

## **Les variables caractéristiques de la qualité**

- **Critères diagnostic**

Quatre critères diagnostic faciles à quantifier ont été identifiés pour le suivi de l'état des phragmitaies dans le catalogue régional des mesures de gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire en Languedoc-Roussillon (Diren-LR et al 2007) : la hauteur du roseau (vert ou sec), le rapport du nombre de tiges sèches sur le nombre de tiges vertes, l'homogénéité de la couverture végétale (correspondant au pourcentage de trouées<sup>14</sup>) et la présence de ligneux. Ce dernier critère qui découle du processus d'atterrissement des phragmitaies est un phénomène rare en Camargue et n'a pu être suivi faute d'un nombre suffisant d'échantillons. Nous avons donc retenu les trois premiers critères cités ci-dessus. Le paramètre de hauteur a été fondé sur la moyenne des mesures des tiges vertes en centimètre des quatre quadrats pour chaque site échantillonné. Le rapport tiges sèches sur tiges vertes a été calculé pour chaque site à partir du nombre total de tiges de chaque type sur l'ensemble des quatre quadrats. Le pourcentage de trouées<sup>14</sup> a été évalué en s'appuyant sur les relevés de niveau d'eau sur les diagonales tous les quatre mètres. A chaque mesure, nous avons noté le milieu sur lequel était posé le réglot selon deux codes : R (roseau) ou T (trouée<sup>14</sup>). Nous avons évalué le pourcentage de trouées<sup>14</sup> à l'aide de la formule  $T/(R+T)*100$ .

- **Critères intéressant les exploitants de la sagne**

Le « sagneur » apprécie les roselières offrant une couverture végétale homogène caractérisée par une forte densité de tiges vertes présentant une hauteur et un diamètre moyens voire élevés (Poulin et Lefebvre, 2002). Une roselière coupée aura la particularité de ne contenir aucune tige sèche, la coupe ayant pour conséquence d'extraire les tiges sèches et d'augmenter la densité de tiges vertes si elle est effectuée dans les conditions optimales recommandées.

### **b - Les variables indicatrices de l'intérêt avifaunistique des phragmitaies**

- **Passereaux paludicoles**

Les paramètres impliqués dans la sélection de l'habitat par les passereaux paludicoles nicheurs ont été déterminés à partir d'une analyse comparative des niveaux d'eau, de la

structure végétale, de la distribution des invertébrés (ressources alimentaires) et de l'assemblage des espèces d'oiseaux dans 18 roselières situées en Camargue et en Languedoc-Roussillon dans le cadre d'une étude réalisée en mai-juin 1998 et 1999 par la Tour du Valat (Poulin et al., 2002 ; Poulin & Lefebvre 2002). L'un des paramètres de structure de la roselière lié à l'abondance globale des passereaux est la hauteur des tiges vertes en mai-juin dans les massifs coupés. Divers facteurs liés à la structure et la biomasse des roselières sont également importants selon l'espèce de passereau considérée. La rousserolle turdoïde est une espèce quasi absente des roselières où le roseau présente un diamètre moyen inférieur à 6 mm. La panure à moustaches recherche les roselières non exploitées, caractérisées par une forte densité de roseaux fins et secs. La lusciniole à moustaches est particulièrement abondante dans les roselières d'eau douce où les niveaux d'eau sont relativement bas et constants. L'abondance de la lusciniole est également associée aux roselières renfermant une forte proportion de tiges de roseaux fleuries (panicules) de l'année précédente, les panicules servant de refuge aux araignées, sa proie favorite. Enfin, la rousserolle effarvate affectionne les roselières monospécifiques inondées au printemps où le roseau vert montre une croissance vigoureuse et les roselières plutôt sèches présentant un mélange avec de nombreuses espèces végétales terrestres.

- **Héron pourpré**

Le héron pourpré niche en colonie dans les roselières hautes (2-2,5 m), inondées (30 cm) et non coupées, où le ratio roseaux secs/roseaux verts est en moyenne de 2 pour 1 (Barbraud et al 2002, cette étude). Le sol doit être inondé tout l'été pour protéger les nids des prédateurs ce qui se traduit souvent par une inondation permanente et récurrente des roselières avec une progression des trouées<sup>14</sup> au fil des années.

- **Butor étoilé**

Des coupes expérimentales réalisées en Camargue sur une période de cinq années (Poulin et Mathevet 2006) suggèrent que l'habitat optimal du butor étoilé correspond à des roselières légèrement inondées (10 cm) où le ratio roseau sec/roseau vert est de 1/1, soit des roselières où la dernière coupe s'est produite un peu plus d'un an avant la reproduction. Ces conditions sont cependant rares et l'on retrouve le plus souvent le butor (conditions sous-optimales) soit dans des roselières exploitées, dominées par le roseau vert (ratio sec/vert de 1/2) avec très peu

de trouées<sup>14</sup>, soit dans des roselières non exploitées (ration de 2/1 ou plus) avec de nombreuses mini-trouées<sup>14</sup> où l'interface eau/roseau, utilisée pour l'alimentation, est maximale (Poulin et al 2005, Poulin et al., données non publiées).

### **III - Résultats**

#### **A - Pluviométrie pendant les mois d'acquisition des images**

Des relevés journaliers sur le domaine de la Tour du Valat (P. Chauvelon, non publié), nous permettent de suivre la pluviométrie au cours de chaque mois d'acquisition des images et de comparer les deux années de suivis de notre étude (Annexe 2). Deux phénomènes sont à noter car ils sont susceptibles d'influencer les données de réflectance. Premièrement, septembre 2005 fut un mois particulièrement pluvieux, tout spécialement pendant les 10 premiers jours. Cela a notamment provoqué des inondations dans les marais du domaine de la Tour du Valat. Notre accès aux marais de chasse ayant été limité jusqu'à l'ouverture de cette dernière, il ne nous a pas été possible de connaître avec exactitude les niveaux d'eau à l'automne dans ces domaines. Il est donc difficile de savoir quelle peut être l'influence de la pluviométrie importante dans les 10 premiers jours de septembre en comparaison à la remise en eau des marais pour la chasse habituellement réalisée à cette époque. Nous considérerons donc ici, que l'effet de la pluie survenue 10 jours avant l'acquisition de l'image, est proche de celui de la remise en eau des marais de chasse. Cependant, ce type de pluviométrie aura une influence sur les marais temporaires à semi-temporaires dont les scirpaies font partie. Ce type de marais présentera en effet un niveau d'eau plus élevé que pour un mois de septembre plus sec. Deuxièmement, une pluie est survenue la veille de l'acquisition de l'image du 19 mai 2005 prise en matinée. Ceci devrait avoir pour conséquence une lame d'eau présente sur l'ensemble de la zone d'étude au moment de l'acquisition de l'image. Pour les autres mois, la pluviométrie reste comparable entre 2005 et 2006.

## **B - Caractéristiques spectrales des communautés végétales à identifier**

Nous avons dressé le profil spectral des phragmitaies, herbiers et scirpaies à partir des données de radiométrie corrigée (Figures 20, 21 et 22). Ces données sont similaires à celles pouvant être acquises au sol. Elles ont été extraites des images acquises en 2005 et en 2006 corrigées radiométriquement et géométriquement. Cela apporte une vision quasi-annuelle de la variation de la réponse spectrale de ces habitats. Pour chaque milieu nous avons calculé une moyenne des réflectances de l'ensemble des sites échantillonnés. A noter qu'en 2006 nous ne disposons pas d'une image en septembre mais d'une image en août et en octobre.

