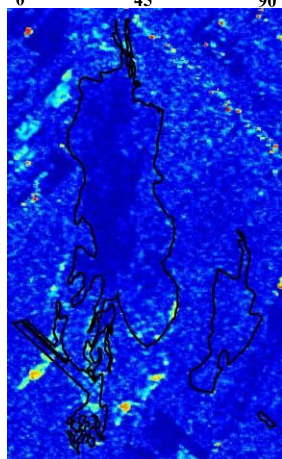
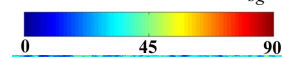
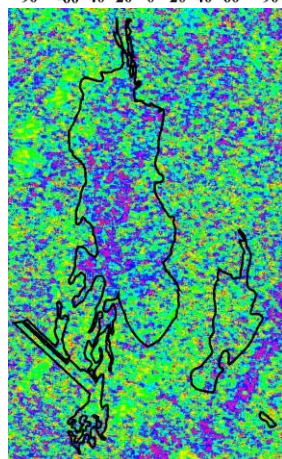
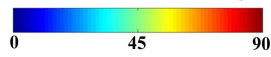
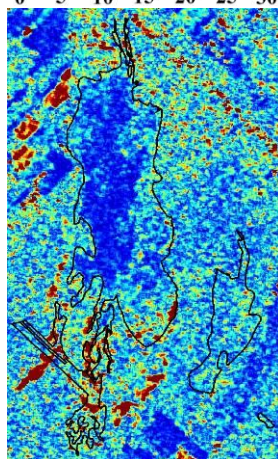
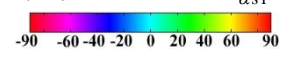
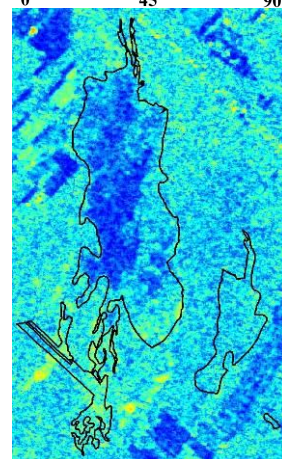
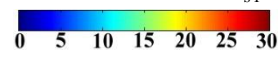
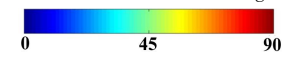
Figure 16.2-2 : Évolution temporelle des deux premières valeurs propres ($\lambda_{1N}, \lambda_{2N}$) et de la polarisation croisée (σ_{hv}^0), série temporelle FQ21-D, saison 2009

16.2.3. Paramètres α_{s1} et $\Phi_{\alpha s1}$

La Figure 16.2-3 montre que le type dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{s1}) se montre plus robuste que la radiométrie face aux variations de l'humidité ce qui confirme les observations faites aux chapitres précédents. Des variations fonction des conditions météorologiques sont tout de même apparentes en lorsque l'on rehausse α_{s1} (Figure 16.2-3-A3 à I3) mais les écarts observés restent minimes.



(C1) 2009-07-02, α_{s1} (C2) 2009-07-02, $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (C3) 2009-07-02, α_{s1} (C4) 2009-07-02, α_{sg} (D1) 2009-07-26, α_{s1} (D2) 2009-07-26, $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (D3) 2009-07-26, α_{s1} (D4) 2009-07-26, α_{sg} (E1) 2009-08-19, α_{s1} (E2) 2009-08-19, $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (E3) 2009-08-19, α_{s1} (E4) 2009-08-19, α_{sg} 

(F1) 2009-09-12, α_{s1} (F2) 2009-09-12, $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (F3) 2009-09-12, α_{s1} (F4) 2009-09-12, α_{sg} (G1) 2009-10-06, α_{s1} (G2) 2009-10-06, $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (G3) 2009-10-06, α_{s1} (G4) 2009-10-06, α_{sg} (H1) 2009-10-30, α_{s1} (H2) 2009-10-30, $\Phi_{\alpha_{s1}}$ (H3) 2009-10-30, α_{s1} (H4) 2009-10-30, α_{sg} 

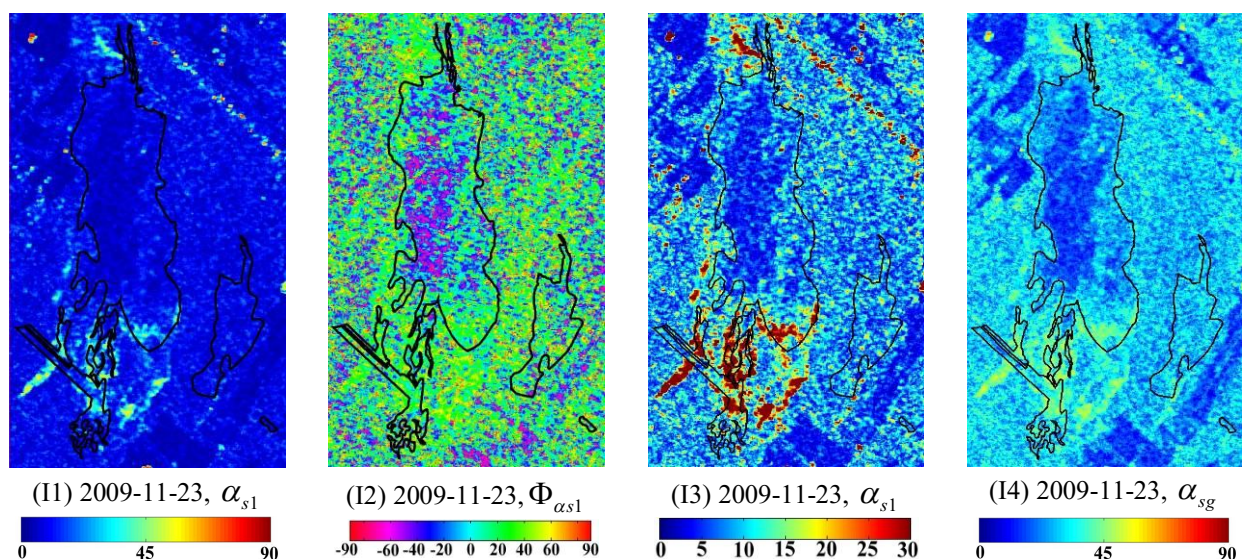


Figure 16.2-3 : Évolution du type global et dominant de rétrodiffusion symétrique (α_{sg} , α_{s1}) et de la phase de Touzi ($\Phi_{\alpha_{s1}}$), série temporelle FQ21-D, saison 2009

En se basant sur les conclusions tirées de la section 16.1 et des conditions météorologiques de la saison 2009 (Figure 16.2-2), on peut émettre une hypothèse quant à la gamme des valeurs de la phase polarimétrique (indiquée par des couleurs dans la Figure 16.2-3-A2 à I2) en fonction de l'hydrologie des tourbières. Si l'on compare la couleur dominante anticipée de la phase à celle observée (Tableau 16.2-1), on remarque qu'il n'y a pas toujours de concordance.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	15 mai	8 juin	2 juillet	26 juillet	19 aout	12 sept.	10 octobre	30 octobre	23 nov.
Temps	Humide	sec	Pr. jour même	Pr. jour même	sec	t.sec	Humide	sec	sec
Phase anticipée	Mauve	Bleue	Mauve	Mauve	Bleu-mauve	Bleue	Mauve	Bleue	Bleue
Phase observée	Bleu-mauve	Bleue	Mauve	Mauve	Mauve	Mauve	Bleu-mauve	Mauve-bleue	Mauve-bleue
α_{s1} -BOG	5.45	4.78	6.64	7.79	7.40	5.56	6.53	4.86	4.95
α_{s1} -FEN	6.41	5.56	9.03	10.36	10.08	6.90	8.60	6.03	6.48
$\Phi_{\alpha_{s1}}$ -BOG	-15.27	-9.79	-28.05	-32.55	-27.96	-26.46	-19.55	-15.24	-22.28
$\Phi_{\alpha_{s1}}$ -FEN	-3.76	-7.35	-32.62	-26.55	-23.42	-21.13	-18.11	-17.29	-12.66

Tableau 16.2-1 : Résumé des conditions météorologiques et des valeurs attendues et observées de la phase $\Phi_{\alpha_{s1}}$, série FQ21-D, saison 2009

La présence de la végétation ne peut pas tout expliquer quant à l'absence d'une relation relation forte entre $\Phi_{\alpha_{s1}}$ et l'hydrologie des tourbières. Par exemple, pour les images du 30

octobre et du 23 novembre, acquises en conditions très sèches, la phase observée aurait dû être centrée sur 0° et afficher une nette dominance des teintes bleutées d'autant plus que la biomasse foliaire est peu influente sur le signal au cours de cette période. Cette situation peut aussi être appliquée à l'image du 12 septembre avec la possibilité cependant d'une plus grande influence de la biomasse foliaire.

À l'inverse, les images du 15 mai (Figure 16.2-3-A) et du 8 juin (B) affichent les teintes les plus bleutées, ce qui est aussi observable au Tableau 16.2-1 par les valeurs plus élevées de $\Phi_{\alpha s1}$ pour ces dates. Or pour le 15 mai, une dominance de teinte violacée était attendue. Quant au 2 et au 6 juillet (Figure 16.2-3, C et D), la correspondance entre les conditions humides et les teintes à dominance violacée semble fortuite et attribuable aux précipitations étant survenues le jour même.

Une explication plausible de ce manque de relation forte entre $\Phi_{\alpha s1}$ et l'hydrologie de la Tourbière de la Baie des Mines est le faible rapport signal/bruit du canal σ_{hv}^0 (environ -25dB) en mode FQ (Touzi, 2012). La conséquence est qu'en conditions très sèches (lorsque $\sigma_{hv}^0 < -25\text{dB}$ approximativement), ce canal est contaminé par les canaux H et V. Or, une mesure très pure de HV est nécessaire lors de la décomposition (pour un changement de base) si l'on veut détecter la présence d'eau sous la surface avec la phase.

16.2.4. Mode FQ02, novembre 2009

L'image FQ02-A du 26 novembre s'inscrit dans la continuité de la série temporelle FQ21-D où l'on observe une première valeur propre dominante avec $\lambda_{1N} > 0.85$ (Figure 16.2-4-A). Le canal σ_{hv}^0 (Figure 16.2-4D) est cependant plus fort que ceux observés pour les acquisitions FQ21-D du 30 octobre et 23 novembre de la série FQ21-D, hausse que l'on peut attribuer aux précipitations survenues la journée avant l'acquisition.

La phase $\Phi_{\alpha s1}$ est aussi en continuité avec les valeurs de série FQ21-D (Tableau 16.2-1) avec une valeur moyenne de -15.4 ± 10.7 pour les bogs et de -20.64 ± 10.7 pour les fens. Mais la

dominance des teintes bleutées (Figure 16.2-4F) entre cependant en contradiction avec des conditions météorologiques qui auraient dû produire des teintes violacées d'autant plus que l'angle d'incidence étroit du mode FQ02 aurait dû faciliter la pénétration du signal sous la tourbe.

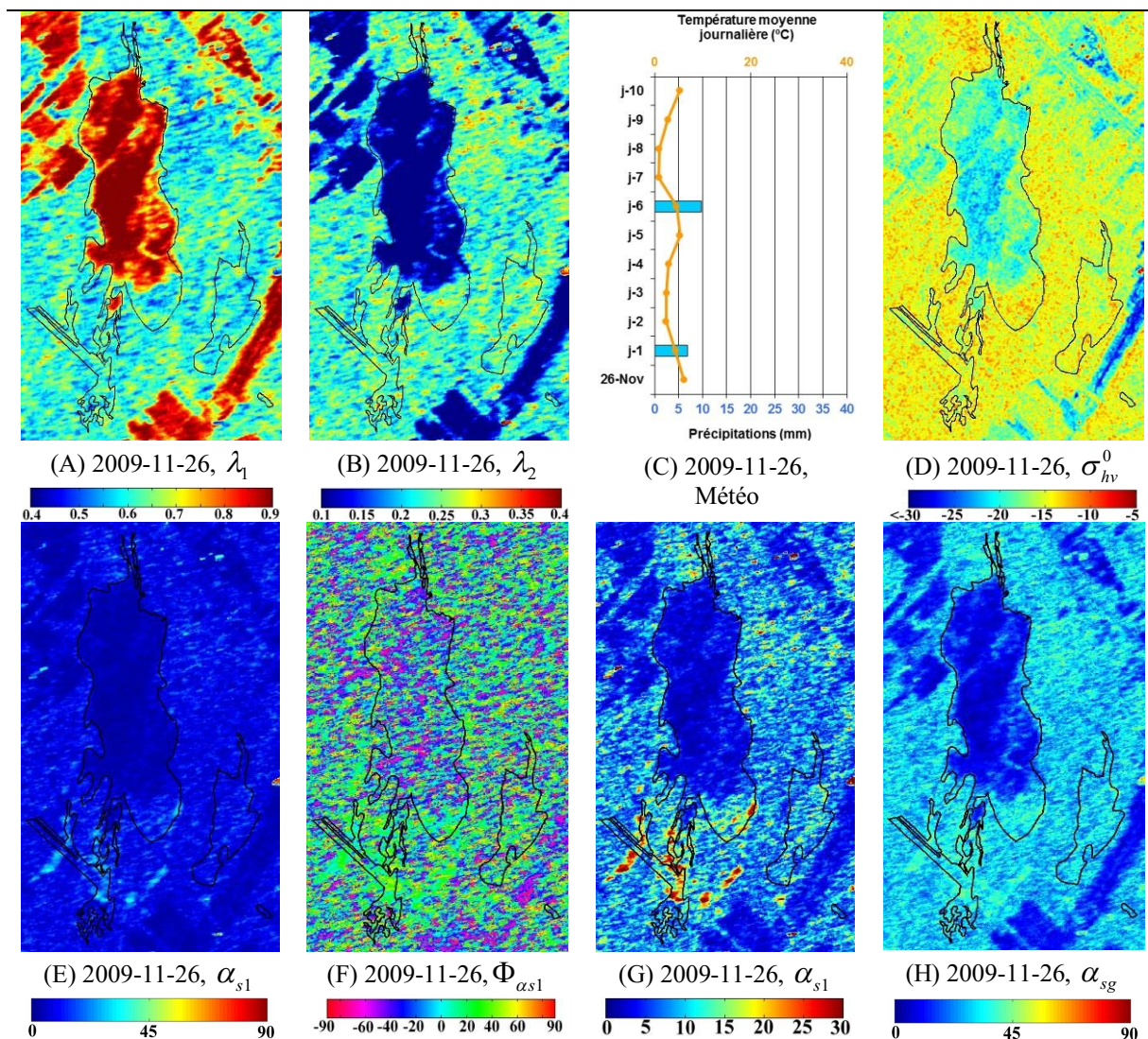
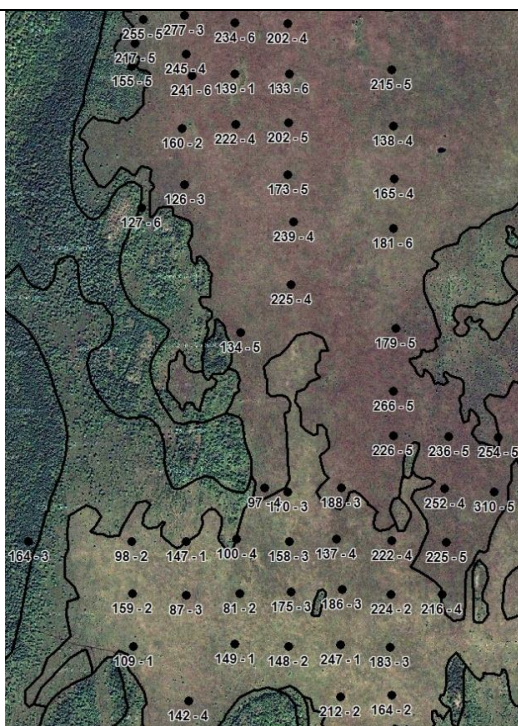
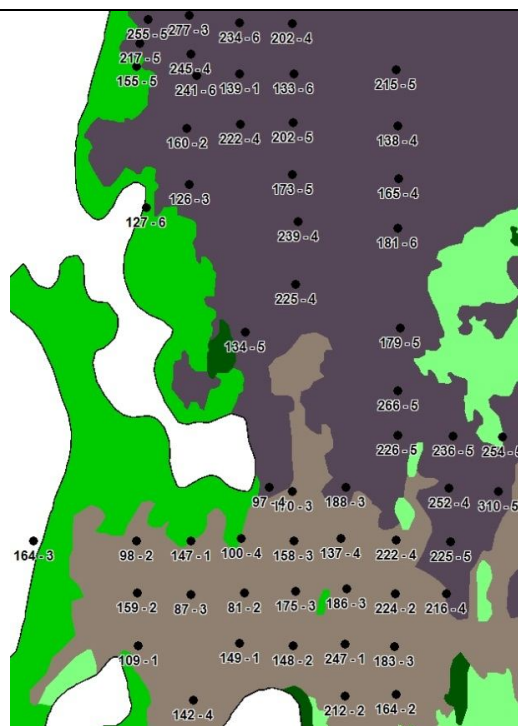


Figure 16.2-4 : Valeurs propres (λ_{1N} , λ_{2N}), polarisation croisée (σ_{hv}^0) et paramètres α_{s1} , $\Phi_{\alpha s1}$ et α_{sg} de la décomposition de Touzi, image FQ02-A, 2009-11-26

Les mesures prises sur le terrain les 26 et 27 novembre 2009 (Figure 16.2-5, A et B) ont permis d'obtenir une meilleure connaissance de la tourbière de la Baie des Mines. Diverses analyses de régression ont été tentées entre $\Phi_{\alpha s1}$, la profondeur de la tourbe et la saturation en eau pour des zones de 8 m² et de 24 m² centrées sur chaque point d'échantillonnage pour l'image RS2 FQ02 du 26 novembre. Aucun résultat notable (non présentés) n'a pu être obtenu ce qui n'est guère étonnant compte tenu des raisons déjà évoquées à la section précédente.