De façon générale, les phragmitaies obtiennent les valeurs de radiométrie les plus élevées notamment dans les canaux de l'infrarouge, alors que les herbiers montrent les valeurs les plus faibles. Sur les saisons printanière et estivale, le proche infrarouge est le canal présentant les valeurs les plus importantes pour les phragmitaies. En hiver, on observe une augmentation des valeurs tirées de la bande B1 (canal du vert) vers l'infrarouge moyen. L'automne est caractérisé par un profil similaire à l'été avec des radiométries importantes dans le proche infrarouge. Pour les herbiers, l'été concentre les valeurs les plus importantes tandis que l'automne et l'hiver sont marqués par une radiométrie minimale dans l'infrarouge moyen. Les valeurs maximales pour les scirpaies apparaissent du printemps à l'automne avec un pic dans le proche infrarouge au printemps rapidement dépassé par l'infrarouge moyen en été puis à l'automne. L'hiver est caractérisé par des radiométries faibles dont les maxima sont dans le proche infrarouge. Pour les trois communautés végétales, on note une différence marquée entre les mois de mai de 2005 et 2006, les valeurs étant globalement plus faibles en 2006.

Puisque la réflectance est un rapport donnant des chiffres compris entre 0 et 1, il est anormal d'obtenir des données négatives pour le mois de juin 2006. Ceci est la conséquence des limites de la méthode employée pour la correction des effets atmosphériques. En effet, le mois de juin présentait une visibilité très basse, signe d'une couverture nuageuse importante qui, d'une part, est à la limite des capacités de l'algorithme de corrections atmosphériques employé, et d'autre part, n'est possiblement pas représentatif de la visibilité de l'ensemble de la zone d'étude. La valeur du pixel servant de base à la correction doit en effet être sélectionné en mer profonde éloignée du littoral. Nous supposons que cela a induit sur certaines régions de la zone d'étude (notamment les plus au nord) une surestimation de l'influence de l'atmosphère sur la réponse enregistrée dans les bandes B1 et B2. Celles-ci

correspondent aux longueurs d'onde du vert et du rouge dans lesquelles la diffusion atmosphérique est plus importante (Bariou, 1978). Comme précisé dans la méthodologie, la méthode utilisée est approximative. Elle permet de corriger au mieux, le plus simplement possible les effets atmosphériques. Mais on peut supposer que des entrées maritimes à cette date, ont entraîné une variabilité des caractéristiques de l'atmosphère trop importante pour que le pixel en mer soit représentatif de la composition en aérosols sur l'ensemble de la zone d'étude comme cela a été possible pour les autres dates.

## **C - La classification en présence absence**

### **1 - Evaluation de la qualité de la classification**

La qualité de la classification est évaluée à l'aide de la précision totale qui est la mesure la plus utilisée et la plus simple à mettre en œuvre (Liu et al., 2006). Elle est le rapport entre le nombre d'unités (ou pixels) bien classées sur le nombre total d'unités composant l'échantillon de validation<sup>5</sup> (Congalton, 1991). Elle est un indicateur du pouvoir classificateur général de la classification. L'erreur de déficit est, quant à elle, le pourcentage d'unités mal classées de l'échantillon, détaillé pour chaque classe. Elle concerne donc les données dont l'intitulé sur la carte est erroné (Girard et Girard, 1999). Nous avons également évalué la qualité de la classification en effectuant des vérifications sur le terrain *a posteriori* pour certains pixels susceptibles d'une mauvaise classification selon les connaissances générales d'experts de la zone d'étude.

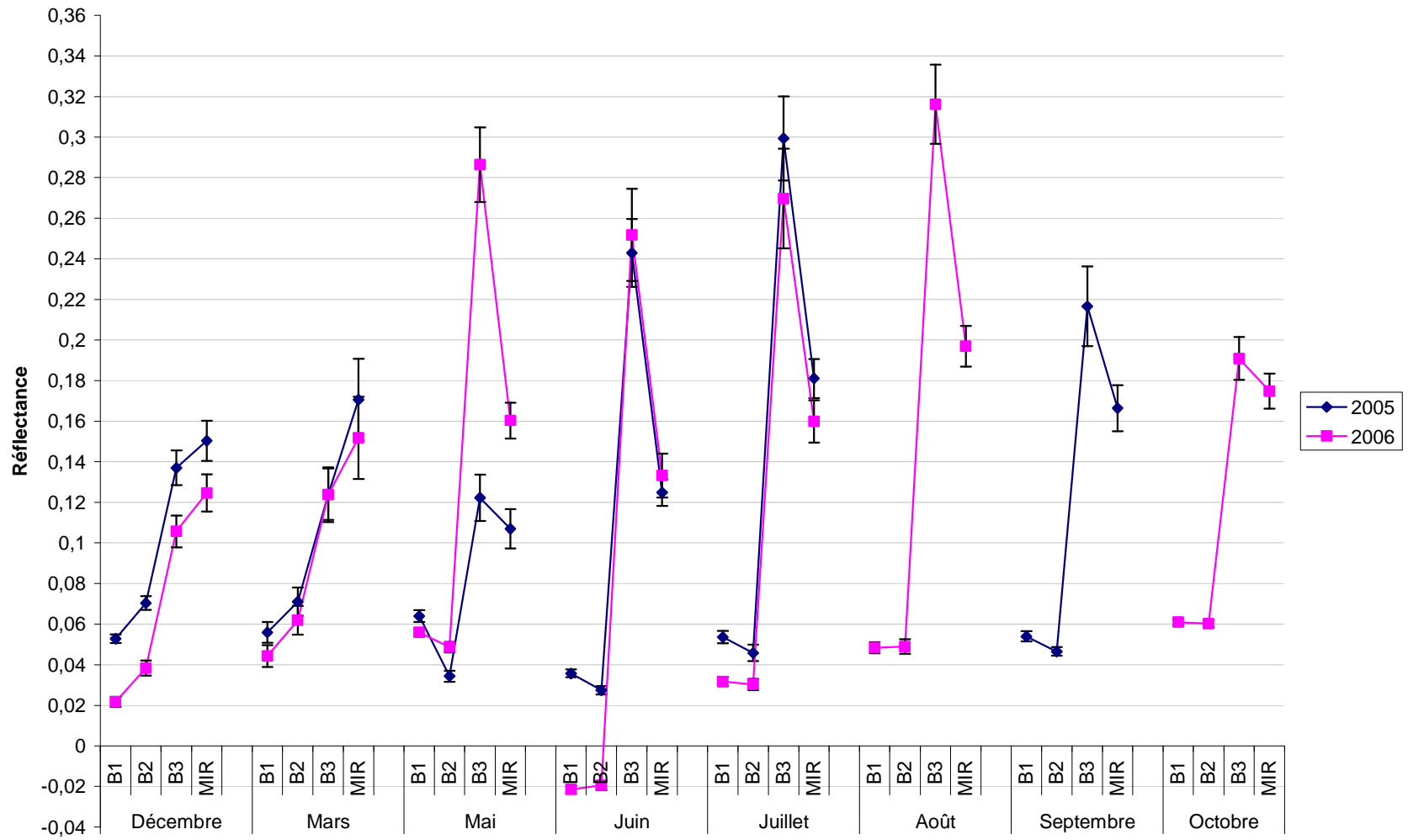


Figure 20 : Variation quasi-annuelle de la réflectance des phragmitaies en Camargue. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 5% ( $1.96 \cdot SE$ )