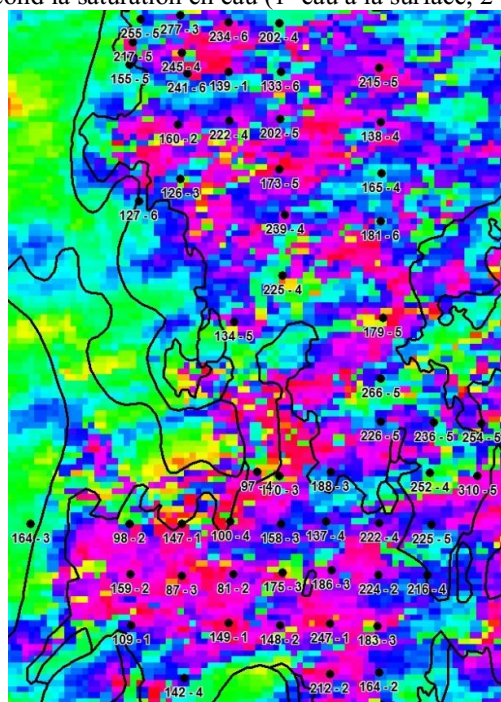
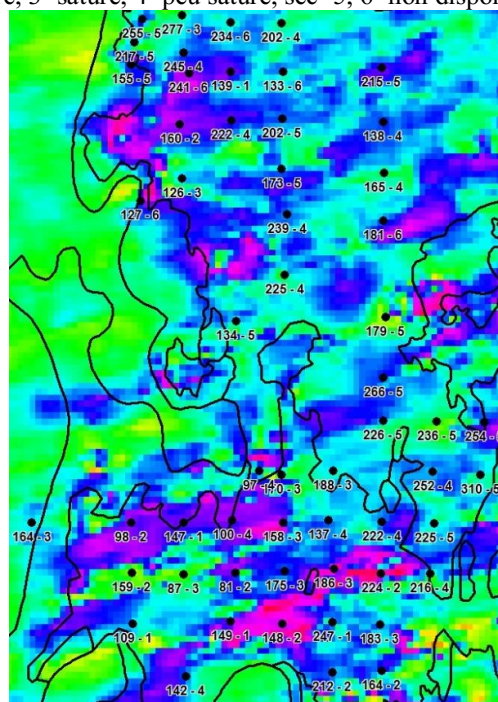


(A) Ikonos-2, 2005-06-02



(B) Profondeur de la tourbe et conditions de saturation à la surface

Note : Le premier chiffre indique la profondeur moyenne de la tourbe en cm (moyenne de trois mesures) et le second la saturation en eau (1=eau à la surface, 2=très saturé, 3=saturé, 4=peu saturé, sec=5, 6=non disponible.).

(C) Alos-Palsar, 2006-11-10, $\Phi_{\alpha s1}$
(conditions humides)(D) Alos-Palsar, 2007-05-13, $\Phi_{\alpha s1}$
(conditions sèches)

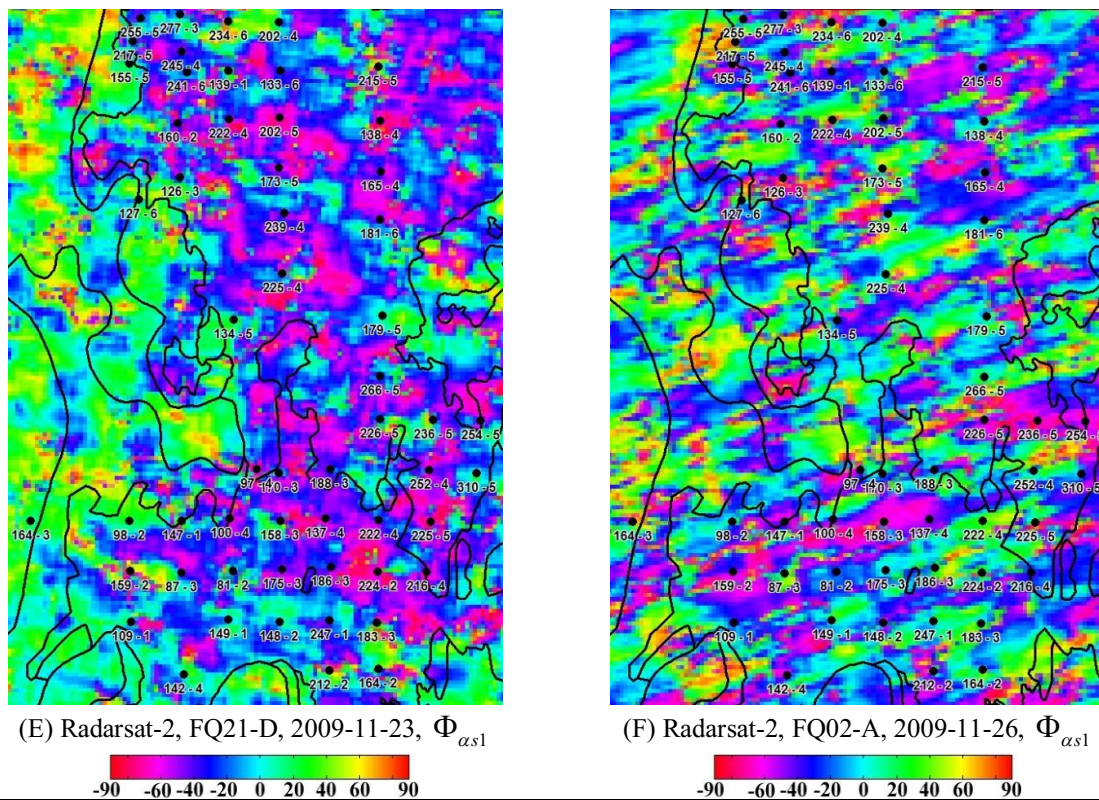


Figure 16.2-5 : Comparaison du comportement de la phase $\Phi_{\alpha s1}$ pour deux images ALOS-PALSAR et deux images RADARSAT-2

16.3. Résumé

(Section 16.1) ■ Avec les images ALOS-PARSAR, seule la phase $\Phi_{\alpha s1}$ s'est montrée sensible aux variations du niveau d'eau sous la surface d'une tourbière, notamment en comparaison de la phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$. Cela peut s'expliquer par le fait que $\Phi_{\alpha s1}$ ne représente que la portion dominante de la rétrodiffusion et qu'elle est indépendante d'une base de polarisation. La microtopographie ou encore des effets liés à la propagation de l'onde sous la surface fait en sorte que la différence de phase liée la présence de l'eau sous la surface peut ne pas être alignée dans la base H-V. Cette observation est supportée par les valeurs de ψ_1 non nulles observées pour la tourbière de la Baie des Mines (Figure 16.1-3). (Section 16.2) ■ Avec les images RS2, la phase $\Phi_{\alpha s1}$ s'est montrée peu sensible aux variations attendues du niveau d'eau sous la surface de la tourbière de la Baie des Mines. Cela s'explique d'une part à la plus courte longueur d'onde de la bande C et à sa capacité moindre de pénétration et à la plus grande influence de la végétation pour cette bande. ■ L'influence de la biomasse foliaire des arbrisseaux ([A3]) est particulièrement importante au cours de l'été de l'automne peu de temps après une précipitation.

CHAPITRE 17

17. CONCLUSION

Les milieux humides remplissent plusieurs fonctions écologiques d'importance et contribuent à la biodiversité de la faune et de la flore. Même s'il existe une reconnaissance croissante de l'importance de protéger ces milieux, il n'en demeure pas moins que leur intégrité est encore menacée par la pression des activités humaines. La conservation et la protection des milieux humides deviennent aujourd'hui une priorité pour plusieurs gouvernements et agences à travers le monde. Il est ainsi impératif de développer des méthodologies permettant leur inventaire et leur suivi sur une base systématique. Par la vue synoptique du territoire qu'elle offre, la télédétection constitue le seul moyen réaliste et efficace permettant de procéder à de vastes inventaires des milieux humides à intervalles réguliers à une échelle régionale.

L'objectif de cette thèse consistait à contribuer à un inventaire détaillé des milieux humides et de leur régime hydrique en se servant d'informations extraites des décompositions polarimétriques. Un tel exemple de contribution consisterait à réussir un arrimage avec un système de classification existant, celle du SCMHQ (section 5.4) par exemple et cet arrimage se base sur les physionomies végétales (chapitre 7). La première hypothèse sur laquelle cette thèse était fondée stipulait que les classes de physionomies végétales, basées sur la structure des végétaux, étaient plus appropriées que les classes d'espèces végétales car mieux adaptées au contenu informationnel des images radar polarimétriques. La seconde hypothèse voulait que les paramètres de la décomposition incohérente de Touzi permettent une extraction optimale de l'information polarimétrique comparativement à une approche multipolarisée basée sur les canaux de polarisation HH, HV et VV.

Malgré une vingtaine d'années de recherche dans le domaine démontrant son potentiel, la polarimétrie radar reste sous-utilisée en ce qui concerne la cartographie et le suivi des ressources naturelles et des milieux humides en particulier. On retrouve actuellement des études expliquant et comparant entre elles les différentes décompositions polarimétriques sur une base théorique et mathématique. À l'autre extrémité, on retrouve bon nombre d'études qui s'intéressent à la cartographie de divers milieux, mais dont l'intérêt se situe avant tout dans le développement des techniques de classification automatisée. Dans ce type d'étude, une vaste

gamme de paramètres polarimétriques est utilisée et leur utilité évaluée sous un aspect purement statistique ou mathématique. Cette thèse se voulait être à mi-chemin entre ces deux extrêmes et de là sa contribution à l'état des connaissances par une compréhension approfondie de l'interaction entre le signal radar polarimétrique et les milieux humides.

17.1. Réalisation des objectifs

Pour atteindre l'objectif de cette thèse et valider des hypothèses, deux objectifs spécifiques ont été établis soit : **(i)** Analyser les données polarimétriques en relation aux propriétés géométriques des physiologies végétales présentes dans les milieux humides et conclure sur les possibilités de discrimination entre les diverses physiologies végétales; **(ii)** Comparer les résultats obtenus avec les paramètres de décomposition polarimétrique à ceux obtenus avec des canaux de polarisation synthétisés par les données polarimétriques afin de conclure sur le gain en information offert par les décompositions par rapport aux canaux de polarisation HH, HV et VV.

Le premier objectif visait surtout à obtenir une compréhension approfondie des relations existant entre les paramètres de la décomposition de Touzi et les classes de physiologies végétales en fonction, notamment, des conditions environnementales et de l'évolution saisonnière des physiologies. Le second objectif consistait démontrer que la polarimétrie radar (et les paramètres polarimétriques) apportait une contribution significative pour l'amélioration de l'inventaire des milieux humides basé sur le concept des physiologies végétales par rapport aux canaux de polarisation.

17.1.1. Compréhension approfondie des paramètres polarimétriques

L'analyse des données polarimétriques pour une compréhension approfondie des paramètres de la décomposition de Touzi a fait l'objet des chapitres 10 à 15 et 17. Soulignons que chacun de ces chapitres se termine par un résumé soulignant les principales notions acquises concernant la caractérisation ou la classification des physiologies végétales des milieux humides.

17.1.2. Paramètres de la 1^{re} composante vs les paramètres de la 2^e et 3^e composante de la décomposition de Touzi

On a vu que les paramètres de la 1^{re} première composante, qui concerne la portion dominante du signal rétrodiffusé, sont suffisants pour comprendre la nature de la rétrodiffusion des classes de physiologies végétales. À titre d'exemple, l'espace $\alpha_{s1} - \Phi_{\alpha s1}$ contient à peu près l'essentiel de l'information nécessaire pour une discrimination entre les grands groupes de physiologies [voir les sections 10.3 (Bande L) et 12.5.1 (bande C)]. Ainsi, bien que les paramètres de la 2^e et 3^e composantes puissent représenter plus de 40% du signal rétrodiffusé ($\lambda_{2N} + \lambda_{3N}$), elles ne sont généralement pas essentielles pour la compréhension générale de la rétrodiffusion d'une physiologie végétale. Aucun paramètre de la seconde composante n'a été sélectionné comme principale source de discrimination entre deux classes physiologiques lorsque les paramètres de la première composante ont été conjointement utilisés (section 11.4 et chap.13).

Les analyses présentées dans cette thèse ont aussi révélé que l'interprétation des paramètres des 2^e et 3^e composantes apporte peu d'information qualitative sur le type de rétrodiffusion. Par exemple, la relation entre α_{s1} et α_{s2} , en fonction de λ_{1N} (section 10.5), peut être aléatoire ou encore purement mathématique. En d'autres mots, savoir que $\alpha_{s1}=30^\circ$ et $\alpha_{s2}=45^\circ$ ne permet pas de conclure en la présence d'une rétrodiffusion de surface anisotrope dominante associée à une rétrodiffusion dipolaire. S'il y a présence d'un second mécanisme de rétrodiffusion significatif, ce sera le contexte (autres paramètres, connaissance du milieu) plus que la valeur quantitative de α_{s2} qui permettra d'identifier la nature du second mécanisme de rétrodiffusion. Un exemple a été fourni à la section 12.2.3 et au chapitre 14 pour la classe [h1] où c'est la valeur de la phase $\Phi_{\alpha s1}$ qui a permis de déduire la nature d'un second mécanisme de rétrodiffusion. Alors que α_{s1} se maintient dans la zone de rétrodiffusion dipolaire après la période d'émergence, la phase $\Phi_{\alpha s1}$ et non α_{s2} permet de comprendre que la rétrodiffusion dipolaire est plus attribuable à une mixité entre une rétrodiffusion double-bond et de surface dont les contributions relatives varient au cours de la saison de croissance.

Autre exemple, l'analyse de $\Phi_{\alpha s 2}$ (non présentée), τ_2 (section 10.6) et ψ_2 (section 10.7) n'a pas permis d'obtenir d'informations supplémentaires quant à un attribut physique des physiologies végétales et encore moins pour les paramètres de la 3^e composante. Un apport de cette thèse aura été de démontrer qu'il est prudent de considérer individuellement les paramètres α_s , $\Phi_{\alpha s}$, ψ et τ plutôt que leur somme pondérée par leurs valeurs propres pour la compréhension des mécanismes de rétrodiffusion présent dans une physiologie végétale.

Mais cela ne veut pas dire pour autant que les paramètres des 2^e et 3^e composantes ne sont pas utilisés pour une caractérisation complète de la rétrodiffusion et en particulier concernant le second objectif de cette thèse soit la discrimination/classification des physiologies végétales. Les analyses de séparabilités (section 11.4 et chapitre 13), basées sur l'algorithme de la divergence transformée (section 8.5.3), ont démontré que l'introduction des 2^e et 3^e composantes a toujours permis d'améliorer la séparabilité générale entre les classes physiologiques, tant avec les données ALOS que RS2. Cela implique que la contribution des paramètres des 2^e et 3^e troisièmes composantes se situe dans un espace multidimensionnel difficile à appréhender visuellement par la comparaison deux à deux des paramètres (parfois en fonction d'un troisième) à l'aide de diffusiogrammes.

17.1.3. Paramètres de structures et paramètres radiométriques

Un autre apport de cette thèse aura été de mettre en lumière la complémentarité entre les paramètres de structure (α_{si} , $\Phi_{\alpha si}$, ψ_i , τ_i et λ_{iN} , $i=1,2,3$) et ceux relatifs à la radiométrie du signal ($span$, λ_i , $i=1,2,3$). Les paramètres de structure, pour lesquels la radiométrie est normalisée, tels α_{s1} et $\Phi_{\alpha s1}$, permettent d'identifier quel est le type de rétrodiffusion pour une classe physiologique ou un objet donné et permettent également une discrimination entre les grands groupes de physiologies ([A1] vs [H2] ou [A1] vs [A3], [H2] vs [h1]). Les paramètres ψ_1 , τ_1 contribuent peu à la séparabilité des classes physiologiques (à l'exception parfois des classes dénudées [D]) mais permettent de mieux comprendre les caractéristiques des mécanismes de rétrodiffusion pour des cas particuliers.