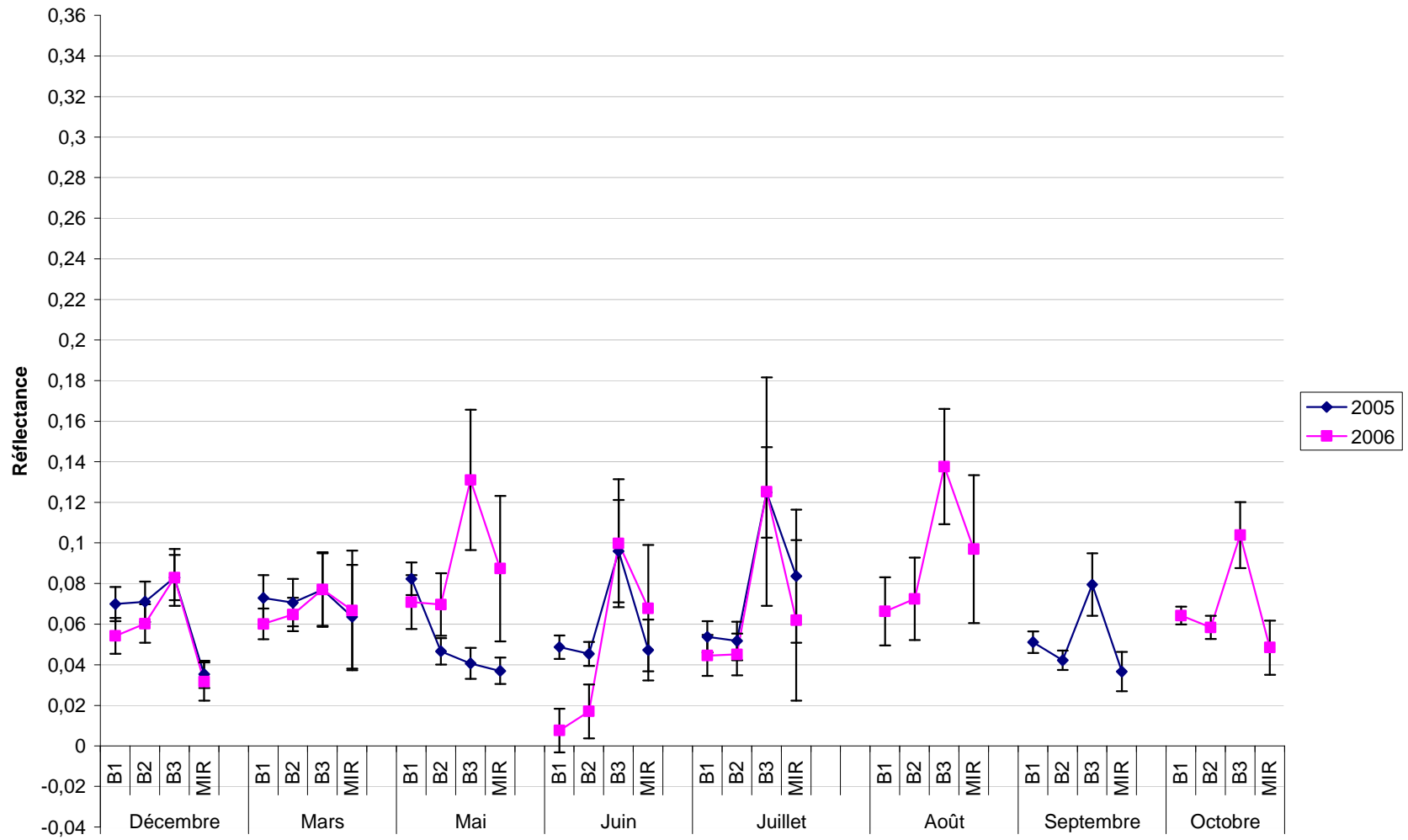


Figure 21 : Variation quasi-annuelle de la réflectance des herbiers en Camargue. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 5% ( $1.96 * SE$ )

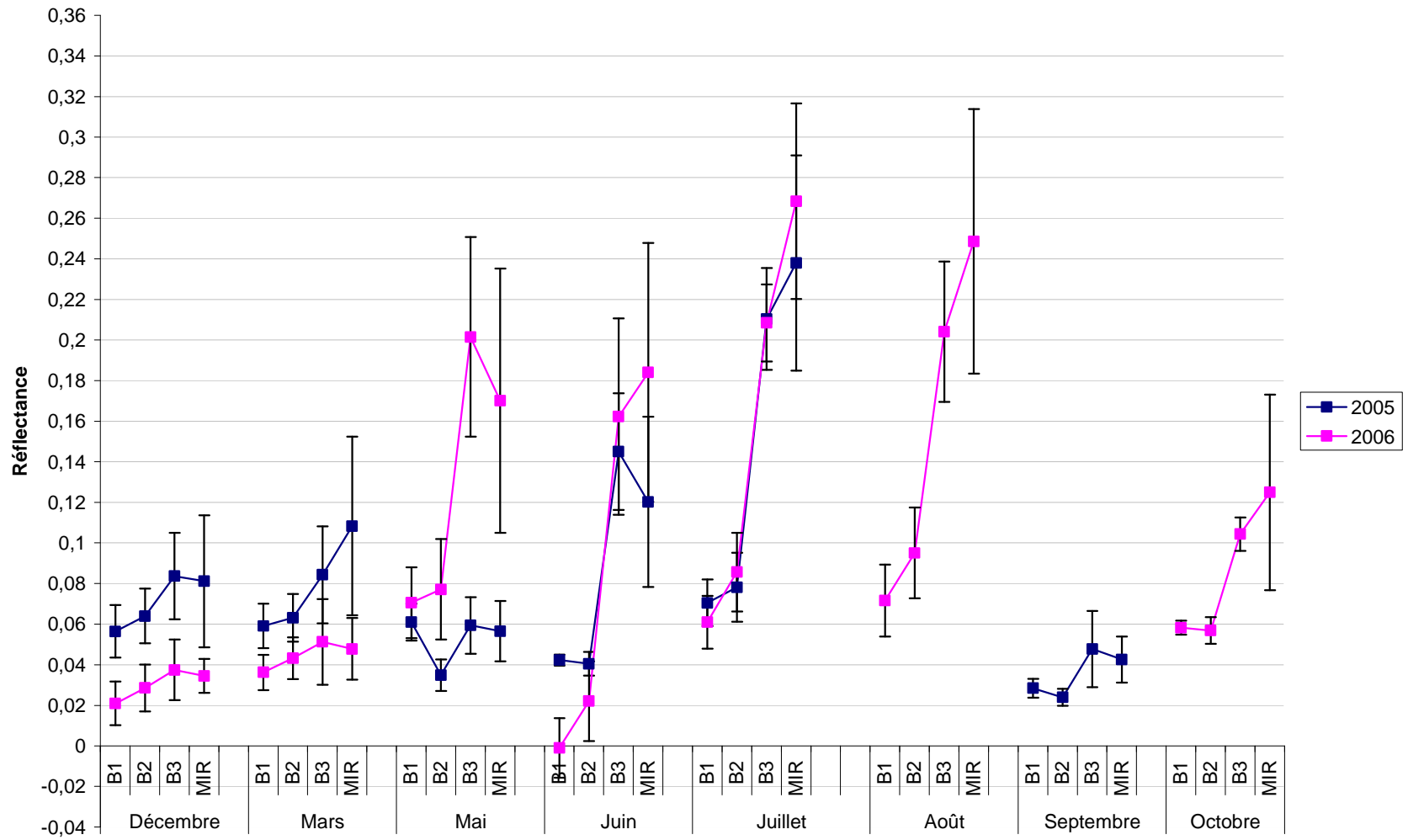


Figure 22 : Variation quasi-annuelle de la réflectance des scirpaies en Camargue. Les barres d'erreur représentent les intervalles de confiance à 5% ( $1.96 * SE$ )



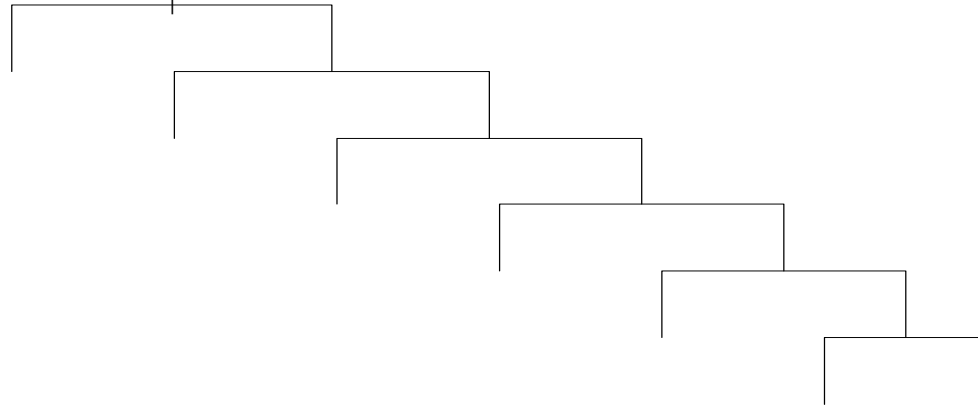
## **2 - La classification en présence-absence de la végétation**