Par exemple, τ_1 (section 10.6) s'est montrée sensible à la structure de certaines physiologies dénudées (sous ensemble des classes c5, c8, c12, c14) causées par la présence de sillons, et le signe τ_1 a été lié à l'orientation de ces sillons par rapport au LOS du capteur. De plus, τ_1 a été lié aux "objets découplés" observés dans l'espace $\alpha_{s1} - \alpha_{s2}$ (section 10.5). De plus, dans un contexte de cible distribuée, de faibles valeurs pour τ_1 ($\approx |\tau_1| > 2.5^\circ$) suffisent à indiquer un bris de symétrie azimutale. Aucune corrélation forte n'a cependant été observée entre τ_1 et σ_{hv}^0 au sens où un bris de symétrie azimutale entraînerait une forte dépolarisation du signal noté par une augmentation de σ_{hv}^0 . L'interprétation du paramètre ψ_1 (section 10.7) s'est révélée être plus difficile. Cette thèse a néanmoins mis en lumière quelque une de ses contributions. Pour les physiologies dénudées ([D]) dont la rétrodiffusion de surface est dominante, il est possible de retrouver avec le signe de ψ_1 une information similaire au ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$: ψ_1 est négatif lorsque $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 < 1$ et ψ_1 est positif lorsque $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0 > 1$. Il est donc possible en combinant α_{s1} et ψ_1 de retrouver entièrement l'information contenue dans le ratio $\sigma_{hh}^0 / \sigma_{vv}^0$ ce qui est important pour la caractérisation de la rugosité des physiologies dénudées. L'angle d'orientation ψ_1 a également permis de comprendre que l'orientation des marais à Scirpe ([h1]) peut créer une dépolarisation du signal faisant en faisant augmenter HV mais dont l'effet est compensé dans λ_3 (proportionnellement à ψ_1 , section 12.5.3). Finalement, les valeurs propres normalisées, particulièrement l'espace λ_{1N} , λ_{2N} ou $\lambda_{1N} - A$ (section 10.4.2 et 12.5-2) s'est montrée plus fiable que l'Anisotropie utilisée seule pour l'identification des objets possédants un second mécanisme de rétrodiffusion significatif.

Traditionnellement, l'aspect radiométrique a été ignoré (normalisée) dans plusieurs décompositions polarimétriques. La décomposition de Cloude (Cloude et Pottier, 1997) ne comporte pas de paramètres relatifs à la radiométrie dans l'espace $\bar{\alpha}_C - E$ et A . La décomposition de Freeman (Freeman et Durden, 1998) est souvent utilisée dans sa version normalisée ($F_{\%vol}$, $F_{\%dbl}$, $F_{\%odd}$). Un examen de la Figure 10.8-1 montre la complémentarité entre la structure et la radiométrie. Alors que le *span* permet une distinction en physiologies dénudées humides et sèches peu rugueuse (confondues avec α_{s1} qui normalise cet effet), c'est α_{s1} qui permet de distinguer les physiologies dénudées humides et des physiologies

arborées ([A1]) des milieux secs ou humides. Le *span* et les valeurs propres λ_1 , λ_2 et λ_3 sont essentiels pour la classification des types de physionomies et pour l'estimation des caractéristiques biophysiques telle la biomasse aérienne. L'ensemble des analyses de séparabilités des classes (section 11.4 et chapitre 13) a démontré que l'introduction de la radiométrie (représentée par le *span*) a toujours entraîné une amélioration significative de la séparabilité des classes.

17.1.4. L'apport de la phase $\Phi_{\alpha s1}$

L'apport de la phase $\Phi_{\alpha s1}$ pour la caractérisation des tourbières ouvertes et en particulier pour la détection de la présence d'eau sous la surface, a fait l'objet du chapitre 16. Ce chapitre se voulait une extension des observations faites dans Touzi et *al.*, 2009 ainsi que dans Touzi et Gosselin (2010).

Avec les images ALOS-PARSAR, seule la phase $\Phi_{\alpha s1}$ s'est montrée sensible aux variations du niveau d'eau sous la surface d'une tourbière, en comparaison notamment de la phase $\phi_{hh} - \phi_{vv}$. Cela peut s'expliquer par le fait que $\Phi_{\alpha s1}$ ne représente que la portion dominante de la rétrodiffusion et qu'elle est indépendante d'une base de polarisation. La microtopographie ou encore des effets liés à la propagation de l'onde sous la surface fait en sorte que la différence de phase liée la présence de l'eau sous la surface peut de pas être alignée dans la base H-V. Cette observation est supportée par les valeurs de ψ_1 non nulles observées pour la tourbière de la Baie des Mines (Figure 16.1-3). Avec les images RS2, la phase $\Phi_{\alpha s1}$ s'est montrée peu sensible aux variations attendues du niveau d'eau sous la surface de la tourbière de la Baie des Mines. Cela s'explique d'une part par la plus courte longueur d'onde de la bande C, à sa capacité moindre de pénétration, et à la plus grande influence de la végétation pour cette bande. L'influence de la biomasse foliaire des arbrisseaux ([A3]) est particulièrement importante au cours de l'été et à l'automne peu de temps après une précipitation (section 16.2.2). Mentionnons aussi que la phase $\Phi_{\alpha s1}$ a également été essentielle pour la caractérisation des physionomies de la classe ([H2]), en l'occurrence des hauts-marais à Phalaris ([H2-88]) des autres occupations du sol et ce tant pour ALOS (section 11.2 et 11.4.2) que RS2 (section 12.5.1 et 14.1 en autres).

Pour l'ensemble des arguments présentés dans les trois sous-sections précédentes, nous pouvons affirmer que le premier objectif de la thèse a été largement atteint.

17.2. Apport des paramètres de la décomposition de Touzi par rapport aux canaux de polarisation HH, HV, VV

Un autre objectif cette thèse consistait à démontrer que les images RSOPOL et paramètres polarimétriques offraient plus que les canaux de polarisation HH, HV et VV. La section 10.1 s'est attardée sur une description générale des espaces constitués des canaux de polarisation HH-VV et HH-HV. Une combinaison des canaux de polarisation HH et VV ou HH et HV n'est pas suffisante pour caractériser et discriminer la majorité des classes de physiologies végétales (section 10.1). Les canaux HH et VV ne permettent pas de discriminer plusieurs classes dénudées humides ([D], c5, c7, c12 et c14) des physiologies dénudées sèches. Il est également impossible de discriminer les classes physiologiques des tourbières ([A2], [h1] et [A2]) des autres classes. Les hauts marais à Phalaris ([H2], c171) sont également confondus avec les physiologies dénudées sèches et une partie des physiologies arborées ou arbustives sur substrat sec ([A1], [A2]). Les canaux HH et HV permettent de distinguer les tourbières ouvertes ([A3]) des autres physiologies, mais les hauts marais à Phalaris ([H2], c171) sont encore confondus avec les physiologies dénudées sur substrats secs ([D]) et une partie des physiologies arborées ou arbustives ([A1], [A2]).

Les canaux HH, HV et VV utilisés simultanément sous forme de ratios (Figure 10.1-1) permettent d'améliorer la séparabilité entre les classes physiologiques en général. Cet espace permet également d'identifier le sous-ensemble d'objets appartenant aux physiologies dénudées ([D], classes c5, c8 et c12) qui présentent un "comportement polarimétrique distinct". Il n'est cependant pas possible, comme ce fut le cas avec les paramètres α_{si} , Φ_{asi} , ψ_i , τ_i et λ_{iN} , d'identifier l'origine de ce comportement.

Dans cette thèse, aucune information unique aux canaux de polarisation n'a été trouvée au sens où l'ensemble de l'information contenue dans ces canaux (parfois de manière redondante)

est disponible dans les paramètres de la décomposition de Touzi. Autant avec les données ALOS-PALSAR (Tableau 11.1-4) que RS2 (Tableau 13.1-1, Tableau 13.2-1 à 13.2-6), les analyses de séparabilité des classes ont toutes offert de meilleurs résultats avec les paramètres de la décomposition de Touzi lorsqu'utilisés avec le *span*. La contribution des paramètres polarimétriques par rapport aux canaux de polarisation pour la classification des physiologies végétales s'est fait sentir sur deux points particuliers :

- i. Par l'amélioration significative de la discrimination entre les physiologies des milieux secs vs celles des milieux humides. La contribution des paramètres polarimétriques et d'une plus haute dimensionnalité est particulièrement évidente pour la discrimination entre milieux secs et milieux humides. La sommation des confusions entre cultures et milieux humides n'est que 39.6% pour la configuration SVM-1C contre 88.8% pour les canaux de polarisation (config. 2A) (Tableau 14.3-1);
- ii. par le maintien d'une bonne séparabilité au cours de la saison estivale lorsque les mécanismes de rétrodiffusion cohérentes (très polarisés) diminuent en importance laissant place à une plus grande contribution de la rétrodiffusion multiple ou volumique (Tableau 13.1-1). Une analyse simple par seuillage, reposant sur une évaluation des erreurs de commissions et d'omissions, indique que la détection optimale des marécages doit reposer sur plusieurs paramètres lorsque les conditions d'acquisition ne sont pas optimales (automne, avec feuilles, bas niveau d'eau ou substrat sec). Il est donc important de disposer à la fois d'information liée à la structure ($\alpha_s, \Phi_{\alpha_s}$), à la pureté de la polarisation (λ_{iN}, λ_i) et sur la composante multipolarisée ou volumique (λ_3). Ce n'est qu'avec des données polarisées qu'il est possible de réunir ces conditions (Tableau 11.1-2).

Pour l'ensemble de ces raisons, incluant plusieurs éléments présentés à la section 17.1, il est possible d'affirmer que le second objectif de cette thèse a été atteint.

17.3. Validité des classes de physiologies végétales par rapport aux classes basées sur les espèces végétales

Au cœur de cette thèse se trouvait la notion de physiologie végétale comme élément de base de l'inventaire et du suivi des milieux humides. Il a été mentionné que certains systèmes de

classification des milieux humides, le SCMHQ en particulier, intègrent déjà la notion de physionomie végétale dans leur système de classification (section 5.4 et 7.1). Il a également été expliqué en quoi les physionomies végétales, en équilibre avec les biotopes, représentent un indicateur sur lequel il est possible de baser une méthodologie de suivi des milieux humides par télédétection (section 7.1 et 7.2) pour éviter la création de classes ad hoc. L'un des défis posés par cette thèse consistait au fait: **(i)** qu'il n'existe pas de système standard énumérant l'ensemble des classes de physionomies végétales possible avec des caractéristiques précises quant à leur structure et; **(ii)** qu'il n'existe pas, à la connaissance de l'auteur, de vérité terrain exprimé en termes de physionomies végétales. Une grande attention a donc été portée à la création d'une série de classes physionomiques par recoupement de sources diverses (Annexe 1, chapitre 9, Tableau 9.3-1) et qui a culminé en une proposition de 9 classes physionomiques (Tableau 9.2-1) qui englobent les classes physionomiques énumérées dans le SCMHQ (Figures 5.4-1 à 5.4-5).

Les classes [H1], [h1], [A1] et [A2] se sont montrées plutôt homogènes à travers les différentes analyses pour au moins 1 paramètre ce qui a permis le regroupement des espèces végétales composant ces classes physionomiques. Les signatures saisonnières (chapitre 12) et les analyses par diffusigrammes (section 12.5) ont été particulièrement utiles. Une très bonne séparabilité (*d.t* .1.7) entre les classes [H1], [H2] et [h1], [A1] et [A3] a été atteinte pour au moins une des quatre paires d'images avec les paramètres de Touzi (Tableau 13.2-1 et 13.2-2). De plus, les séparabilités intraclasses ont été généralement plus faibles que les séparabilités entre les classes physionomiques (Tableau 13.2-1 et 13.2-2), signe que le regroupement des espèces végétales en classes physionomiques est un concept valable.

La Zizanie ([H2-21]) a cependant démontré une limitation de l'approche par classes physionomique. Même si cette espèce partage une structure similaire à celle du Phalaris ([H2-88]), elle se rapproche plus du Typha ([H1-38]) et de l'Acore ([H1-35]) en termes d'évolution temporelle des paramètres polarimétriques. Cela est en partie attribuable à la position de la Zizanie dans les bas marais (comme pour ([H1] et [h1]) contrairement au Phalaris ([H2-88]) qui se trouvait exclusivement dans les hauts marais). La présence d'eau libre sous une physionomie permet de "rehausser" sa structure mais à la limite vient à "dominer" cette dernière en introduisant une composante de rétrodiffusion double bond. C'est le même

principe qui fait en sorte que la classe [A1] (ou [A2]) est homogène sauf au printemps où elle peut être scindée entre marécages et forêts sur substrat sec.

Une surprise a été de constater qu'il n'a pas été possible de distinguer les physionomies arborées [A1] des physionomies arbustives [A2]. Bien que l'arsenal complet des statistiques et une méthodologie poussée n'ont pas été déployés pour investiguer cette problématique, ce résultat est surprenant surtout pour la bande L. Cela est peut-être attribuable au fait que la plupart des études de sensibilité à la biomasse ont été réalisées dans un contexte où les peuplements étudiés étaient situés dans des forêts aménagées très homogènes en termes de classes de hauteur et de densité. Cela diffère des peuplements forestiers utilisés dans cette thèse où la classe de hauteur/densité ne représente qu'une moyenne et où les peuplements sont souvent de nature mixte avec des proportions variables de conifères et de feuillus.

Un dernier point de questionnement concernant les physionomies porte sur la classe dénudée ([D]). Si l'effet de l'humidité des substrats peut être facilement compensé par la normalisation de la radiométrie, celui de la rugosité l'est beaucoup moins. L'utilisation des images Landsat-5, acquises à quelques jours d'intervalle des images ALOS (10 nov. 2006 et 13 mai 2007), a permis d'obtenir une idée très précise de la répartition des champs dénudés secs et des champs recouverts d'une faible biomasse herbacée ([h1]) correspondant la plupart du temps à des fourrages. Un sous-ensemble des physionomies dénudées sur substrat sec (classes c13 à c17) et rugueux a été confondu avec le Phalaris ([H2-88]) et même avec certains objets des physionomies arborées ([A1]) (Figure 10.1-1, zone D), le canal HV étant particulièrement affecté. Les différents espaces polarimétriques étudiés n'ont pas permis non plus de résoudre cette confusion qui a certes affecté nombre réduit d'objets, mais qui demeure tout de même un point à améliorer dans la définition des physionomies dénudées [D]. Autre exemple, les physionomies herbacées sur substrat sec ([h1], c6 à c9, c10 et c11), correspondant pour la plupart à des fourrages, présent sur des substrats lisses ont été confondues en partie avec les physionomies dénudées sur substrat lisse en bande L (chapitre 10). Concernant la même problématique, la séparabilité entre les tourbières ouvertes ([A3]) et les physionomies dénudées ([D]) a passé de parfaite à mauvaise (chapitre 13) lorsque les conditions météorologiques ont été très sèches le 18 septembre 2009, la biomasse aérienne des arbrisseaux étant devenue transparente au signal incident. On comprend que cet aspect pourrait être particulièrement problématique pour le suivi de la classe muscinale ([M], Tableau

9.2-1) qui occupe de vastes étendues dans la taïga et les régions subarctiques. Avec les images Landsat il est possible de détecter de très faibles quantités de biomasses en utilisant la portion visible (0.45 à 0.69 μ) et du proche infrarouge (0.76 à 0.90 μ m) du spectre électromagnétique contrairement aux bandes radar C et L. Cela constituerait une opportunité d'utiliser la complémentarité entre l'imagerie optique et radar, les images optiques caractérisant l'état de la classe muscinale à la surface, les images radar effectuant le suivi sous la surface.

Nous considérons, pour l'ensemble des éléments énumérés à la section 17.3, que l'hypothèse voulant que les physionomies végétales soient l'élément de base idéal pour l'inventaire des milieux humides a été partiellement atteinte.

17.4. Contribution à un inventaire détaillé des milieux humides

Les analyses temporelles (chapitre 12) ont montré que malgré l'utilisation des images RSOPOL, il n'y a pas une seule date qui permet d'obtenir une caractérisation/séparabilité satisfaisante pour l'ensemble des physionomies. La dimension temporelle, représentée dans cette thèse par l'évolution saisonnière, est donc une composante essentielle si l'on veut atteindre un inventaire détaillé des milieux humides. La polarimétrie radar (pour une seule bande) ne permet pas de passer outre cette contingence, mais permet de réduire le nombre d'images nécessaires pour atteindre cet objectif (l'inventaire détaillé) comparativement aux canaux de polarisation.

Pour les classes physionomiques [H1] et [h1], la puissance rétrodiffusée maximale (*span*, λ_1 , σ_{hh}^0 , et σ_{vv}^0 dans une moindre mesure) est atteinte en juin et juillet lors de l'émergence lorsque des mécanismes de rétrodiffusion cohérents sont présents et non pas lorsque la biomasse aérienne est à son maximum vers la fin juillet ou en août (noté par une augmentation de σ_{hv}^0 et λ_3). Cela montre que les relations empiriques entre la biomasse aérienne et le coefficient de rétrodiffusion modélisées par des fonctions monotones (croissance ou décroissante) sont plutôt hasardeuses. Il est nécessaire d'être en mesure de pouvoir estimer quelle est la portion cohérente du signal (et son influence), ce qui n'est possible qu'avec les données polarimétriques. Le début de l'été apparaît donc propice à la classification des

classes physiologiques alors que la fin de l'été l'est pour leur caractérisation, l'estimation de la biomasse aérienne par exemple.

L'arbre hiérarchique de classification présentée à la section 14.1 représente une synthèse des connaissances acquises dans les différents chapitres de cette thèse. À l'aide d'un nombre relativement réduit de paramètres, basé sur des règles de décisions simples et claires, il a été possible de d'identifier trois classes de bas marais, de discriminer avec précision les hauts marais herbacés ([H2-88]) des autres classes physiologiques en plus d'obtenir une classification plus que satisfaisante entre marécages ([A1], [A2]), forêts sur substrats secs ([A1], [A2]) et les autres classes physiologiques et ce sans avoir recours à des données auxiliaires. Les résultats obtenus avec l'arbre hiérarchique de classification ont été comparables à ceux obtenus avec une classification supervisée de deux images Landsat-5 acquises la même année avec une performance globale respective de 77.3% et 79.08%. La classification de la Zizanie ([H2-21]) reste problématique autant pour la classification RS2 que la classification Landsat-5 avec un taux de succès respectif de 43.23% et 65.5%, cette classe étant confondue avec la classe [H1] (Tableau 14.1-1) ce qui confirme les observations du chapitre 12 et 13. Le problème posé par la mixité des physiologies est important et concerne tout autant la classification RS2 que la classification Landsat-5. Ce problème est lié tout autant à la résolution spatiale des deux capteurs qu'à la propension de certaines espèces, ici la Zizanie [H2-22], à ne pas former de grandes colonies monotypiques.

Les classifications SVM ont été introduites pour vérifier si une plus forte dimensionnalité entraînerait de meilleures classifications par rapport à la classification hiérarchique. La configuration SVM-1B, qui se comparait directement avec la classification hiérarchique, a offert une performance globale de 77.9% comparativement à 77.3% ce qui souligne que la sélection manuelle des paramètres pour la classification hiérarchique RS2 a été presque optimale.

Les classifications RS2 présentées dans cette thèse (hiérarchique ou par SVM) constituent une amélioration par rapport à d'autres classifications plus générales du lac Saint-Pierre qui ont été proposées pour atteindre les objectifs de l'inventaire canadien des milieux humides (ICTH, Fournier *et al.*, 2007). Par exemple, Li et Chen (2005) ont utilisé deux images RS1 (C-HH, S5, mai et août) combinées à une image Landsat pour produire une classe générale de marais et

une autre de marécages malgré l'utilisation de plusieurs données auxiliaires. Toujours dans le cadre de l'ICTH, Grenier et *al.* (2007) ont proposé une classification orientée objet basée sur de multiples indices dérivés des images RS1 et Landsat pour identifier les 7 classes de l'ICTH (marais, marécages, bog, fen, tourbière boisée, prairie humide et eau peu profonde). Pour ces deux études, le rôle du radar est limité à l'identification des périmètres d'inondations qui revient toujours à l'hypothèse de base selon laquelle les zones brillantes au printemps correspondent à des marécages et celles qui connaissent une augmentation brusque de leur radiométrie entre le printemps et l'été correspondent aux marais. Bien que ces classes répondent plus à un besoin d'inventaire à l'échelle nationale que de suivi, on observe tout de même une confusion importante entre marécages et marais (voir Grenier et *al.*, 2007). L'intensité de la polarisation HH (ou HV ou VV) ne permet pas à elle seule d'appréhender la complexité de la rétrodiffusion des milieux humide et seule la polarimétrie radar permet d'en saisir les multiples subtilités.

Mentionnons finalement que les observations, analyses et conclusions présentées dans cette thèse ont été basées sur un grand nombre d'échantillons (d'objets) et non pas sur quelques exemples «savamment» sélectionnés. Nous avons consciemment choisi de représenter la complexité des physionomies végétales. Ceci a eu pour résultat une thèse touffue qui aura peut-être sollicité votre patience, mais qui aura eue comme mérite d'avoir représenté honnêtement l'apport réel des images RSOPOL et de la décomposition de Touzi pour la caractérisation et l'inventaire des physionomies végétales des milieux humides.

18. BIBLIOGRAPHIE

18.1. Article à comité de lecture et actes de congrès

- Adams, S., Wiebe, V., Collins, M., Petroniro, A (1998). RADARSAT Flood Mapping in the Peach-Athabasca Delta Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 24, no.1, p.69-79.
- Ainsworth, T.L., Schuler, D.L., Lee, J.-S (2008). Polarimetric SAR characterization of man-made structures in urban areas using normalised circular-pol correlation coefficients. *Remote Sensing of Environment*. Vol.112, p.2876-2885.
- Ainsworth, T.L., Kelly, J.P., Lee, J.-S (2009). Classification comparisons between dual-pol, compact polarimetric and quad-pol SAR imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetric and Remote Sensing*. Vol.64, p.464-471.
- Alberga, V., Satalino, G., Staykova, D.K (2008). Comparison of Polarimetric SAR observables in terms of classification performance. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.29, no.14, p.4129-4150.
- Arkimaa, H., Middleton, M., Hyvonen, E., Kuosmanen, V., Laitinen, J., Sutinen, R (2005). Mire site type mapping of Boreal Peatlands with Hyperspectral airborne Hymap in Northern Finland. *Proceedings of 4th EAESeL Workshop*. Warsaw, Poland, p.329-336.
- Arii, M., van Zyl, J.J., Kim, Y (2010). A General Characterization for Polarimetric Scattering From Vegetation Canopies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.48, no.9, p.3349-3357.
- Arzandeh, S., Wang, J (2002). Texture Evaluation of RADARSAT imagery for wetland mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.28, no.5, p.653-666.
- Arzandeh, S., Wang, J (2003). Monitoring the change of Phragmites distribution using satellite data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.29, no.1, p.24-35.
- Asaeda, T., Hai, D.N., Manatunge, J., Williams, D., Roberts, J (2005). Latitudinal Characteristics of Below- and Above-ground Biomass of Typha: a Modelling Approach. *Annals of Botany*. Vol.96, p.299-312.
- Auclair, A.N., Bouchard, A., Pajaczkowski, J (1976). Plant standing crop and productivity relations in a Scirpus-Equisetum wetland. *Ecology*. Vol.57, p.941-952.
- Augusteijn, M.F., Warrender, C.E (1998). Wetland classification using optical and radar data and neural network classification. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.19, no.8, p.1545-1560.
- Baghdadi, N., Bernier, M., Gauthier, R., Neeson, I (2001). Evaluation of C-band data for wetlands mapping. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.22, no.1, p.71-88.
- Baghdadi, N., Cerdan, O., Zribi, M., Auzet, V., Darboux, F., El Hajj, M. and Kheir, R (2008). Operational performance of current synthetic aperture radar sensors in mapping soil surface characteristics in agricultural environments: application to hydrological and erosion modelling. *Hydrological Processes*. Vol. 22, no.1, p.9-20.

- Ball, D.B., Prieto, D.G., Ahern, F., Wessels, J (2003). What Information Do wetlands managers really Need? *Backscatter*. Vol.4, no.1, p.8-11.
- Ballester-Berman, J.D., Lopez-Sanchez, J.M (2010). Applying the Freeman-Durden Decomposition Concept to Polarimetric SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.48, no.1, p.466-479.
- Bartsch, A., Wagner, W., Scipal, K., Pathe, C., Sabel, D., Wolski, P (2006). ENVISAT ASAR Global mode capabilities for global monitoring of Wetlands. *Proceedings of GlobWetland: Looking at Wetlands from Space*, 19-20 October, Frascati, Italy, 6 pages.
- Bartsch, A., Kidd, R.A., Pathe, C., Scipal, K., Wagner, W (2007). Satellite radar imagery for monitoring inland wetlands in boreal and sub-arctic environments. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. Vol.17, p.305-317.
- Bhattacharya, A., Touzi, R (2011). Polarimetric SAR urban classification using the Touzi target scattering decomposition. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 37, no.4, p.323-332.
- Bernier, M., Ghedira, H., Gauthier, Y., Magagi, R., Filion, Rébecca, DeSève, D., Ouarda, T.B.M.J., Villeneuve, J-P., Buteau, P (2003). Détection et classification de tourbières ombrotrophes du Québec à partir d'images RADARSAT-1. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.29, no.1, p.88-98.
- Boisvert, J.B., Gwyn, Q.H.J., Chanzy, A., Major, D.J., Brisco, B., Brown, R.J (1997). Effect of surface soil moisture gradients on modelling radar backscattering from bare fields. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.18, no.1, p.153-170.
- Boser, B.E., Guyon., Vapnik, I (1992). A training algorithm for optimal margin classifiers. In *COLT '92: Proceedings of the fifth annual workshop on Computational learning theory*, Pittsburgh, PA, USA. 9 pages.
- Bourgeau-Chavez, L.L., Kasischke, E.S., Brunzell, S.M., Mudd, J.P., Smith, K.B., Frick, A.L (2001). Analysis of space-borne SAR data for wetland mapping in Virginia riparian ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.22, no.18, p.3665-3687.
- Brisco, B., Kapfer, M., Hirose, T., Tedford, B., Liu, J (2011). Evaluation of C-band polarization diversity and polarimetry for wetland mapping. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.37, no.1, p.82-92.
- Brown, S.C.M., Quegan, S., Morrison, K., Bennet, J.C., Cookmartin, G (2003). High-Resolution Measurements of Scattering in Wheat Canopies—Implications for Crop Parameter Retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 41, no 7, p.1602-1610.
- Bubier, J.L., Barrett, N.R., Crill, P.M (1997). Spectral reflectance measurements of boreal wetland and forest mosses. *Journal of Geophysical Research*. Vol.102, no.D24, p.29483-29494.
- Bwangoy, J-R.B., Hansen, M.C., Roy, D.P., De Grandi, G., Justice, C.O (2010). Wetland mapping in the Congo Basin using optical and radar remotely sensed data and derived topographical indices. *Remote Sensing of Environment*. Vol.114, p.73-86.
- Cameron, W.L., Youssef, N., Leung, L.K (1996). Simulated polarimetric signatures of primitive geometrical shapes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 34, no. 3, p.793–803.
- Chang, C.-C., Lin, C.-J (2011). LIBSVM: A library for support vector machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*. Vol.2, no.3, p.125-140.

Charbonneau, F.J., Brisco, B., Raney, R.K., McNairn, H., Liu, C., Vachon, P.W., Shang, J., DeAbreau, R., Champagne, C., Merzouki, A., Geldsetzer, T (2011). Compact polarimetry overview and applications assessment. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.36, no.S2, p. S298-S315.

Clark, R.B., Creed, I.F., Sass, G.Z (2009). Mapping hydrologically sensitive areas on the Boreal Plain: a multitemporal analysis of ERS synthetic aperture radar data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.30, no.10, p.2619-3635.

Cloude, S.R (1986). Group Theory and Polarization Algebra. *OPTIK*. Vol.75, no.1, p 26-36.

Cloude, S.R (1994). Special Unitary Groups in Polarimetry Theory. *Proceedings of SPIE, Polarization Analysis and Measurement II*. Vol. 2265, p.292-303.

Cloude, S.R., Pottier, E (1996). A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.34, no.2, p. 498–518.

Cloude, S.R., Pottier, E. (1997). An Entropy based Classification scheme for Land Applications of Polarimetric SARs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.35, no.2, p.68–78.

Cloude, S.R., Pottier, E., Boerner, W (2002). Unsupervised image Classification using the Entropy/Alpha/Anisotropy method in radar polarimetry. *2002 AIRSAR Earth Science and Application Workshop*. 4-6 March 2002, Pasadena, California, USA. 20 pages.

Christensen, T.R (1993). Methane emission from Arctic Tundra. *Biogeochemistry*. Vol.21, p.117-139.

Dae Kim, K., Ewing, K., Giblin, D.E (2006). Controlling Phalaris arundinacea (reed canarygrass) with live willows stakes: A density-dependent response. *Ecological Engineering*. Vol.27, p.219-227.

Dai, T.S., Haavisto, V.F., Sparling, J.H (1974). Water Level Fluctuation in a Northeastern Ontario Peatland. *Canadian Journal of Forest Research*. Vol.4, p.76-81.

Deslandes, S., M. Grenier, Luc Bélanger, G. Lacroix, and V. Zingraff (2002). The Wetland Conservation Atlas of the St. Lawrence Valley Produced from Decision Tree Classification of RADARSAT and Landsat Images. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 24-28 June 2010, Toronto, Canada. Vol.5, p.2893-2895.

Dickerman, J.A., Wetzel, R.G (1985). Clonal growth in *Typha latifolia*: population dynamics and demography of the ramets. *Journal of Ecology*. Vol.73, p.535-552.

Dionne, J.-C., Bouchard, M.-C. (2000). Nouvelles données sur l'érosion du schorre supérieur à Montmagny, moyen estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire*. Vol.54, no.2, p.219-230.

Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Pierce, L.E (1995a). Land-Cover Classification and Estimation of Terrain Attributes Using Synthetic Aperture Radar. *Remote Sensing of Environment*. Vol.51, p.199-214.

Dobson, M.C., Ulaby, F.T., Pierce, L.E., Sharik, T.L., Bergen, K.M., Kellndorfer, J., Kendra, J.R., Li, E., Lin, Y.C., Nashashibi, A., Sarabandi, K., Siqueira, P (1995b). Estimation of Forest Biophysical Characteristics in Northern Michigan with SIR-C/X-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.33, no.4, p.877-895.

- Dubbe, D.R., Garver, G., Pratt, D.C (1988). Production of cattail (*Typha spp.*) biomass in Minnesota, USA. *Biomass*. Vol.17, p.79-104.
- Dubois-Fernandez, P.C., Souyris, J-C., Angelliaume, S., Garestier, F (2008). The Compact Polarimetry Alternative for Spaceborne SAR at Low Frequency. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 46, no.10, p.3208-3222.
- Evans, D.L (1999). Applications of imaging radar data in earth science investigations. *Electronics & Communication Engineering Journal*. Vol.11, no.5, p.227-234.
- Freeman, A (1992). SAR calibration: an overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.30, no.6, p.1107-1121.
- Freeman, A., Alves, M., Chapman, B., Cruz, J., Kim, Y., Shaffer, S., Sun, J., Turner, E., Sarabandi, K (1995). SIR-C Data Quality and Calibration Results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.33, no.4, p.848-857.
- Freeman, A., Durden, S.L (1998). A Three Component Scattering Model for Polarimetric SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.36, no.3, p.963-973.
- Freeman, A (2007). Fitting a Two-Component Scattering Model to SAR data from forest. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.45, no.8, p.2583-2592.
- Frison, P.-L., Tison, C., Souyris, J.-C., Stoll, B., Fruneau, B., Rudant, J.-P (2009). Support Vector Machine for Multifrequency SAR Polarimetric Data Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.43, no.12, p.4143-4152.
- Fournier, R.A., Grenier, M., Lavoie, A., Hélie, R (2007). Towards a strategy to implement the Canadian Wetland Inventory using remote sensing. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.33, no.1, p.s1-s16.
- Gervais, C., Trahan, R., Moreno, D., Drolet, A.-M (1993). Le *Phragmites australis* au Québec : distribution géographique, nombres chromosomiques et reproduction. *Canadian Journal of Botany*. Vol.71, p.1386-1393.
- Gosselin, G., Touzi, R., Cavayas, F (2012). Wetland Characterization and Classification using Polarimetric Radarsat-2 capability for the Lac Saint-Pierre region (Canada). *Proceedings of Geomatrix'12*. 26-29 February 2012, Mumbai, India. 4 pages.
- Grenier, M., Demers, A.-M., Labrecque, S., Benoit, M., Fournier, R A., Drolet, B (2007). An object-based method to map wetland using RADARSAT-1 and Landsat ETM images : test case on two sites in Quebec, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.33, supp.1, p.s28-s45.
- Grings, F., Ferrazzoli, P., Karszenbaum, H., Tiffenberg, J., Kandus, P., Guerriero, L., Jacobo-Berrles, C (2005). Modeling Temporal Evolution of Junco Marshes Radar Signature. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.43, no.10, p.2238-2245.
- Guisnard, A (1994). Mueller and Kennaugh matrices in radar polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.32, no.3, p.590-597.
- Hajnsek, I., Pottier, E., Cloude, S.R (2003). Inversion of Surface Parameters From Polarimetric SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.41, no.4, p.727-744.

Hardisky, M. A., V. Klemas, and R. M. Smart, 1983. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 49, p.77-83.

Henderson, F.M., Lewis, A (2008). Radar detection of wetland ecosystems: a review. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 29, no.20, p.5809-5835.

Hess, L.L., Melack, J.M., Simonett, D.S (1990). Radar detection of flooding beneath the forest canopy: a review. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 11, no.7, p.1313-1325.

Hess, L.L., Melack, J.H., Filoso, S., Wang, Y (1995). Delineation of inundated area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the SIR-C Synthetic Aperture Radar. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.33, no.4, p.896-904.

Hess, L.L., Melack, J.M., Novo, E.M.L.M., Barbosa, C.C.F., Gastil, M (2003). Dual-season mapping of wetland inundation and vegetation for the central Amazon basin. *Remote Sensing of Environment*. Vol.87, p.404-428.

Hill, M.J., Ticehurst, C.J., Lee, J-S., Grunes, M.R., Graham, E.D., Henry, D (2005). Integration of Optical and Radar Classifications for Mapping Pasture Type in Western Australia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 43, no.7, p.1665-1681.