### **a - Les paramètres des arbres optimaux**

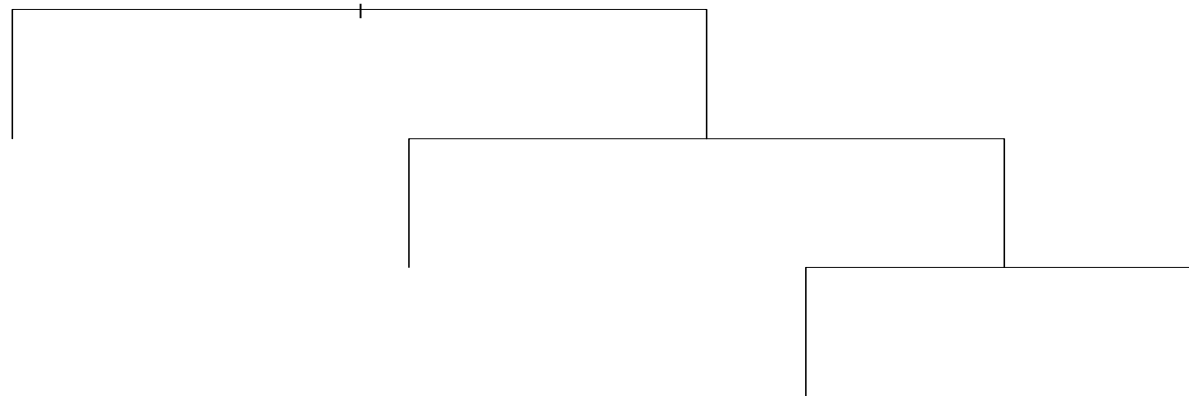
Les arbres ont été construits avec l'échantillon d'entraînement<sup>4</sup> et les images acquises en 2005. Pour chaque classification, nous avons utilisé le paramètre par défaut de la validation croisée<sup>15</sup> soit 10 itérations. Le paramètre de priorité optimal pour la classification des phragmitaies et des herbiers doit être ajusté à 0.40 pour les « non-sites » et 0.60 pour les sites. Pour les scirpaies, le paramètre par défaut, soit celui calculé en fonction de l'occurrence des éléments dans la base de donnée (ici 0.987 pour les non-sites et 0.013 pour les sites), donne le meilleur résultat. Nous avons testé et comparé deux types de méthodes d'élagage soit celle du CV0-SE et celle du CV1-SE. L'arbre CV0-SE pour les phragmitaies comporte 6 niveaux (Figure 23) tandis que l'arbre de la méthode du CV1-SE se décompose en 3 niveaux (Figure 24) les deux comportant une seule branche. L'arbre en CV0-SE des herbiers atteint 9 niveaux avec deux branches (Figure 25). Celui en CV1-SE a au maximum 3 niveaux avec deux branches (Figure 26). Pour la classification des scirpaies les deux méthodes ont donné le même arbre. Il présente cinq niveaux et est constitué de trois branches (Figure 27). Pour les phragmitaies et les herbiers, la méthode du CV1-SE donne la meilleure classification.

### **b - Les arbres optimaux et les formules de classification des phragmitaies, herbiers et scirpaies**

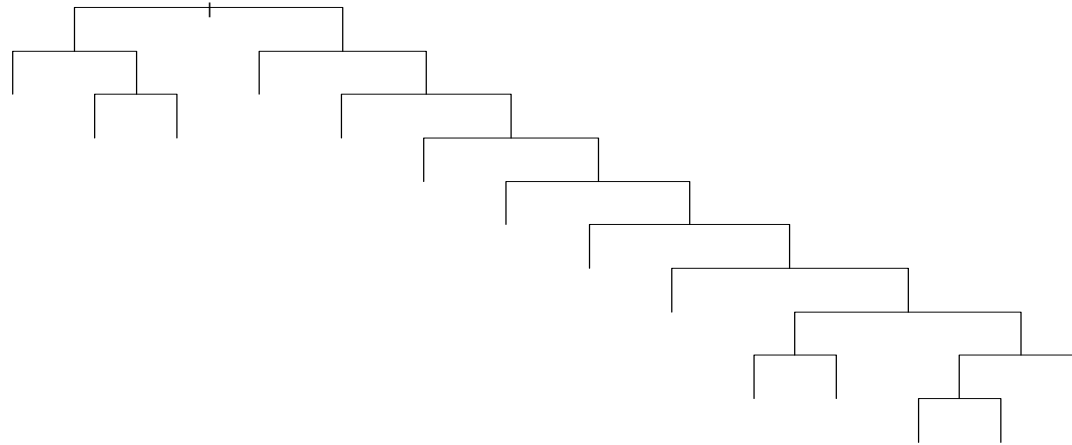
La formule mise au point pour chacune des trois communautés végétales a permis de calculer une carte au format binaire où l'absence est codée 0 et la présence est codée 1. Du fait de la non acquisition de l'image de septembre 2006, une variable du mois de septembre sélectionnée en 2005, a été remplacée par une variable du mois d'octobre en 2006. En effet, pour l'ensemble des communautés végétales que nous cherchions à classifier, les bandes du mois d'octobre étaient davantage corrélées à celles du mois de septembre que celles du mois d'août (Tableau 6).



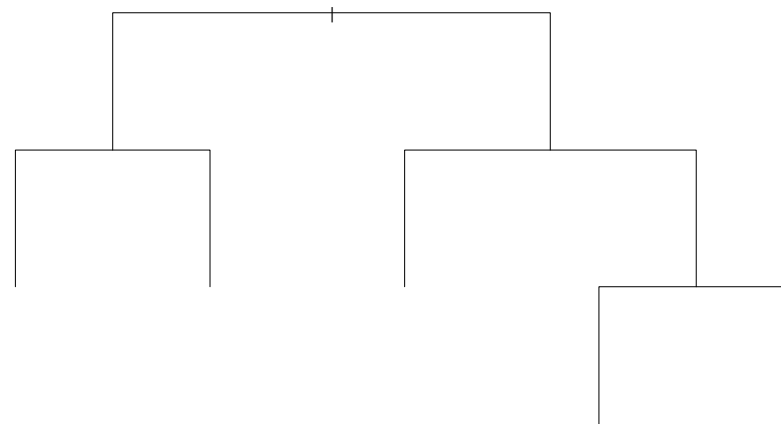
*Figure 23 : Profil de l'arbre obtenu avec la méthode du CV0-SE pour les phragmitaies*



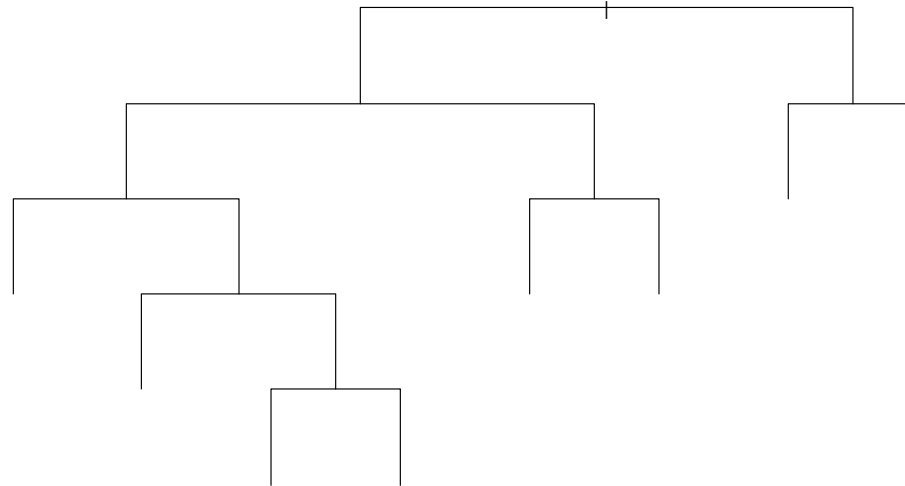
*Figure 24 : Profil de l'arbre obtenu avec la méthode du CV1 -SE pour les phragmitaies*