Horritt, M.S., Mason, D.C., Cobby, D.M., Davenport, I.J., Bates, P.D (2003). Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*. Vol.85, p.271-281.

Hudon, C. (1997). Impact of water level fluctuations on St.Lawrence River aquatic vegetation. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*. Vol.54, p.2853-2865.

Hudon, C., Gagnon, P., Jean, M (2005). Hydrological factors controlling the spread of common reed (*Phragmites australis*) in the St. Lawrence River (Québec, Canada). *Écoscience*. Vol.12, no.3, p.347-357.

Imhoff, M.L (1995). Radar Backscatter and Biomass Saturation: Ramification for Global Biomass Inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 33, p.511-518.

Kandus, P., Karszenbaum, H., Pultz, T., Parmuchi, G., Bava, J (2001). Influence of Flood conditions and vegetation status on the radar backscatter of Wetland Ecosystems. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.27, no.6, p.651-662.

Kasischke, E.S., Bourgeau-Chavez, L (1997). Monitoring South Florida Wetlands Using ERS-1 SAR Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol.63, no.3, p.281-291.

Kasischke, E.S., Melak, J.M., Dobson, M.C (1997). The use of Imaging Radars for Ecological Application, A Review. *Remote Sensing of Environment*. Vol.59, p.141-156.

Kasischke, E.S., Smith, K.B., Bourgeau-Chavez, L., Romanowicz, E.A., Brunzell, S., Richardson, C.J (2003). Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*. Vol.88, no.423-441.

Kasischke, E.S., Bourgeau-Chavez, L.L., Rober, A.R., Wyatt, K.H., Waddington, J.M., Turetsky, M.R (2009). Effects of soil moisture and water depth on ERS SAR backscatter measurements from an Alaskan wetland complex. *Remote sensing of Environment*. Vol.113, p.1868-1873.

Klopatek, J.M., Stearns, F.W (1978). Primary Productivity of Emergent Macrophytes in a Wisconsin Freshwater Marsh Ecosystem. *The American Midland Naturalist*. Vol.100, no.2, p.320-332.

Krankina, O.N., Pflugmacher, D., Friedl, M., Cohen, W.B., Nelson, P., Baccini, A (2008). Meeting the challenge of mapping peatlands with remotely sensed data. *Biogeosciences*. Vol.5, p.1809-1820.

Krogager, E (1990). New decomposition of the radar target scattering matrix. *Electronic Letters*. Vol. 26, no.18, p.1525–1527.

Lang, M.W., Kasischke, E.S., Prince, S.D., Pittman, K.W (2008a). Assessment of C-band synthetic aperture radar data for mapping and monitoring Coastal Plain forested wetlands in the Mid-Atlantic Region, U.S.A. *Remote Sensing of Environment*. Vol.112, p.4120-4130.

Lang, M.W., Townsend, P.A., Kasischke, E.S (2008b). Influence of incidence angle on detecting flooded forests using C-HH synthetic aperture radar data. *Remote Sensing of Environment*. Vol.112, p.3898-3907.

Lardeux, C., Frison, P.-L., Rudant, J.-P., Sourys, J.-C., Tison, C., Stoll, B (2006). Use of the SVM Classification with Polarimetric SAR Data for Land Use Cartography. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. July 31- August 4, 2006, Denver, Colorado, USA, p.493-496.

Lardeux, C., Frison, P.-L., Tison, C., Souyris, J.-C., Stoll, B., Fruneau, B., Rudant, J.-P (2009). Support Vector Machine for Multifrequency SAR Polarimetric Data Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.47, no.12, p.4143 - 4152.

Lasne, Y., Paillou, P., August-Bernex, T., Ruffié, G., Grandjean, G (2004). A Phase Signature for Detecting Wet Subsurface Structures Using Polarimetric L-Band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.42, no.8, p.1683-1694.

Lavoie, C., Dufresne, F., Delisle, F (2005). The spread of reed canarygrass (*Phalaris arundinacea*) in Québec: A spatio-temporal perspective. *Écoscience*. Vol.12, no.3, p.366-375.

Lee, J. S., Jurkevich, L., Dewaele, P., Wambacq, P., Oosterlinck, A (1994). Speckle filtering of synthetic aperture radar images: A review. *Remote Sensing Review*. Vol.8, no.4, p.313-340.

Lee, J.S., Grunes, M.R., Pottier, E (2001). Quantitative Comparison of Classification Capability: Fully Polarimetric versus Dual and Single-Polarisation SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.39, no.11, p.2343-2351.

Lee, J.S., Schuler, D.L., Ainsworth, T.L., Krogager, E., Kasilingam, D., Boerner, W.M (2002). On the Estimation of Radar Polarization Orientation Shifts Induced by Terrain Slopes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.40, no.1, p.30-41.

Letts, M.G., Roulet, N.T., Comer, N.T (2000). Parametrization of Peatland Hydraulic Properties for the Canadian Land Surface Scheme. *Atmosphere-Ocean*. Vol.38, no.1, p.141-160.

Li, J., Chen, W (2005). A rule-based method for mapping Canada's wetland using optical, radar and DEM data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.26, no.22, p.5051-5069.

Li, J., Chen, W., Touzi, R (2007). Optimum RADARSAT-1 configurations for wetlands discrimination: a case study of the Mer Bleue peat bog. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.33, supp.1, p.s46-s55.

Lopes, A., Touzi, R., Nezry, E (1990). Adaptive speckle filters and scene heterogeneity. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.28, no.28, p. 992-1000.

Lopes, A., Nezry, E., Touzi, R., Laur, H (1993). Structure detection and statistical adaptive speckle filtering in SAR images. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.14, no.9, p.1735-1758.

Lopes, A., Sery, F (1997). Optimal speckle reduction for the product model in multilook polarimetric SAR imagery and the Wishart distribution. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 35, no.3, p. 632-647.

Lüneburg, E (2002). Aspects of Radar Polarimetry. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. Vol.10, no.2, p.219-243.

Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., Marliani, F., Gai, M (2001). The relationship between the backscattering coefficient and the biomass of narrow and broad leaf crops. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.39, no.4. p.873-884.

Macelloni, G., Paloscia, S., Pampaloni, P., Ruisi, R., Deschambre, M., Valentin, R., Chanzy, A., Prévot, L., Bruguier, N (2002). Modelling Radar Backscatter from Crops during the Growth Cycle. *Agronomie*. Vol.22, p.575-579.

Maréchal, C., Pottier, E., Allain-Bailhache, S., Meric, S., Hubert-Moy, L., Corgne, S (2011). Mapping dynamic wetland processes with a one year RADARSAT-2 quad pol time-series. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 24-29 July 2011, Vancouver, Canada, p.126-129.

Martinez, J-M., LeToan, T (2007). Mapping of flood dynamics and spatial distribution of vegetation in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. *Remote Sensing of Environment*. Vol.108, p.209-223.

Matthaeis de, P., Lang, R.H (2005). Microwave Scattering models for Cylindrical Vegetation Components. *Progress In Electromagnetics Research*. Vol.55, p.307-333.

Mattia, F., Le Toan, T., Picard, G., Posa, F.I., D'Alessio, A., Notarnicola, C., Gatti, A.M., Rinaldi, M., Satalino, G., Pasquariello, G (2003). Multitemporal C-band radar measurements on wheat fields. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.41, no.7, p.1151-1560.

McNairn, H., Duguay, C., Brisco, B., Pulz, T.J (2002). The effect of soil and crop residue characteristics on polarimetric radar response. *Remote Sensing of Environment*. Vol.80, p.308-320.

McNairn, H., Shang, J., Jiao, X., Champagne, C (2009). The Contribution of ALOS PALSAR Multipolarization and Polarimetric Data to Crop Classification. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.47, no.12, p.3981-3992.

Milne, A.K., Horn, G., Finlayson, M (2000). Monitoring Wetlands Inundation Patterns using RADARSAT Multitemporal Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.26, no.2, p.133-141.

Moghaddam, M., McDonald, K., Cihlar, J., Chen, W (2003). Mapping Wetlands of the North American Boreal Zone from Satellite Radar Imagery. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 21-25 July, Toulouse, France. Vol.1, p.261-263.

- Moisan, Y., Bernier, M., Dubois, J.M (1999). Détection des changements dans une série d'images ERS-1 multidates à l'aide de l'analyse en composantes principales. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.20, no.6, p.1149-1167.
- Moran, M.S., Peters-Lidard, C.D., Watts, J.M., McElroy, S (2004). Estimating soil moisture at the watershed scale with satellite-based radar and land surface models. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.30, no.5, p.805-826.
- Moreau, S., LeToan, T (2003). Biomass quantification of Andean wetland forages using ERS satellite SAR data for optimizing livestock management. *Remote Sensing of Environment*. Vol.84, p.477-492.
- Moore, P.D (1995). Biological processes controlling the development of modern peat-forming ecosystems. *International Journal of Coal Geology*. Vol.28, p.99-110.
- Moore, T.R., Bubier, J.L., Frolkings, S.E., Lafleur, P.M., Roulet, N.T. (2002). Plant biomass and production and CO₂ exchange in an ombrotrophic bog. *Journal of Ecology*. Vol.92, p.25-30.
- Morrissey, L.A., Durden, S.L., Livingston, G.P., Stearn, J.A., Guild, L.S (1996). Differentiating Methane Source Areas in Arctic Environments with Multitemporal ERS-1 SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.34, no.3, p.667-673.
- Moutrakis, G., Jungo, I., Caesar, O (2010). Support vector machines in remote sensing: A review. *International Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol.66, no.3, p.247-259.
- Nghiem, S.V., Yueh, S.H., Kwok, R., Li, F.K (1992). Symmetry properties in polarimetric remote sensing. *Radio Science*. Vol. 27, no.5, p.693-711.
- Noernberg, M.A., Novo, E.M., Krug, T (1999). The use of biophysical indices and coefficient of variation derived from airborne synthetic aperture radar for monitoring the spread of aquatic vegetation in tropical reservoirs. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.20, no.1, p.67-82.
- Nolan, M., Flatland, D.R (2003). Penetration Depth as a DInSAR Observable and Proxy for Soil Moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.41, no.3, p.532-537.
- Novo, E.M.L.M., Costa, M.P.F., Mantovani, J.E., Lima, I.B.T (2002). Relationship between macrophyte stand variables and radar backscatter at L et C band, Tucuruí reservoir, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.23, no.7, p.1241-1260.
- Ozesmi, S.L., Bauer, M.E (2002). Satellite remote sensing of Wetland. *Wetland Ecology and management*. Vol.10, p.381-402.
- Paloscia, S (2002). A Summary of experimental results to assess the contribution of SAR for mapping vegetation biomass and soil moisture. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.28, no.2, p.246-261.
- Parmuchi, M.G., Karszenbaum, H., Kandus, P (2002). Mapping wetlands using multi-temporal RADARSAT-1 data and a decision-based classifier. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.28, no.2, p.175-186.
- Picard, G., Le Toan, T., Mattia, F (2003). Understanding C-band radar backscatter from wheat canopy using a multiple-scattering coherent model. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.41, no.7, p. 1583–1591.

Pierce, L.E., Bergen, K.M., Dobson, M.C., Ulaby, F.T (1998). Multitemporal Land-Cover Classification Using SIR-C/X-SAR Imagery. *Remote Sensing of Environment*. Vol.64, p. 20-33.

Praks, J., Colin Koeniguer, E., Hallikainen, M.T (2009). Alternatives to Target Entropy and Alpha Angle in SAR Polarimetry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.47, no.7, p.2262-2274.

Pope, K.O., Rey-Beneyas, J.M., Paris, J.F (1994). Radar Remote Sensing of Forest and Wetlands Ecosystems in the Central American Tropics. *Remote Sensing of Environment*. Vol.48, no.2, o.205-219.

Pope, K.O., Rejmankova, E., Paris, J.F., Woodruff, R (1997). Detecting Seasonal Flooding Cycles in Marshes of the Yucatan Peninsula with SIR-C Polarimetric Radar Imagery. *Remote Sensing of Environment*. Vol.59, p.157-166.

Poulin, M., Careau, D., Rochefort, L., Desrocher, A (2002). From Satellite Imagery to Peatland Vegetation Diversity: How Reliable Are Habitat Maps? *Conservation Ecology*. Vol.6, no.2, 31 pages.

Pottier, E., Saillard, J (1992). Fondements mathématiques de la Polarimétrie et son application au domaine du Radar. *Annales des Télécommunications*. Vol. 47, no.7-8, p.314-336.

Proisy, C., Mougin, E., Fromard, F., Karam, M.A (2000). Interpretation of polarimetric radar signature of mangrove forest. *Remote Sensing of Environment*. Vol.71, p.56-66.

Quegan, S (1994). A unified algorithm for phase and cross-talk calibration of polarimetric data-theory and observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.32, no.1, p. 89-99.

Racine, M-J., Bernier, M., Ouarda, T (2005). Evaluation of RADARSAT-1 images acquired in fine mode for the study of boreal peatlands : a case study in James Bay, Canada. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.31, no.6, p.450-467.

Ramsey, E.W (1995). Monitoring flooding in coastal wetlands by using radar imagery and ground-based measurements. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.16, no.13, p.2495-2502.

Ramsey, E.W., Laine, S.C (1997). Comparaison of Landsat Thematic Mapper and High Resolution Photography to identify Change in Complex Coastal Wetlands. *Journal of Coastal Research*. Vol.13, no.2, p.281-292.

Ramsey III. E.W., Nelson, G.E., WSapkota, S.K (1998). Classifying coastal resources by integrating optical and radar imagery and color infrared photography. *Mangroves and Salt Marshes*. Vol.2, p.109-119.

Raney, R.K., Freeman, T., Hawkins, R.W., Bamler, R (1994). A Plea for Radar Brightness. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 8-11 August 1994, Pasadena, CA, USA. Vol.2, p.1090-1092.

Ranson, K.J., Sun, G (1997). An evaluation of AIRSAR and SIR-C/X-SAR Images for mapping northern forest attributes in Maine, USA. *Remote Sensing of Environment*. Vol.59, p.203-222.

Raney, R.K (2007). Hybrid-polarity SAR architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 45, p.3397-3404

Reinhardt Adams, C., Galatowitsch, S.M (2005). Phalaris arundinacea (reed canary grass): Rapid growth and growth pattern in conditions approximating newly restored wetlands. *Ecoscience*. Vol.14, no.4, p.569-573.

Rignot, E.J.M., van Zyl, J.J (1993). Change detection techniques for ERS-1 SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.31, no.4, p.896-906.

Rosenqvist, A., Milne, A., Lucas, R., Imhoff, M., Dobson, C (2003). A review of remote sensing technology in support of the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy*. Vol.6, p.441-455.

Rosenqvist, A., Shimada, M., Milne, A.K (2007). The Alos Kyoto & Carbon Initiative. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 23-28 July 2007, Barcelona, Spain, p.3614-3617.

Roulet, N.T (2000). Peatlands, carbon storage, greenhouse gases, and the Kyoto protocol: prospects and significance for Canada. *Wetlands*. Vol.20, no.4, p.605-615.

Rundquist, D.C., Narumalani, S., Narayanan, R.M (2001). A review of wetlands remote sensing and defining new considerations. *Remote Sensing Reviews*. Vol.20, p.207-226.

Saich, P., Thompson, J.R., Rebelo, L.M (2001). Monitoring Wetland Extend and Dynamics in the Cat Tien National Park, Vietnam, using Space-based Radar Remote Sensing. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 9-13 July 2001, Sydney, Australia. Vol.7, p.3099-3101.

Schmullius, C.C., Evans, D.L (1997). Synthetic aperture radar (SAR) frequency and polarization requirements for application in ecology, geology, hydrology, and oceanography: a tabular status quo after SIR-C/X-SAR. *International Journal of Remote Sensing*. Vol.18, no.13, p.2713-2722.

Schmullius, C.C., Plummer, S., Quegan, S (2003). The SIBERIA-II Project, Greenhouse Gas Accounting and the Global Project Context. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 21-25 July 2003, Toulouse, France. Vol.1, p.485-487.

Schölkopf, B., Smola, A., Williamson, R., Bartlett, P.L (2000). New support vector algorithms. *Neural Computation*. Vol.12, p.1207-1245.

Silva, T.S.F., Costa, M.P.F., Melack, J.M (2010). Spatial and temporal variability of macrophyte cover and productivity in the eastern Amazon floodplain: A remote sensing approach. *Remote Sensing of Environment*. Vol.114, p.1998-2010.

Simonett, D.S., Strahler, A.H., Sun, G., Wang, Y (1987). Radar Forest Modeling: Potentials, Problems, Approaches, Models. *Proceedings of the Annual Conference of the Remote Sensing Society*, Nottingham, The Remote Sensing Society, p.256-270.

Slatton, K.C., Crawford, M.M., Gibeaut, J.C., Gutierrez, R (1996). Modeling Wetland Vegetation Using Polarimetric SAR. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 27-31 May 1996, Lincoln, NE, USA. Vol.1, p.263-265.

Smith, L.C (1997). Satellite Remote Sensing of river inundation area, Stage, and discharge: A review. *Hydrological Processes*. Vol.11, p.1427-1439.

Souyris, J-C., Imbo, P., Fjørtoft, R., Mingot, S., Lee, J.S (2005). Compact Polarimetry Based on Symmetry Properties of Geophysical Media: the $\pi/4$ mode. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 43, No. 3, p.634-646.

Sokol, J, Pultz, T.Z (2004). Case studies demonstrating hydrological applications of C-band multi-polarized and polarimetric SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.30, no.3, p. 470-483

Stoll, B (2005). SARvi: a vegetation index based on AirSAR data for south pacific volcanic islands vegetation mapping. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 25-29 July 2005, Seoul, South Korea. Vol.6, p.4331-4334.

Takada, M., Mishima, Y., Natsume, S (2009). Estimation of surface soil properties in peatland using Alos/Palsar. *Landscape and Ecological Engineering*. Vol. 5, p.45-58.

Tessier, C., Maire, A., Aubin, A (1981). Étude de la végétation des zones riveraines de l'archipel des Cents-îles du fleuve Saint-Laurent, Québec. *Canadian Journal of Botany*. Vol.59, p.1526-1536.

Touzi, R (1999). A Protocol for Speckle Filtering of SAR Images. *Proceedings of CEOS, Committee on Earth Observation Satellites; Working Group on Calibration and Validation*. ESA-SP. 26-29 Octobre, Toulouse, France. Vol. 450, p.225-230.

Touzi, R., Charbonneau, F (2002). Characterization of target symmetric scattering using polarimetric SARs. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.40, no.11, p.2507-2516.

Touzi, R., Charbonneau, F (2004). PWS: a friendly and effective tool for polarimetric image analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.30, no.3, p.566-57.

Touzi, R., Boerner, W.M., Lee, J.S., Lueneburg, E (2004). A review of polarimetry in the context of synthetic aperture radar: concepts and information extraction. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. no.3, p.380-407.

Touzi, R., Livingstone, C.E., Charbonneau, F (2005). A general method for calibration of the C-band Convair-580 SAR. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol. 31, no.1, p.52-60.

Touzi, R (2007a). Target-Scattering Decomposition in Terms of Roll-Invariant Target Parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.45, no.1, p.73-84.

Touzi, R (2007b). Speckle effect on polarimetric target scattering decomposition of SAR imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing* Vol.33, no.1, p.60-68.

Touzi, R., Deschamps, A., Rother, G (2007). Wetland characterization using polarimetric RADARSAT-2 capability. *Canadian Journal of Remote Sensing*. Vol.33, supp.1, s56-s67.

Touzi, R., Deschamps, A., Rother, G (2009). Phase of Target Scattering for wetland Characterization Using Polarimetric C-Band SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.47, no.9, p.3241-3261.

Touzi, R., Shimada, M (2009). Polarimetric PALSAR Calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.47, no.12, p.3951-3959.

Touzi, R., Gosselin, G (2010). Peatland subsurface water flow monitoring using polarimetric L-band PALSAR. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 25-30 July 2010, Honolulu, Hawaii, USA, p.750-753.

- Touzi, R., Vachon, P.W., Wolfe, J (2010). Requirements on Antenna Cross-Polarization Isolation for the Operational Use of C-Band SAR Constellations in Maritime Surveillance. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.7, no.4, p.861-865.
- Townsend, P.A (2002). Estimating forest structure in wetlands using multitemporal SAR. *Remote Sensing of Environment*. Vol.79, p.288-304.
- Töyrä, J., Pietroniro, A., Martz, L.W (2001). Multisensor hydrologic assesment of a freshwater wetland. *Remote Sensing of Environment*. Vol.75, p.162-173.
- Töyrä, J., Pietroniro, A., Martz, L.W., Prowse, T.D (2002). A multi-sensor approach to wetland flood monitoring. *Hydrological Processes*. Vol.16, p.1569-1581.
- Töyrä, J., Pietroniro, A (2005). Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics-based techniques. *Remote Sensing of Environment*. Vol.97, p.174-191.
- Ulaby, F.T., Held, D., Dobson, M.C., McDonald, K.C., Senior, T.B.A (1987). Relating Polarization Phase Difference of SAR Signals to Scene Properties. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. GE-25, no.1, p.83-92.
- Unal, C.M.H., Ligthart, L.P (1998). Decomposition Theorems applied to Random and Stationary Radar Targets. *Progress In Electromagnetics Research*. Vol.18, p.45–66.
- van Zyl, J.J., Zebker, H.A., Elachi, C (1987). Imaging Radar Polarization Signatures: Theory and Observation. *Radio Science*. Vol.22, no.4, p.529-543.
- van Zyl, J.J (1989). Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 27, no.1, p.37–45.
- van Zyl, J.J (1990). Calibration of polarimetric radar images using only image parameters and trihedral corner reflectors responses. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.28, no.3, p.337-348.
- van Zyl, J.J., Arii, M., Kim, Y (2011). Model-Based Decomposition of Polarimetric SAR Covariance Matrices Constrained for Nonnegative Eigenvalues. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.49, no.9, p.3452-3459.
- Verhoest, N.E.C., Lievens, H., Wagner, W., Álvarez-Mozos, J., Moran, M.S., Mattia, F (2008). On the Soil Roughness Parameterization Problem in Soil Moisture Retrieval of Bare Surfaces from Synthetic Aperture Radar. *Sensors*. Vol.8, p.4213-4248.
- Vis C., Hudon, C., Carignan R (2003). An evaluation of approaches used to determine the distribution and biomass of emergent and submerged aquatic macrophytes aver large spatial scales. *Aquatic Botany*. Vol.77, p.187-201.
- Vitt, D.H (1994). An overview of factors that influence the development of Canadian peatlands. *Memoirs of the Entomological Society of Canada*. Vol.169, p.7-20.
- Wessels, J., Ball, D., Fernandez Prieto, D., Ahern, F (2003). Operational Wetlands Monitoring for the RAMSAR convention : TESEO Powers a Breakthrough. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 21-25 July 2003, Toulouse, France. Vol 3, p.1486-1489.

Whigham, D., Simpson, R (1977). Growth, mortality, and biomass partitioning in freshwater tidal wetland population of wild rice (*Zizania aquatica* var. *aquatica*). *Bulletin of the Torrey Botanical Club*. Vol.104, no.4, p.347-351.

Whigham, D.F. , Simpson, R.L (1978). The relationship between aboveground and belowground biomass of freshwater tidal wetland macrophytes. *Aquatic Botany*. Vol.5, p. 355-364.

Whitcomb, J., Moghaddam, M., McDonald, K., Podest, E., Kellndorfer, J (2007). Wetlands Map of Alaska using L-Band Radar Satellite Imagery. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 23-28 July, Barcelona, Spain, p.2487-2490.

Wright, P.A., Quegan, S., Wheadon, N.S., Hall, C.D (2003) Faraday rotation effects on L-band speceborne SAR data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol.41, no.12, p. 2735-2744

Wu, T-F., Lin, C-J., Weng, R.C (2004). Probability Estimates for Multi-class Classification by Pairwise Coupling. *Journal of Machine Learning Research*. Vol.5, p.975-1005.

Yamaguchi, Y., Moriyama, Y., Ishido, M., Yamada, H (2005). Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. Vol. 43, no.8, p.1699–1706.

Yamaguchi, Y., Yajima, Y., Yamada, H (2006). A Four-Component Decomposition of POLSAR Images Based on the Cohency Matrix. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. Vol.3, no.3, p.292-296.

Zebker, H.A., vanZyl, J.J (1991). Imaging Radar Polarimetry: a Review. *Proceedings of the IEEE*. Vol. 79, no. 11, p.1583-1606.

Zou, T., Yang, W., Dai, D., Sun, H (2010). Polarimetric SAR Image Classification Using Multifeatures Combination and Extremely Randomized Clustering Forests. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. Vol. 2010, 9 pages.

18.2. Manuels, thèses et mémoires

Boerner, W.M., Mott, H., Lüneburg, E., Livingstone, C., Brisco, B., Brown, R.J., Paterson, J.S., Cloude, S.R., Krogager, E., Lee, J.S., Schuler, D.L., van Zyl, J.J., Randall, D., Budkewitsch, P., and Pottier, E. (1998). Polarimetry in radar remote sensing: basic and applied concepts. Publié dans: *Manual of remote sensing: principles and applications of imaging radar*. R.A. Ryerson (ed). John Wiley & Sons, Inc., New York. 896 pages.

Brooks, K.N (1992). Chapter 10: Surface Hydrology. Paru dans : The Patterned Peatlands of Minnesota. Sous la direction de H.E Wright Jr., Barbara A. Coffin., Norman E.Aaseng. University of Minnesota Press, Minneapolis, USA. 327 pages.

Campbell, D.R., Rochefort, L (2001). Chapitre 4 : La végétation :gradients. Paru dans : Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Sous la direction de Serge Payette et Line Rochefort. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. 644 pages.

Cloude, S. R (2010). Polarisation, applications in Remote Sensing. Oxford University Press, Oxford, U.K. 453 pages.

Cumming, I.G., Wong, F.H (2005). Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation. Artech House, Boston, MA, USA. 660 pages.

Demers, A.-M. (2005). Classification des environnements tourbeux à partir d'images RADARSAT-1 pour un secteur du bassin versant de la grande rivière, Baie James Québec. Mémoire de Maitrise, Université du Québec à Montréal. 279 pages.

Elachi, C., van Zyl, J (2006). Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing. 2nd edition. Wiley-Interscience, N.J. USA. 616 pages.

Farrar, J.L (1997). Les Arbres du Canada (second tirage). Publié par FIDES et le Service canadien des forêts, Ressources naturelles Canada. 502 pages.

Fleurbec (1987). Guide d'identification des plantes sauvages des lacs, rivières et tourbières. Fleurbec (auteur et éditeur). Saint-Augustin (Portneuf), Québec. 400 pages.

Fung, A.K (1994). Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications. Artech House. Boston, USA. 573 pages.

Gauthier, R (2001). Chapitre 3 : Les sphaignes. Paru dans : Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Sous la direction de Serge Payette et Line Rochefort. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. 644 pages

Gilet, François (2000). La phytosociologie synusiale intégrée, guide méthodologique, document 1. Université de Neuchâtel, Institut de Botanique. Laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie. 4^{ème} édition. 68 pages.

Holden, J (2006). Chapter 14: Peatland Hydrology. Paru dans : Peatlands, Evolution and records of environmental and climate changes. Developments in Earth Surface Processes Series, Vol.9. Martini, I.P., Martinez Cortizas, A., Chesworth, W (Eds.). Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 588 pages.

Huynen, J.R (1970). Phenomenological Theory of Radar Targets. *Ph.D dissertation*. Drukkerij Bronder-Offset N.V.219 pages.

Ingram, H.A.P (1981). Chapter 3: Hydrology. Paru dans: Ecosystems of the World, Vol. 4A, Mires: Swamp, Bog, Fen and Moor. General Studies (1983). Sous la supervision de A.J.P. Gore. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Ivanov, K.E (1981). Water Movements in Mireland. Academic Press. London, UK. 276 pages.

Jensen, J. R (2005). Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective. 3rd ed. Prentice-Hall Series in Geographic Information Science. Pearson/Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., USA, 526 pages.

Lee, Jong-Sen., Pottier, Eric (2009). Polarimetric Radar Imaging: from basics to applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, USA. 398 pages.

Lewis, A.J., Henderson, F.M (1998). Chapter 3 - Radar Fundamentals: The Geoscience Perspective. Paru dans: Principles & Applications of Imaging Radar. Manual of Remote Sensing, Vol.2. third edition. Floyd M. Henderson, Anthony J. Lewis éditeurs. John Wiley & Sons, Inc. 866 pages.

MacKenzie, W.H., Moran, J.R (2004). Wetlands of British Columbia: A Guide to Identification. British Columbia, Ministry of Forest, Research Branch. Victoria, Canada. Land Management Handbook series, No. 52. 295 pages.

Marie-Victorin, Frère (1995). Flore Laurentienne. Troisième édition, mise à jour et annotée par Luc Brouillet et Isabelle Goulet. Les Presses de l'Université de Montréal. Montréal, Canada. 1083 pages.

Martini, I.P., Martinez Cortizas, A., Chesworth, W (2006). Chapter 1 : Peatlands : a concise guide to the volume. Paru dans Peatlands, Evolution and records of environmental and climate changes. Developments in Earth Surface Processes Series, Vol.9. Martini, I.P., Martinez Cortizas, A., Chesworth, W (Eds.). Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 588 pages.

Mitsch, W.J., Gosselink, J.G (1993). Wetlands (2^{ième} édition). Van Nostrand Reinhold, New-York, USA. 722 pages.

Moore, T.R (2001). Chapitre 8 : Les processus biogéochimiques liés au carbone. Paru dans : Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Sous la direction de Serge Payette et Line Rochefort. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. 644 pages.

Oldeman, R.A.A (1974). L'architecture de la forêt guyanaise. Paris : ORSTOM, Mémoire n.73.204p.

Paavilainen, E., Päivänen, J (1995). Peatland Forestry: Ecology and Principles. 1er édition. Springer-Verlag. Berlin, Allemagne. 248 pages.

Payette, S (2001a). Chapitre 2 : Les principaux types de tourbières. Paru dans : Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Sous la direction de Serge Payette et Line Rochefort. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. 644 pages.

Payette, S., Rochefort, L (2001). Introduction. Paru dans : Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Sous la direction de Serge Payette et Line Rochefort. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. 644 pages.

Price, J.S., (2001). Chapitre 5: L'hydrologie. Paru dans Écologie des tourbières du Québec-Labrador. Sous la direction de Serge Payette et Line Rochefort. Les Presses de l'Université Laval, Québec, Canada. 644 pages.

Raney, R.K (1998). Chapter 2: Radar Fundamentals: Technical Perspective. Paru dans: Principles and Applications of Imaging Radar, Manual of Remote Sensing, Volume 2, 3^{ième} édition. Édité par Floyd M. Henderson et Anthony J. Lewis. John Wiley and Sons Inc., N.J, USA. 866 pages.

Rydin, H., Jeglum, J.K (2006). The Biology of Peatland. The biology of habitats series, OXFORD University Press, UK. 360 pages

Senterre, B (2005). Recherches méthodologiques pour la typologie de la végétation et la phytogéographie des forêts denses d'Afrique tropicale. Thèse de doctorat, Université Libre de Bruxelles, Laboratoire de Botanique systématique et de Phytosociologie, 345 p. + 111 p. d'annexes.

Tarnocai, C., Stolbovoy, V (2006). Chapter 2 : Northern Peatlands : their characteristics, development and sensitivity to climate change. Paru dans: Peatlands, Evolution and records of environmental and climate changes. Developments in Earth Surface Processes Series, Vol.9. Martini, I.P., Martinez Cortizas, A., Chesworth, W (Eds.). Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 588 pages.

Turetsky, M.R., St-Louis, V.L (2006). Chapter 16: Disturbance in Boreal Peatlands. Paru dans: Boreal Peatlands Ecosystems. Ecological studies series, Vol.188. R.K. Wieder et D.H Vitt (eds). Springer-Verlag, 444 pages.

van Zyl, J.J., Ulaby, F.T (1990). Chapter 2: Scattering Matrix Representation for simple targets. Publié dans: Radar Polarimetry for Geoscience Applications. F.T. Ulaby . C. Elachy, editors. Artech House, Norwood, MA, USA. 388 pages.

Vapnik, V.N (1998). Statistical Learning Theory (1^{er} edition). Wiley-Interscience. New York, USA. 736 pages.

Vasander, H., Kettunen, A (2006). Chapter 9: Carbon in Boreal Peatlands. Paru dans: Boreal Peatlands Ecosystems. Ecological studies series, Vol.188. R.K. Wieder et D.H Vitt (eds). Springer-Verlag, 444 pages.

Vitt, D.H (2006). Chapter 2: Functional characteristics and indicators of boreal peatlands. Paru dans: Boreal Peatlands Ecosystems. Ecological studies series, Vol.188. R.K. Wieder et D.H Vitt (eds). Springer-Verlag, 444 pages.

Wieder, R.K., Vitt, D.H (2006). Preface. Paru dans: Boreal Peatlands Ecosystems. Ecological studies series, Vol.188. R.K. Wieder et D.H Vitt (eds). Springer-Verlag, 444 pages.

Wieder , R.K., Vitt, D.H., Benschoter, B.W (2006). Chapter 1: Peatlands and the Boreal Forest. Paru dans: Boreal Peatlands Ecosystems. Ecological studies series, Vol.188. R.K. Wieder et D.H Vitt (eds). Springer-Verlag, 444 pages.

18.3. Rapports techniques et Ressources électroniques

Boerner, W-M (2004). Basics of SAR Polarimetry I and II. *NATO Science and Technology Organization, RTO SET Lecture Series on Radar Polarimetry and Interferometry*. Bruxelles, Belgique, 14-15 Octobre. 68 pages

Boerner, W-M (2005). POLSARPRO V3.0 – Lecture notes 1, Basic Concepts in Radar Polarimetry. European Space Agency, PolsarPro documentation. 100 pages.
URL: <http://earth.eo.esa.int/polsarpro/tutorial.html>

Buteau, P., Dignard, N., Grondin, P (1994). Système de Classification des Milieux Humides du Québec. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec. MB94-01. Québec (Québec). 25 pages.