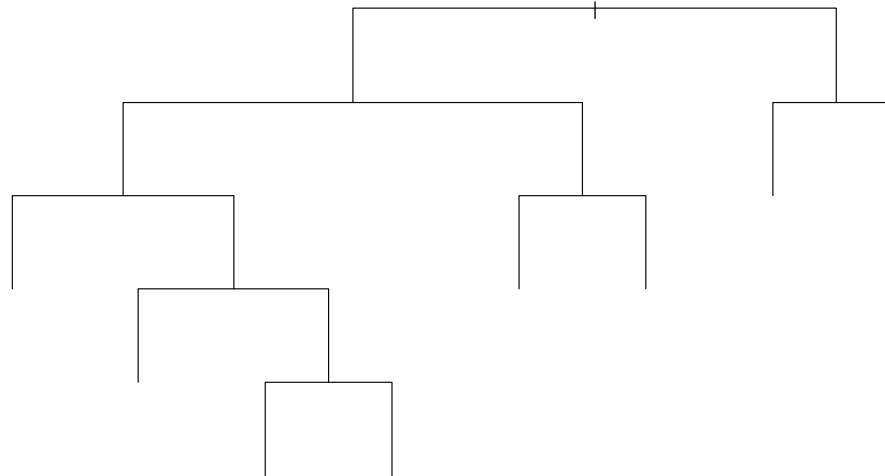
*Figure 25 : Profil de l'arbre obtenu avec la méthode du CV0-SE pour les herbiers*



*Figure 26 : Profil de l'arbre obtenu avec la méthode du CV1 -SE pour les herbiers*



*Figure 27 : Profil de l'arbre obtenu avec la méthode du CV0-SE pour les scirpaies*



*Figure 28 : Profil de l'arbre obtenu avec la méthode du CV1-SE pour les scirpaies*

Tableau 6 : Comparaison de la corrélation (*r* de Pearson) des bandes du mois de septembre 2005 avec celles des mois d'août et d'octobre 2006 (*n* =80) .

		Août		Octobre	
		<i>r</i>	<i>p</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
Septembre	B1	-0,22	0,056	0,43	0
	B2	-0,35	0,002	0,41	0
	B3	0,79	0	0,88	0
	MIR	0,35	0,002	0,81	0

- **La classification des phragmitaies**

Les variables retenues sont la différence entre la bande B3 de juin et de mars (nommée c30603), l'indice OSAVI calculé pour le mois de décembre (noté OSAVI12) et l'indice NDWIF2 du mois de septembre (noté NDWIF209).

L'arbre optimal (Figure 29) se compose ainsi de trois niveaux. Les phragmitaies sont codées 2 tandis que les « non-sites » (ou « non-phragmitaies ») sont codés 1. Le premier niveau permet d'isoler 544 sites sur les 672 « non-sites », la valeur de leur indice c30603 étant strictement inférieure à 0.04897. Sur les 128 « non-sites » restants, le deuxième niveau permet d'isoler 80 non-sites additionnels, tous caractérisés par une valeur de l'indice OSAVI de décembre égale ou supérieure à 0.2467. Enfin, le troisième niveau permet de classifier au mieux les 46 sites de phragmitaies avec un reste de 9 non-sites à partir de valeurs de l'indice NDWIF2 du mois de septembre strictement inférieures à -0.3834.

La formule permettant de classifier les phragmitaies est donc la suivante:

**Présence de Phragmitaies =  $c30603 \geq 0.04897$  et  $OSAVI12 < 0.2467$  et  $NDWIF209 < -0.3834$**

Le test t de Student réalisé sur l'ensembles des variables sélectionnées pour les phragmitaies montre l'intérêt des valeurs seuil définies par CART pour leur classification en 2005 et en 2006 (Figures 30, 31 et 32).

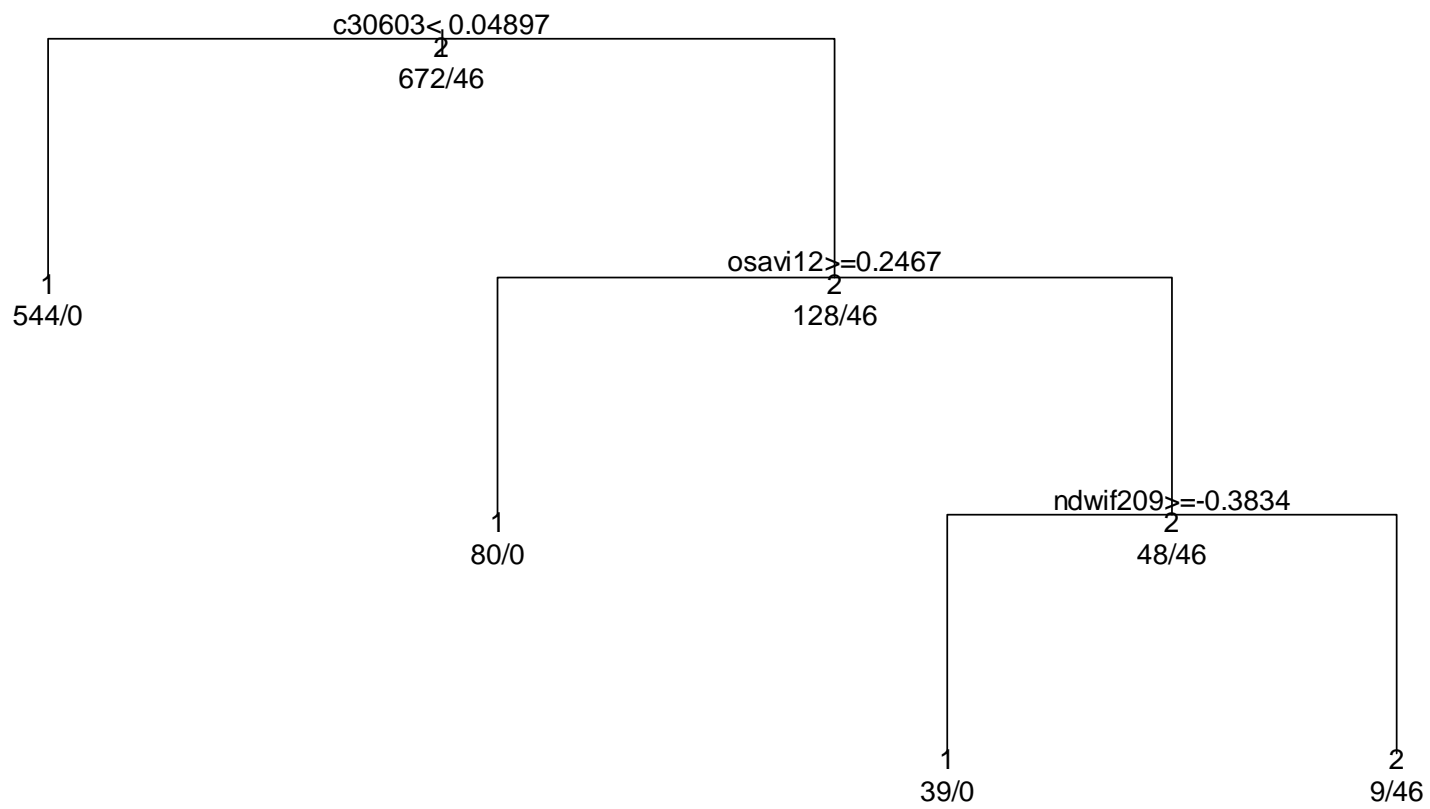


Figure 29 : Arbre optimal pour la classification des phragmitaies

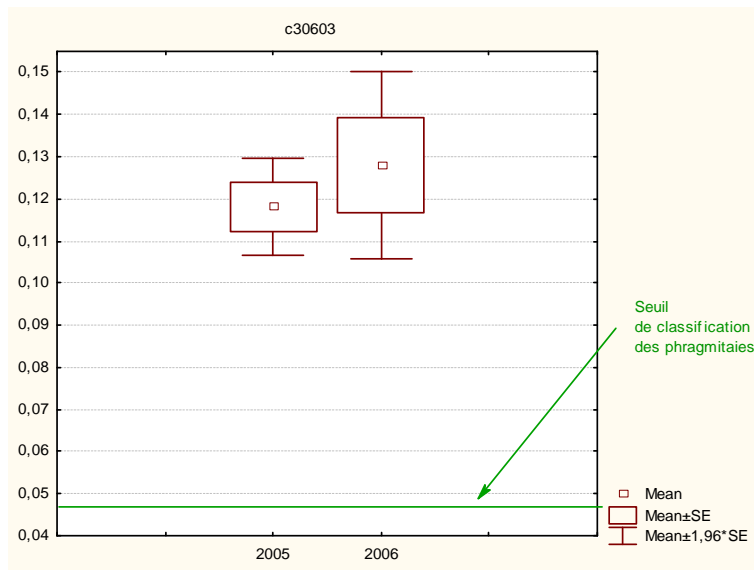


Figure 30 : Comparaison de la variable  $c30603$  calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons de phragmitaies ( $t=-1.02$ ,  $p=0.31$ )

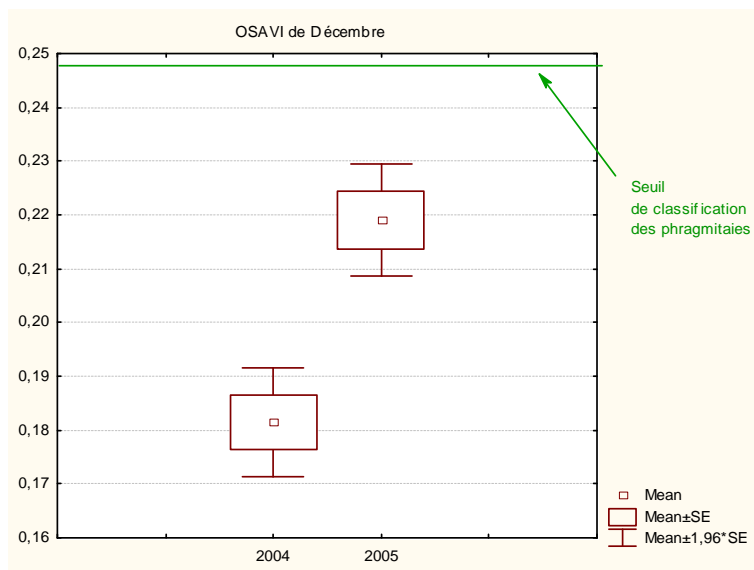


Figure 31 : Comparaison de la variable  $OSAVI2$  calculée pour les années 2004 et 2005 à partir des données de radiométrie des échantillons de phragmitaies ( $t=-9.08$ ,  $p=0$ )

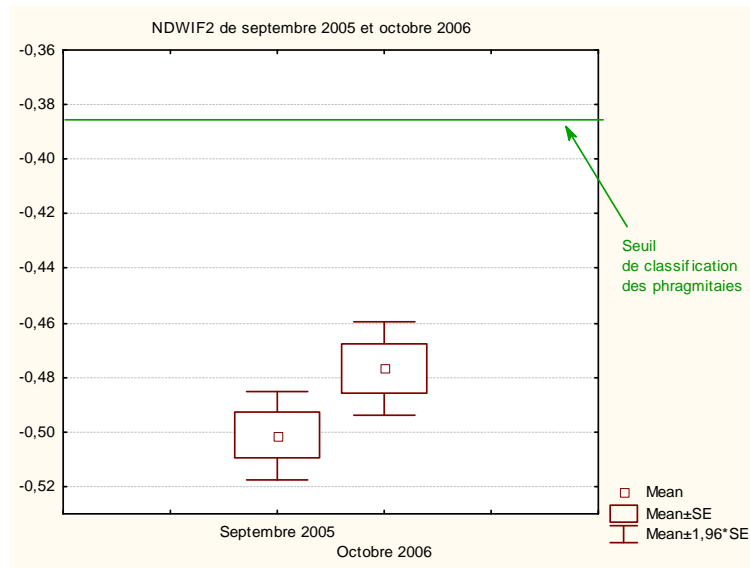


Figure 32 : Comparaison de la variable NDWIF209 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons de phragmitaies ( $t=-2.77$ ,  $p=0.01$ )

- **La classification des herbiers**

Les variables retenues pour l'identification des herbiers sont le MIR de décembre (noté c412), l'indice NDWIF1 de septembre (noté NDWIF109), la bande B2 de septembre (notée C209) et l'indice SR de mars (noté SR03). L'arbre optimal (Figure 33) se compose de deux branches et de trois niveaux. Les herbiers sont codés 2 tandis que les « non-sites » (ou « non-herbiers ») sont codés 1.

Le premier niveau permet d'isoler 594 des 693 « non-sites» et un site d'herbier qui présentent une valeur de réflectance supérieure ou égale à 0.05355 dans la bande MIR de décembre (noté c4). Sur les 99 « non-sites » restants, le deuxième niveau de la branche droite permet d'isoler les 24 sites d'herbiers de 73 non-sites sur le critère d'une valeur de l'indice NDWIF1 de septembre strictement inférieure à 0.2466, puis de 16 autres non-sites qui ont une réflectance supérieure ou égale à 0.07147 dans la bande B2 de septembre (noté c2). Il reste 10 non-sites classifiés comme herbiers dans cette branche. Dans la branche de gauche, le site d'herbier restant est séparé de 585 non-sites grâce à sa valeur supérieure ou égale à 0.9827 de l'indice SR en mars. Neuf non-sites font également partie de cette dernière feuille de l'arbre.

La formule permettant de classer les herbiers est donc la suivante :