Carver, K.R (1988). SAR Synthetic Aperture RADAR – Earth Observing System - Vol. Iif. *NASA Instrument Panel Report, Washington D.C.*

CCRS (2007). Canada Centre for Remote Sensing. Site web maintenant hors ligne, remplacé partiellement par : Ressources didactiques de télédétection radar, publié par le Ministère des Ressources naturelles du Canada dans le cadre du projet GlobeSAR-2. URL: <http://www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/geography-boundary/remote-sensing/radar-remote/1108>

CCRS (2008). Canada Centre for Remote Sensing. Page web consultée en octobre 2010. URL :<http://www.nrcan.gc.ca/sciences-terre/limite-geographique/teledetection/fondements/1256>

CCRS (2010). Canada Centre for Remote Sensing. Cours de polarimétrie radar avancée. URL: http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/earth-sciences/files/pdf/resource/tutor/polarim/pdf/polarim_f.pdf

Cowardin, L. M., Carter, V., Golet, F.C., La Roe, E.T (1979). Classification of wetlands and deepwater habitats of the United States. U. S. Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Washington, D.C, USA. 131 pages.

Davidson, I., Vanderkam, R., Padilla, M (1999). Review of wetland inventory information in North America. Wetland International-Americas. 38 pages.
URL : www.wetlands.org/RSIS/WKBASE/GRoWI/report_northamerica.doc

ESA (2000). European Space Agency. Radar Course III. 2000-2013
URL : http://earth.esa.int/applications/data_util/SARDOCS/spaceborne/Radar_Courses/

Hatch, B.K., Bernthal, T.W (2008). Mapping Wisconsin wetlands dominated by reed canary grass, *Phalaris arundinacea L.*: a landscape level assessment. Wisconsin Department of Natural Resources, PUB-WT-900-2008.

Institut de la statistique du Québec. Rendements des grandes cultures, années 2006 à 2010.
URL : http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/culture/culture/index.htm

IRDA (2008). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. Études pédologiques. Cartes pédologiques disponibles en ligne.
URL : <http://www.irda.qc.ca/fr/Etudes-pedologiques>

JAXA-EORC (1997). Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency. Page consultée en novembre 2012.
URL : <http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/palsar.htm>

JAXA-GFMP (2005). The JERS-1 SAR Global Forest Mapping (GRFM/GBFM) Program. Site web consulté en février 2008. URL: <http://www.eorc.jaxa.jp/JERS-1/GFMP/>

Jeglum, J. K., Boissonneau, A. N., Haavisto, V.F (1974). Toward a wetland classification for Ontario. Information Report 0-X-215. Canadian Forest Service, Sault Ste. Marie, Ontario. 54 pages.

Langlois, C., Lapierre L., Léveillé, M., Turgeon P., Ménard, C (1992). *Synthèse des connaissances sur les communautés biologiques du lac Saint-Pierre : Rapport technique – Zone d'intérêt prioritaire no 1. dans* Projet de reconnaissance de la région du lac Saint-Pierre comme réserve mondiale de la biosphère de l'UNESCO, Annexe V – Recueil d'études spécifiques sur la réserve de biosphère, 13 pages.

Le Toan, T (2005). SAR image information content Scattering physics. ESA-MOST Dragon Programme advanced Training Course in Land Remote Sensing. SAR Day 1 – Lecture 1. Octobre 2005, Beijing, Chine.
URL: http://earth.eo.esa.int/dragon/LeToan1_SAR_scattering_physics.pdf

Létourneau, G., Jean, M (2006). Cartographie par télédétection des milieux humides du Saint-Laurent (2002). Environnement Canada, Direction générale des sciences et de la technologie, Monitoring et surveillance de la qualité de l'eau au Québec. Rapport scientifique et technique ST-239, 130 pages.

Lopez-Martinez, C., Ferro-Famil, L., Pottier, E (2005). Part I – Tutorial on Radar Polarimetry. 4-Polarimetric Decomposition. European Space Agency, PolSarPro documentation. 28 pages. URL: <http://earth.eo.esa.int/polsarpro/tutorial.html>

MDA (2009). RADARSAT-2 Product description. MacDonald, Dettwiler And Associates. November 2, 2009, 46 pages. URL : http://www.radarsat2.info/product/new_prod_ov.asp

Ménard, S., Darveau, M., Imbeau, L., Lemelin, L.V (2006). Méthode de classification des milieux humides du Québec boréal à partir de la carte écoforestière du 3e inventaire décennal. Rapport technique n° Q2006-3, Canards Illimités Canada – Québec, 19 pages.
URL: www.ducks.ca/fr/province/qc/nouvelle/pdf/Q200603.pdf

NWWG (1997). Groupe de travail national sur les terres humides (1997). Système canadien de classification des terres humides du Canada (2^{ième} édition). Édité par B.G. Warner et C.D.A. Rubec. Publié par le Centre de recherche sur les terres humides de l'Université de Waterloo. 68 pages.

Pôle-relais Tourbières, 2007 : Page web consultée le 5 janvier 2008.
URL: <http://www.pole-tourbieres.org/>

RAMSAR (2007a). Convention de RAMSAR sur les zones humides. Page web officielle de l'organisme. Page consultée en décembre 2007. URL : <http://www.ramsar.org>.

RAMSAR (2007b). The List of Wetlands of International Importance 19 November 2007. 39 pages. Document électronique disponible en ligne.
URL: <http://www.ramsar.org/sitelist.pdf>



















[RMB, 2010]. Réserve mondiale de la biosphère du Lac-Saint-Pierre. Page web consultée le 9 février 2010. URL: <http://www.biospherelac-st-pierre.qc.ca>

Sewel, M (2009). Kernel Methods. 15 pages. SVM.ORG (<http://www.svms.org/>)
Documents disponible en ligne, URL: <http://www.svms.org/kernels/kernel-methods.pdf>

Siberia-II (2005). Multi-Sensor concepts for Greenhouse Gaz accounting of Northern Eurasia. Page web consultée en février 2008.
URL : <http://www.siberia2.uni-jena.de/index.php>

ANNEXES

ANNEXE 1A : Espèces végétales de la classification du Centre Saint-Laurent
(Letourneau et Jean, 2006)

Code	Physionomie	Couleur originale	Scientifique	Français	Anglais
38	[H1]		Bas marais à <i>Typha</i> sp.	Bas marais à typhas	Low marsh dominated by cattails
35	[H1]		Bas marais à <i>Acorus calamus</i>	Bas marais à Acorus roseau	Low marsh dominated by Calamus
40	[H1]		Bas marais à <i>Sparganium eurycarpum</i>	Bas marais à Rubanier à gros fruits	Low marsh dominated by Broadfruit Bur-reed
89	[H2]		Haut marais à <i>Calamagrostis canadensis</i>	Haut marais à Calamagrostis du Canada	High marsh dominated by Bluejoint
21	[H2]		Bas marais à <i>Zizania</i> sp.	Bas marais à zizanies	Low marsh dominated by wild rice
88	[H2]		Haut marais à <i>Phalaris arundinacea</i>	Haut marais à Phalaris roseau	High marsh dominated by Reed Canarygrass
84	[H2]		Haut marais à <i>Phragmites australis</i>	Haut marais à Phragmite commun ²	High marsh dominated by Common Reed
90	[H2]		Haut marais à <i>Glyceria grandis</i>	Haut marais à Glycérie géante	High marsh dominated by American Mannagrass
36	[H2]		Bas marais à <i>Lythrum salicaria</i>	Bas marais à Salicaire commune ⁴	Low marsh dominated by Purple Loosestrife
20	[h1]		Bas marais à <i>Schoenoplectus pungens</i>	Bas marais à Scirpe d'Amérique	Low marsh dominated by Common Threesquare
26	[h1]		Bas marais à <i>Scirpus lacustris</i> ¹	Bas marais à Scirpe des étangs ¹	Low marsh dominated by Great Bulrush ¹
27	[h1]		Bas marais à <i>Bolboschoenus fluviatilis</i>	Bas marais à Scirpe fluviatile	Low marsh dominated by River Bulrush
31	[h1]		Bas marais à <i>Eleocharis</i> sp.	Bas marais à éléocharides	Low marsh dominated by spikerushes
43	[h1]		Bas marais à <i>Schoenoplectus pungens</i> et autres émergentes	Bas marais à Scirpe d'Amérique et autres émergentes	Low marsh dominated by Common Threesquare and other emergent vegetation
83	[h1]		Haut marais à <i>Carex</i> sp.	Haut marais à carex	High marsh dominated by sedges
34	[h2]		Bas marais à <i>Pontederia cordata</i>	Bas marais à Pontédérie cordée	Low marsh dominated by Pickerelweed
25	[h2]		Bas marais à <i>Sagittaria</i> sp.	Bas marais à sagittaires	Low marsh dominated by arrowheads
32	[h2]		Bas marais à <i>Butomus umbellatus</i>	Bas marais à Butome à ombelle	Low marsh dominated by Flowering Rush
6	[D]		Eau peu profonde	Eau peu profonde	Shallow open water
11	[D]		Eau peu profonde à	Eau peu profonde à	Shallow water

			herbier flottant	herbier flottant	dominated by floating vegetation
130	[A1]		Marécage arboré	Marécage arboré	Treed swamp
131	[A1]		Marécage à <i>Acer saccharinum</i>	Marécage à Érable argenté	Treed swamp dominated by Silver Maple
135	[A1]		Marécage arboré à <i>Salix nigra</i>	Marécage arboré à Saule noir	Treed swamp dominated by Black Willow
136	[A1]		Marécage à <i>Salix fragilis</i>	Marécage à Saule fragile	Treed swamp dominated by Crack Willow
110	[A2]		Marécage arbustif	Marécage arbustif	Shrub swamp
112	[A2]		Marécage arbustif à <i>Salix</i> sp.	Marécage arbustif à saules	Shrub swamp dominated by willows
113	[A2]		Marécage arbustif à <i>Alnus incana</i> ssp. <i>rugosa</i>	Marécage arbustif à Aulne rugueux	Shrub swamp dominated by Speckled Alder
111	[A2]		Marécage arbustif à <i>Cornus rugosa</i>	Marécage arbustif à Cornouiller rugueux	Shrub swamp dominated by Roundleaf Dogwood
	[A3]		Physionomie absente de la classification CSL		
	[M]		Physionomie absente de la classification CSL		

1 Fleurbec. 1987. Plantes sauvages des lacs, rivières et tourbières. « Guide d'identification Fleurbec ».

2 Fleurbec. 1983. Plantes sauvages des villes, des champs et en bordure des routes. Volume 2. « Guide d'identification Fleurbec ».

4 Darbyshire, Favreau et Murray. 2000. Noms populaires et scientifiques des plantes nuisibles du Canada. Revu et augmenté. Direction générale de la recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada. Publication 1397/B.

ANNEXE 1B: Dimensions des principales espèces végétales du Lac Saint-Pierre et regroupement en classes physiologiques

	ESPÈCE	Superficie (ha)	Feuille(s) (lgr) Largeur (long) Longueur	Tige (s) (h) Hauteur (d) Diamètre	Fleurs Inflorescence	Notes
[H1] 40	Rubaniar à gros fruits (Spaganium eurycarpum)	338.3	* lgr: 0.7à1.0 [FL];0.5[Fb1]. *long :120[Fb1].	* forte, dressée [FL], cylindrique et ramifiée au niveau de l'inflores- cence [Fb1]. *h : 50à150 [FL] ; 100- 200[Fb1].	*Inflorescence importante avec des fruits pouvant atteindre la taille d'une balle de ping-pong [Fb1].	*Feuilles imbriquées à la base, bien dressées, raides et dépassant la tige qu'elles cachent [Fb1]. *Grande plante vivace à stolon et rhizome rampant [FL]. *photo [Fb1], p.219.
[H1] 35	Acorus roseau ou (Roseau aromatique) (Acorus calamus)	306.8	*Linéaires et dressées * long : 50à200 * lgr : 1à2	*h : 100à200 [FL].	*Floraison estivale [FL]. *Spathe 20- 75[FL]. *	Émergent
[H1] 38	Typhas sp. T. à feuilles étroites (T. angustifolia [FL]) ou T. à larges feuilles (T. latifolia [FL])	1813.6	* lgr : 0.3 à 2.0 [FL]	*h : 100à300 [FL].	*Épis long. de 10 à 40 [FL].	*Communément appelé quenouilles (Cat-tail)
HM [H2] 88	Phalaris roseau (ou Alpiste roseau) (Phalaris arundinacea)	3152.2	*Longues et étroites [FL], étalée horz. [Fb2] . * lgr : 0.8 à 2[FL];1- 1.5[Fb2]	*Dressée, non ramifiée, cylindrique [Fb2]. *h : 80 à 200[FL];150- 200[Fb2]. *d :1 [NAC]	*Floraison de mai à juillet[FL]. *Panicule 5 à 25cm (8- 20cm, [FL]) *Panicule long 10- 20[Fb2]	*Couvre de vastes espaces sur les îles argileuses [FL], forme des colonies denses [Fb2]; * Sa croissance vigoureuse laisse peu de place aux autres plantes *photo [Fb2], p.157.
HM [H2] 89	Calamagrostide du Canada (Calamagrostis canadensis)	514.0	*Forte densité de feuilles à la base sur près de 1m [Fb2]. *lgr : 0.2à0.4 [FL];1[Fb2] *long :25[Fb2]	*h :80 à 160 [FL];150 [Fb2]. *d : 0.4 à la base [Fb2].	*Panicule 11à17, lâche et ouverte [FL]. *Grande panicule, lgr :25cm, long :10[Fb2]	*Physionomie similaire à celle du Phragmite commun (mais diamètre différent). *photo [Fb2], p.155
HM [H2] 84	Phragmite commun (Phragmites australis)	18.0	*Alternes étalée horiz. En forme de ruban [Fb2]. * lgr : 1à5 [FL];2[Fb2] ; *long :30 [Fb2];	* Tige issue d'un long rhizome horizontal [FL], ronde et creuse[Fb2]. *h: 100à500 [FL] ;200 [Fb2] ;	* Floraison estivale [FL] et plumeuse[Fb2]. *Panicule 15à30 [FL]	* Marais et rivages, général mais très clairsemé dans le Québec [FL]. *photo [Fb2], p.149.

HM [H2] 90	Glycérie géante (<i>Glyceria grandis</i>) Ou <i>Glyceria maxima</i>	120.0	* lgr : 0.6-1.5	*Chaume robuste, glabre et lisse[FL]. *h : 100à160[FL].	*Panicule long : 15à40	*Forme souvent de vastes colonies pures dans les eaux peu profonde [FL].
[H2] 36	Salicaire pourpre (<i>Lythrum salicaria</i>)	161.3	*Opposée ou verticillées par 3[FL, Fb2]. *lgr :1.5 [Fb2]. *long :8 [Fb2].	*Dressée, très ramifiées à la fin [FL, Fb2]. *h : 60à100 [FL]; 100- 150 [Fb2].	* Longue et dense inflorescence en épis long 25 cm [Fb2]	*Plante vivace issue d'une grosse souche ligneuse [FL] *photo [Fb2] p.37
[h1] 83	Laiche sp. (<i>Carex</i> sp.)	247.2				*Ayant l'apparence de graminée dans leur partie végétative [FL]. *Plus de 200 espèces au Québec[FL]. * Sedge en anglais
[h1] 31	Éléocharide sp. (<i>Eleocharis</i> sp.) (une douzaine d'espèce au Québec)	302.3	*Généralement réduite aux gaines [FL] (absence de feuilles), peu nombreuse [Fb1].	*De taille moyenne et variable, dressée et robuste [Fb1]. *h : 30à70 [FL]; 80 à 100, rarement 200[Fb1]. *d : 0.3 à la base [Fb1].	*Épillet solitaires, terminaux sans involucres [FL].	*Description de <i>S. palustris</i> lorsque mention [Fb1]. *Croît en colonie dense d'où sont souvent exclues les autres espèces [Fb1]. *photo fb1 p.323. Physionomie similaire à celle du scirpe.
[h1] 27	Scirpe fluviatile (<i>Scirpus fluviatilis</i>) [FL] ou (<i>Bolboschoenus</i> <i>fluviatilis</i>)	2435.7	* lgr :0.7 à 2 [FL]	*h : 100à200 [FL]. *d : 1.0 [FL].	* Floraison estivale [FL]	* Très grosses tiges et parfaitement triangulaire [FL].
[h1] 26	Scirpe des étangs (<i>Scirpus lacustris</i>) (<i>Schoenoplectus</i> <i>lacustris</i>)	1179.1	Débutes à la base (long :20), au nombre de 2 et étroites [Fb1].	*h : 50-250[FL]; peut atteindre 300 [Fb1] *d : 2 à 2.5 à la base[FL]; 1 à la base[Fb1].	*Inflorescence lâche en épillet [FL] et paraissant prolonger la tige [Fb1].	*Tiges fermes [FL], dressées et non ramifiées [Fb1]. *Photo [Fb1] p.331
[h1] 20	Scirpe d'Amérique (<i>Scirpus americanus</i> [FL] ou <i>Schoenoplectus</i> <i>pungens</i>).	562.8	*Plus courtes que la tige, paraissant continuer la tige * long : 10à30	*h : 20-130[FL].	*Épillet 0.5à1.0 réunis en une tête latérale[FL].	Tiges triangulaires à face concave, raides et dressées [FL].
[h1] 43	Bas marais à <i>Schoenoplectus pungens</i> et autres émergentes.	49.4				
[H2] 21	Zizanie sp. <i>Z. aquatique</i> (<i>Zizania</i> <i>aquatica</i>) ou <i>Z. des marais</i> (<i>Zizania</i>	539.4	* Alterne, flexible, en forme de ruban [Fb1]. lgr : 0.1à0.5 [FL]; 2à3.5 [Fb1].	*h : 50 à 200[FL]; 100- 200 [Fb1]. *d : 2 à la base [Fb1]	*Inflorescence pistillée et étalée à la maturité [FL].	*Tige dressée lisse et glabre [FL], non ramifiée [Fb1]. *Tige cylindrique et creuse[Fb1]. * <i>Z. aquatique</i> plus courte que