**Présence d'herbiers = (c412 < 0.05355 et NDWIF109 < 0.2466 et c209 < 0.07147) ou (C412 ≥ 0.05355 et SR03 ≥ 0.9827)**



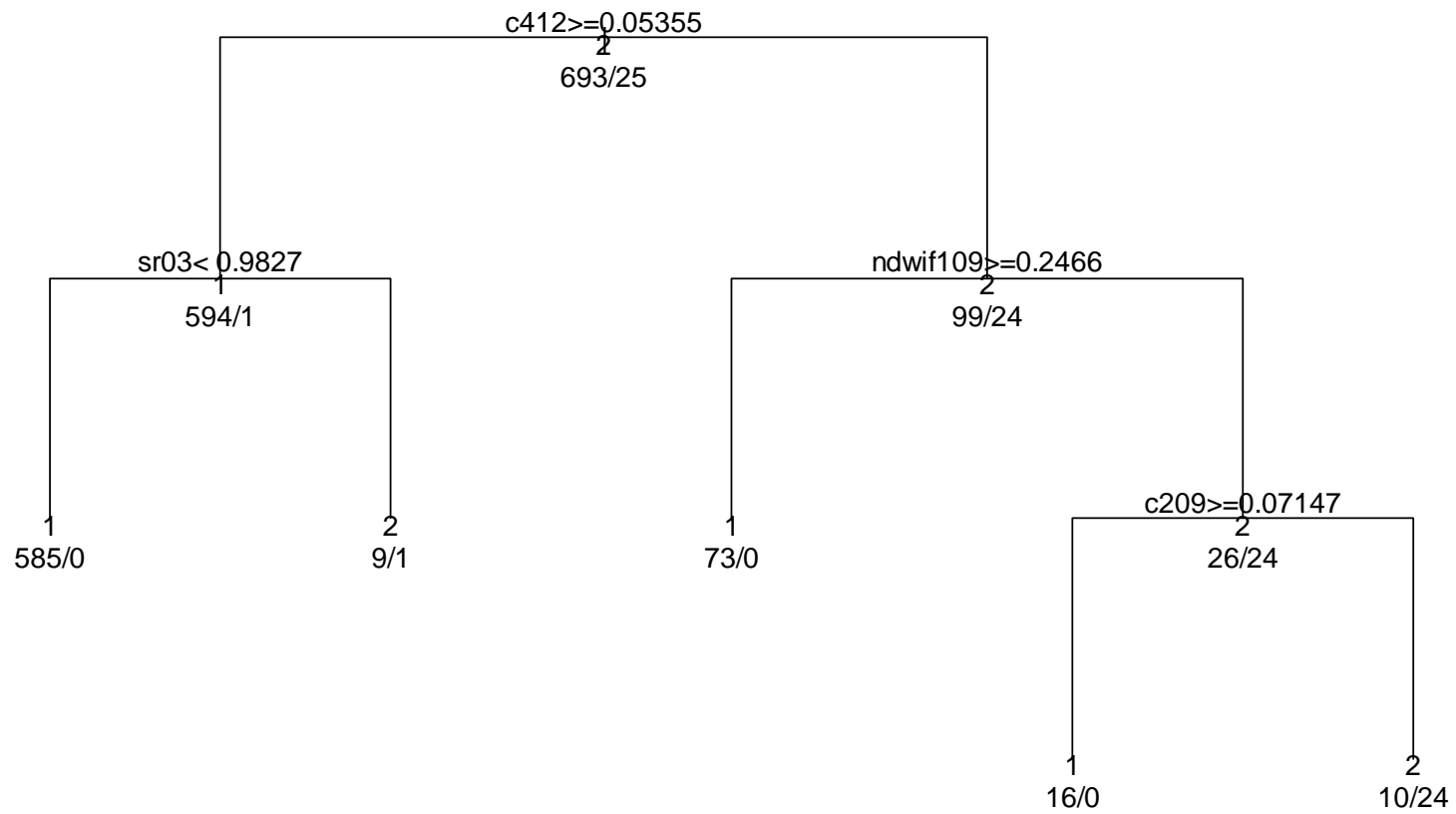


Figure 33 : Arbre optimal pour la classification des herbiers

Le test t de Student réalisé sur l'ensemble des variables sélectionnées pour les herbiers montre l'intérêt des valeurs seuil définies grâce à Rpart pour leur classification en 2005 et en 2006 (Figures 34 à 37).

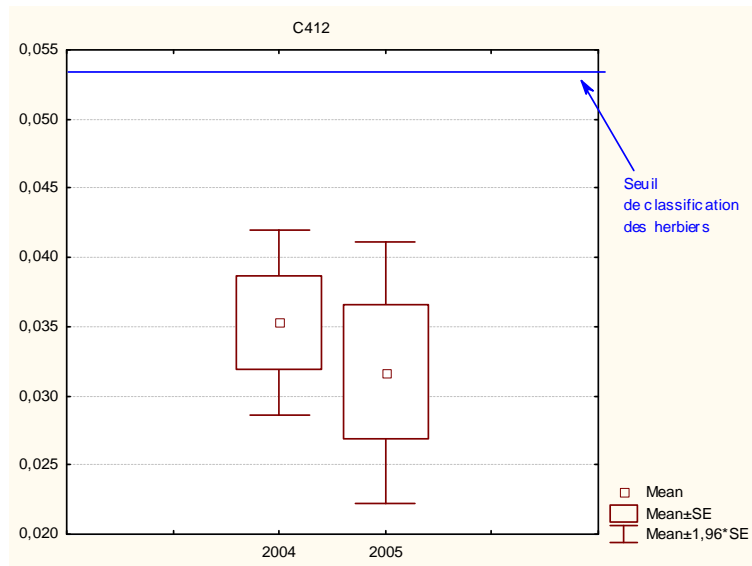


Figure 34 : Comparaison de la variable c412 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons d'herbiers aquatiques des marais permanents typiques de domaines privés ( $t=1.06$ ,  $p=0.3$ )

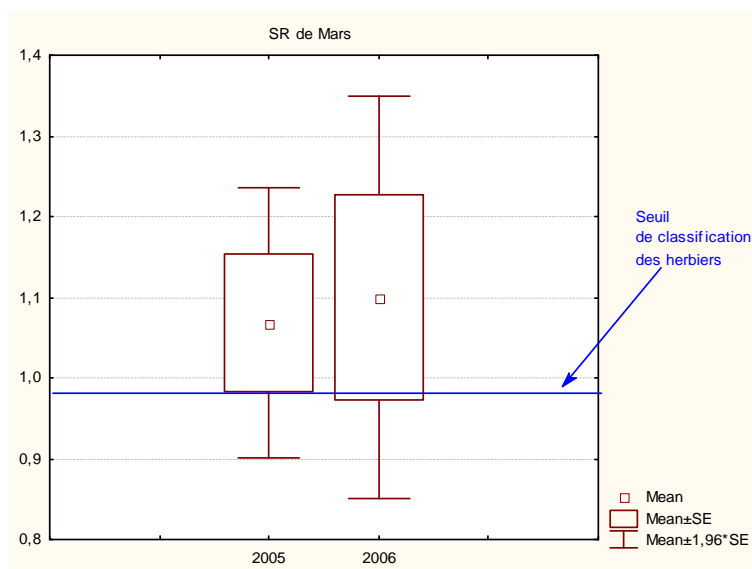


Figure 35 : Comparaison de la variable SR03 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons d'herbiers aquatiques des marais permanents typiques de domaines privés ( $t=-0.26$ ,  $p=0.8$ )

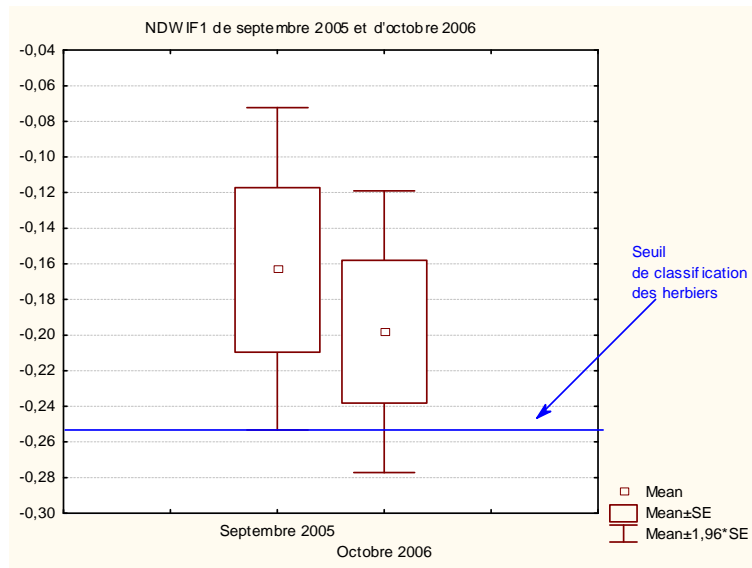


Figure 36 : Comparaison de la variable NDWIF1 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons d'herbiers aquatiques des marais permanents typiques de domaines privés ( $t=0.99$ ,  $p=0.33$ )

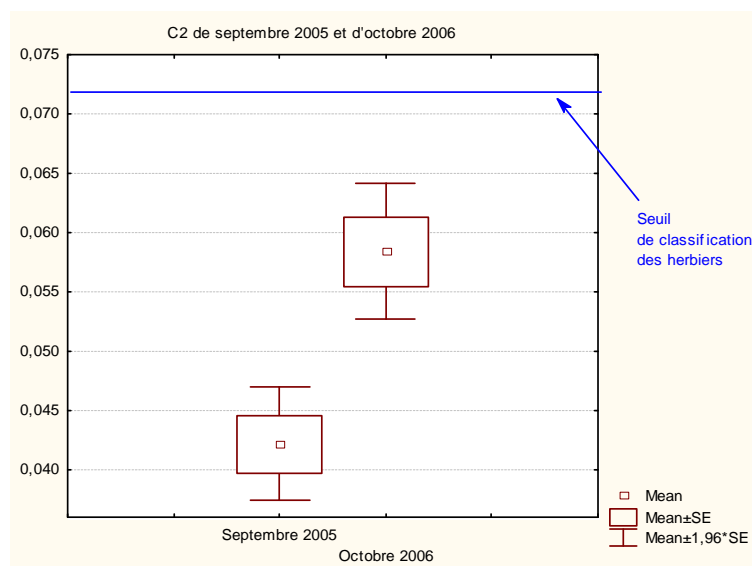


Figure 37 : Comparaison de la variable c209 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons d'herbiers aquatiques des marais permanents typiques de domaines privés ( $t=-5.76$ ,  $p=0$ )