	palustris)		*Long : 70à105[Fb1].			Z.des marais[Fb1]. **Photo [Fb1] p.342
[h2] 34	Pontédérie cordée (P. à feuilles en cœur). (Potendria cordata)	302.6	*Feuilles dressées, longuement pétiolées [Fb1]. * lgr : 4à15 [FL] ; 9[Fb1] *long : 5à25 [FL]; 15[Fb1]	*Tige aérienne unifoliée [FL], dressée et non ramifiée [Fb1]. *h : 30à130 [FL]; 80[Fb1].	*Inflorescence dense, floraison estivale [FL]. *Inflorescence forme cylindrique, dépassant la plante.	*Physionomie semblable à celle des sagittaires. *photo [Fb1] p. 152.
[h2] 25	Sagittaire sp. (Sagittaria sp.)	35.2	*Forme extrêmement variable mais toujours sagitté. * lgr :2-18 au bout d'une longue queue [Fb1].	*h : 10à140 [FL]; 100 [Fb1]	*Grandes fleurs[FL] *lgr : 2à4 [FL]	*Description faite pour Sagittaire latifolié (Sagittaria latifolia) *Plante totalement ou partiellement immergée [FL]. *photo fb1 p.3266
[h2] 32	Butome à ombelle (Butomus umbellatus)	34.7	*Dressées le long de la tige [FL], épaisses et spongieuses [Fb1]; *lgr :0.2à1.0 [FL];0.7 [Fb1]. *long :60[Fb1].	*Hampe dressée et cylindrique [FL] non ramifiée [Fb1]. *h : 30à100 [FL]; 100[Fb1]. *d :1 [Fb1]	*Floraison tout l'été suivant le niveau de l'eau. *Pédicelle, long : 4à10 *Ombelle h=10cm	*Photo [Fb1], p.176.
Sources : [FL]= Flore Laurentienne, 3ième édition. [Fb1]=Fleurbec (1987), Plantes des lacs, rivières et tourbières. [Fb2]=Fleurbec (1983), Plantes sauvages des villes, des champs et en bordure des chemins, tome 2. [NAC]= http://www.nature-action.qc.ca page accédée le 1 fév. 2009. Note : Les superficies ont été extraites des classifications du Centre Saint-Laurent, Environnement Canada (Létourneau et Jean, 2006).						

ANNEXE 2: Description des classes physionomiques obtenues par la classification ISODATA d'une image Landsat-5

Les classes physionomiques identifiées à la section 9.3 ont aussi fait l'objet d'une analyse de séparabilité des classes (Tableau A2-1) pour s'assurer qu'il n'y a pas eu d'une part de sur-segmentation de l'espace multispectral et de l'autre pour aider à l'identification des classes physionomiques partageant des similitudes et pouvant être regroupées.

La séparabilité des classes a été dans l'ensemble très forte avec des divergences transformées supérieures à 1.8 (Tableau A2-1). Les plus faibles séparabilités ont été pour la plupart observées entre les classes physionomiques qui avaient déjà fait l'objet d'un regroupement lors de l'étape de la photo-interprétation.

Il existe cependant une confusion moyenne entre les physionomies dénudées humides (c4 et c8) et les physionomies dénudées (moins) humides avec ou sans résidus de cultures (c5 et c7) de même qu'avec les classes c12 et c14 où des divergences allant de 1.4 à 1.7 peuvent-être observées. Il est donc opportun de considérer ces classes en termes de gradient plutôt qu'en termes de physionomies totalement distinctes au contraire des physionomies dénudées sèches (c13, c15, c16 et c17) et herbacées sur substrat sec (c6, c9, c10 et c11) qui forment des groupes distincts et totalement séparables des autres groupes de physionomies.

La classification des secteurs boisés a permis l'identification de 5 classes physionomiques. La classe c91 correspond à des peuplements de conifères sur des substrats généralement humides. Les classes c92 et c94 correspondent à des peuplements de conifères ou mixtes sur des sites plus secs que ceux de la classe c91 alors que la classe c93 correspond à des peuplements de feuillus (sans feuilles au moment de l'acquisition) sur des substrats secs et/ou avec une contribution du sous-étage (arbrisseaux, sol dénudé, physionomies herbacées). La classe c95 est celle qui contraste le plus avec les autres classes de physionomies arborées ou arbustives. Pour cette classe, la réflectance dans la bande tm-5 est supérieure à celle de tm-4 (Figure A2-1, Tableau A2-2) ce qui est typique des sols dénudés clairs, mais la réflectance dans les bandes du visible (tm-2 et 3) est tout de même inférieure à celles des physionomies dénudées sèches. La classe c95 correspond à des physionomies arbustives moins denses contrairement aux autres classes (c91 à c94) dominées par des physionomies arborées dont le sous-étage est plus sec et/ou dominé par le minéral (socle rocheux) ce qui expliquerait les fortes réflectances observées en TM4 et TM5.

L'ensemble des physionomies forestières se discrimine bien des physionomies des champs même si elles sont issues de deux classifications distinctes (§4.5.4) surtout en ce qui concerne la séparabilité avec les physionomies herbacées et dénudées sèches (Tableau A2-1). La séparabilité avec les classes dénudées humides est cependant moindre surtout entre les physionomies dénudées moyennement humides avec ou sans résidus de cultures (c5, c7) et les physionomies arborées ou arbustives de feuillus sur des substrats plutôt sec (c93, c94 et c95). La forte absorption du RÉM dans infrarouge pour les marécages arborés (c191) causés par une absence de biomasse foliaire et un substrat très humide (parfois inondé) à aussi causée une confusion avec les classes de physionomies dénudées très humides (c1, c4 et c8).

Une analyse de la séparabilités des classes par bande spectrale (non présentée) à permis d'identifier la bande spectrale TM4 comme la principale source de contribution à la séparabilité des classes suivie de la bande TM5. Sur l'ensemble des 276 paires de classes possibles (à l'exclusion des marais herbacés qui ne comptaient que 144 pixels), les bandes du visible TM2 et TM3 ont été dominantes à la séparabilité des classes que dans 15 occasions dont 8 qui ont impliqué les physionomies forestières.

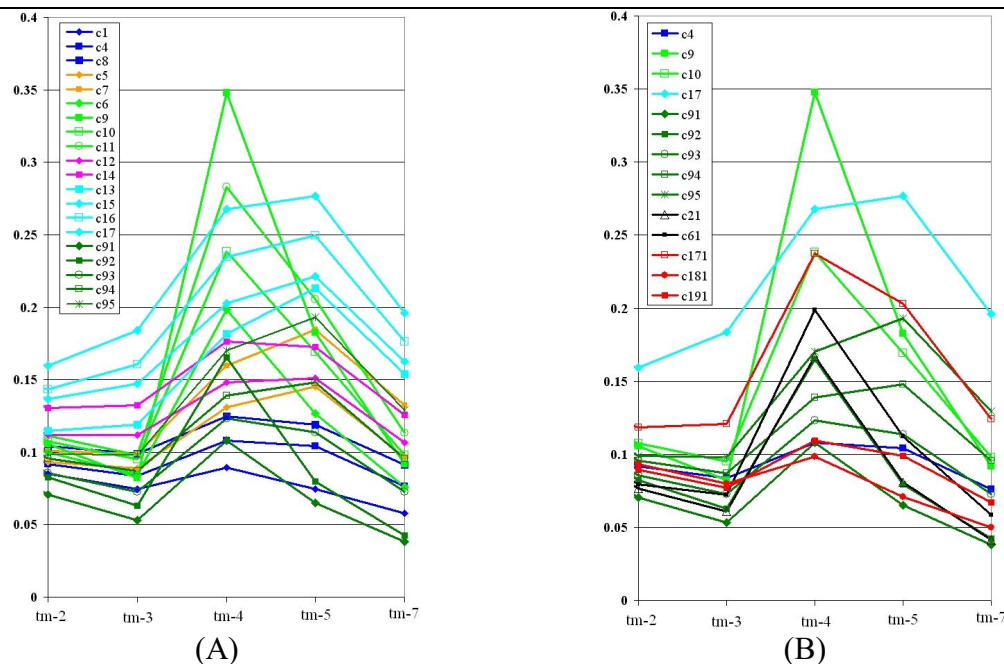


Figure A2-1 : Signatures spectrales des classes de physionomies végétales (11 nov. 2006)

Il est à noter que les physionomies des milieux humides ne proviennent pas de la classification ISODATA mais d'une interprétation des diverses sources de données incluant les images ALOS elles-mêmes. Les objets appartenant aux classes de tourbières ouvertes (c61) et boisées (c21) ont été obtenus par l'interprétation d'une image Ikonos-2 acquise le 2 juin 2005 appuyée par deux visites sur le terrain en novembre 2009 à la tourbière de la Baie des Mines.

--	c1	c4	c5	c6	c7	c8	c9	c10	c11	c12	c13	c14	c15	c16	c17	c21	c61	c91	c92	c93	c94	c95	c181
c4	1.40	--																					
c5	1.99	1.75	--																				
c6	2.00	2.00	1.84	--																			
c7	2.00	2.00	1.63	1.87	--																		
c8	1.88	1.45	1.77	2.00	1.97	--																	
c9	2.00	2.00	2.00	1.98	2.00	2.00	--																
c10	2.00	2.00	2.00	1.47	1.85	2.00	1.85	--															
c11	2.00	2.00	2.00	1.99	1.99	2.00	1.40	1.33	--														
c12	2.00	2.00	1.84	2.00	1.69	1.57	2.00	2.00	2.00	--													
c13	2.00	2.00	1.98	1.98	1.16	2.00	2.00	1.76	1.95	1.95	--												
c14	2.00	2.00	2.00	1.99	1.82	1.99	2.00	1.99	2.00	1.64	1.69	--											
c15	2.00	2.00	2.00	2.00	1.98	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	1.65	1.74	--										
c16	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.98	2.00	1.47	--									
c17	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.98	1.45	--								
c21	2.00	2.00	1.93	1.94	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	--							
c61	2.00	2.00	1.95	1.67	1.99	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.74	--						
c91	1.89	1.98	1.98	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.87	2.00	--					
c92	2.00	2.00	1.96	1.65	2.00	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.93	1.88	1.76	--				
c93	1.96	1.38	1.62	1.99	2.00	1.74	2.00	2.00	2.00	1.99	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.92	2.00	1.90	1.90	--			
c94	2.00	1.93	0.96	2.00	1.78	1.77	2.00	2.00	2.00	1.57	2.00	1.97	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.82	--		
c95	2.00	2.00	1.84	1.94	0.43	1.99	2.00	1.96	2.00	1.87	0.97	1.92	1.98	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.92	--	
c181	1.98	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	--
c191	1.35	1.30	1.76	1.96	1.96	1.55	2.00	2.00	2.00	1.98	2.00	1.99	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.81	1.98	1.58	1.93	1.90	2.00

Note 1 : Les divergences transformées inférieures à 1.8 sont indiquées en gris.

Note 2 : Les paires de classes dont la séparabilité repose principalement sur les bandes spectrales du visible (TM2 et TM3) sont indiquées **en gras souligné**.

Tableau A2-1: Évaluation de la séparabilité des classes physiologiques avec les bandes spectrales TM2, TM3, TM4 et TM5 mesurée avec l'algorithme de la divergence transformée (classification non supervisée du 5 novembre 2006)

TM2	TM3	TM4	TM5	NDVI	Commentaires
A) Physionomies des champs (dénudées humides et sèches, herbacées ou arbrisseaux sur substrats sec ou humide)					
c1/0.084±0.007	0.074±0.008	0.089±0.012	0.074±0.012	0.087±0.067	*Physionomies dénudées très humides avec présence de végétation. *Classe plutôt marginale en milieux agricoles mais qui représente très bien les peuplements de conifères.
c4/0.091±0.004	0.083±0.005	0.107±0.012	0.104±0.012	0.125±0.058	* Physionomies dénudées humides.
c8/0.104±0.005	0.098±0.006	0.124±0.01	0.118±0.012	0.113±0.043	* Les signatures spectrales de c4 et c8 suggèrent la présence d'une faible végétation herbacée et/ou de résidus de récolte (particulièrement pour c4).
c5/0.093±0.005	0.088±0.007	0.13±0.015	0.145±0.015	0.188±0.076	Physionomies dénudées humides avec plus forte contribution du substrat à la réflectance totale.
c7/0.1±0.007	0.099±0.01	0.159±0.016	0.184±0.013	0.231±0.078	* Classes c5 et c7 sont la version sans végétation et / ou avec un sol plus sec que c4 et c8.
c6/0.099±0.009	0.084±0.012	0.198±0.025	0.126±0.016	0.399±0.091	* Physionomies non dénudées avec une contribution de la biomasse foliaire à la réflectance ce l'objet accompagné d'une forte contribution du substrat sec à la réflectance totale. * La classe c6 est étroitement liée aux secteurs de tourbières ouvertes [<i>shrub bog</i> (arbrisseaux) et physio. herbacées].
c9/0.105±0.01	0.082±0.012	0.347±0.032	0.182±0.019	0.615±0.058	* La classe c6 est étroitement liée aux secteurs de tourbières ouvertes [<i>shrub bog</i> (arbrisseaux) et physio. herbacées].
c10/0.107±0.009	0.094±0.012	0.238±0.021	0.169±0.022	0.429±0.076	* La classe c11 correspond à des gazons courts (classe qui caractérise entre autres les terrains de golf de la région).
c11/0.111±0.009	0.098±0.012	0.283±0.02	0.205±0.019	0.485±0.06	
c12/0.112±0.007	0.111±0.007	0.147±0.009	0.15±0.011	0.139±0.036	*Physionomies dénudées plutôt sèches (moins humides que c1, c4 et c8, c5 et c7).
c14/0.13±0.008	0.132±0.008	0.176±0.012	0.172±0.014	0.142±0.036	*Se distinguent aussi des classes c5 et c7 principalement par les bandes spectrales du visible (tm2, tm3).
c13/0.114±0.007	0.119±0.01	0.181±0.017	0.213±0.014	0.206±0.07	
c15/0.136±0.007	0.147±0.008	0.202±0.012	0.221±0.015	0.158±0.031	* Physionomies dénudées sèches, classe c17caractérisées par une forte réflectance pour toutes les bandes spectrales.
c16/0.143±0.009	0.16±0.011	0.234±0.014	0.249±0.016	0.188±0.044	
c17/0.159±0.01	0.183±0.011	0.267±0.018	0.276±0.016	0.185±0.027	

B) Physiologies arborées et arbustives					
TM2	TM3	TM4	TM5	NDVI	Commentaires
c91/0.07±0.006	0.053±0.006	0.107±0.012	0.065±0.013	0.337±0.07	* Contribution de la biomasse foliaire, canopée ouverte * Zones plus sombre (effet d'ombrage ou d'humidité). * Peuplement de conifères ou mixte.
c92/0.082±0.01	0.062±0.011	0.165±0.017	0.079±0.015	0.449±0.076	* Peuplements de conifères ou mixtes avec contribution de la biomasse foliaire des conifères.
c94/0.095±0.006	0.087±0.008	0.138±0.008	0.147±0.009	0.23±0.035	* Sites plus secs que la classe c91.
c93/0.085±0.006	0.072±0.007	0.123±0.011	0.113±0.01	0.449±0.076	* Peuplement de feuillus sans feuilles * Sites plus humides et ou avec la contribution du sous-étage.
c95/0.099±0.007	0.098±0.01	0.17±0.014	0.193±0.019	0.269±0.055	* Peuplements de feuillus sans feuilles. * Sites plus secs avec faible contribution du sous-étage, plus grande contribution du sol.
C) Physiologies des milieux humides (ne proviennent pas de la classification ISODATA)					
c21/0.076±0.005	0.06±0.006	0.166±0.018	0.08±0.016	0.464±0.058	
c61/0.079±0.009	0.072±0.006	0.198±0.015	0.112±0.012	0.464±0.05	
c171/ 0.118±0.007	0.12±0.014	0.237±0.048	0.203±0.05	0.314±0.084	
c181/ 0.092±0.004	0.079±0.005	0.098±0.007	0.071±0.006	0.103±0.03	
c191/ 0.089±0.011	0.077±0.012	0.109±0.018	0.098±0.027	0.172±0.063	

Tableau A2-2: Classes d'utilisation du sol et statistiques obtenues par une classification non supervisée (ISODATA) des bandes spectrales TM2, TM3, TM4 TM5 (image du 11 novembre 2006).