- **La classification des scirpaies**

Les variables sélectionnées pour l'identification des scirpaies sont la différence entre la bande B3 de juin et septembre (notée c30609), la bande B1 de mai (noté c105), la différence entre le canal vert (B1) de décembre et de septembre (noté c11209), la bande B1 de septembre

(notée c109), la différence du MIR entre décembre et juin (notée c41206) et la bande B1 de décembre (notée c112) (Figure 38)

Sur les 709 non-sites et les 9 sites de scirpaies au total, le premier niveau de l'arbre crée deux branches au seuil 0.1175 de la variable c30609. L'une (à droite, valeurs de réflectance de c30609 supérieures ou égales à 0.1175) comprend 5 sites de scirpaies et 7 non-sites. L'autre (à gauche, valeurs de réflectances de c30609 strictement inférieures à 0.1175) regroupe les 4 sites de scirpaies et les 702 non-sites restants. Dans la branche de droite, les 5 sites de scirpaies sont ensuite différenciés des 7 non-sites grâce au seuil 0.0656 de la bande B1 de mai. Dans la branche de gauche, un deuxième niveau permet de séparer à droite pour les valeurs de c11209 supérieures ou égales à 0.06905 un groupe composé d'un site de scirpaie et d'un non-site. Ce groupe est ensuite différencié grâce à la bande B1 de décembre pour laquelle la valeur inférieure ou égale au seuil 0.1139 correspond à une scirpaie. La branche de gauche issue du nœud correspondant à la variable c11209 permet de différencier les trois sites de scirpaies restants. A l'issue de cette branche, les scirpaies sont caractérisées par une réflectance inférieure à 0.03971 pour la bande 1 de septembre, supérieure ou égale à 0.005957 pour la variable c41206 et supérieure ou égale à 0.03689 pour la bande 1 de décembre.

Ainsi la formule permettant de classifier les scirpaies est :

<b>Présence de scirpaies = <math>(c30609 \geq 0.1175 \text{ et } c105 &lt; 0.0656)</math> ou <math>(c30609 &lt; 0.1175 \text{ et } ((c11209 \geq 0.06905 \text{ et } c112 &lt; 0.1139)</math> ou <math>(c11209 &lt; 0.06905 \text{ et } c109 &lt; 0.03971 \text{ et } c41206 \geq 0.005957 \text{ et } c112 \geq 0.03689)))</math></b>
--

Le test t de Student réalisé sur l'ensemble des variables sélectionnées pour les scirpaies montre l'intérêt des valeurs seuil définies grâce à Rpart pour la classification en 2005 et l'impossibilité de classifier les scirpaies à partir de cette formule en 2006 notamment avec la contrainte de l'utilisation d'une image d'octobre. La valeur seuil de la bande B1 de décembre, dernière feuille de la branche gauche de l'arbre, ne permet pas de différencier le dernier « non-site » des trois sites de scirpaies restants en 2006 (Figures 39 à 44).

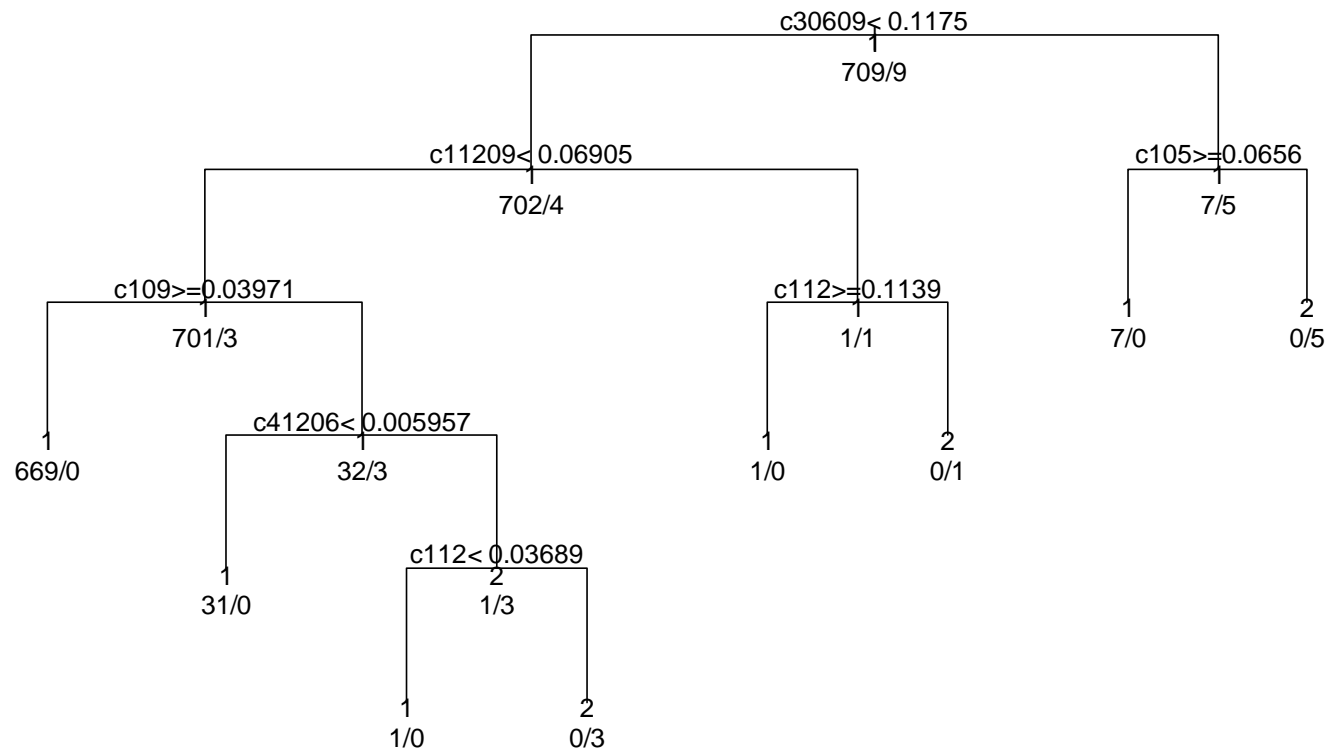


Figure 38 : Arbre optimal pour la classification des scirpaies

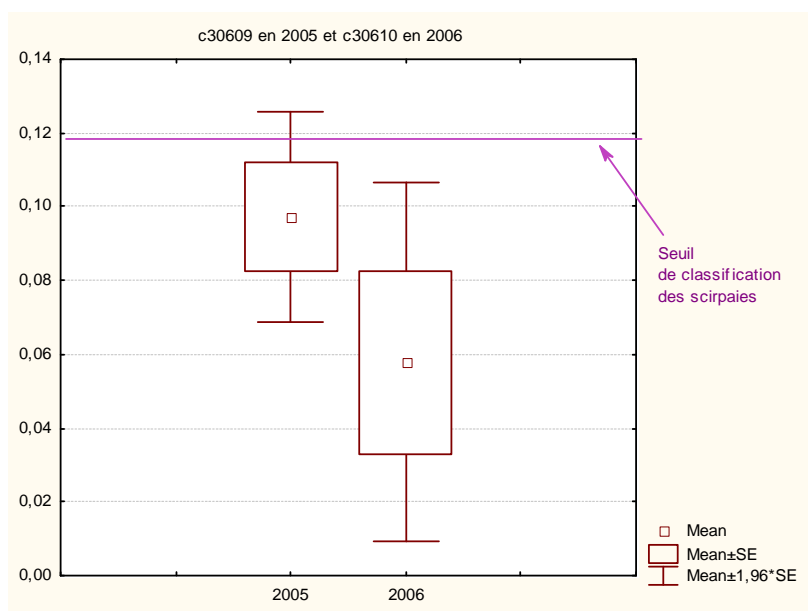


Figure 39 : Comparaison de la variable c30609 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons de scirpaies ( $t=1.47$ ,  $p=0.18$ )

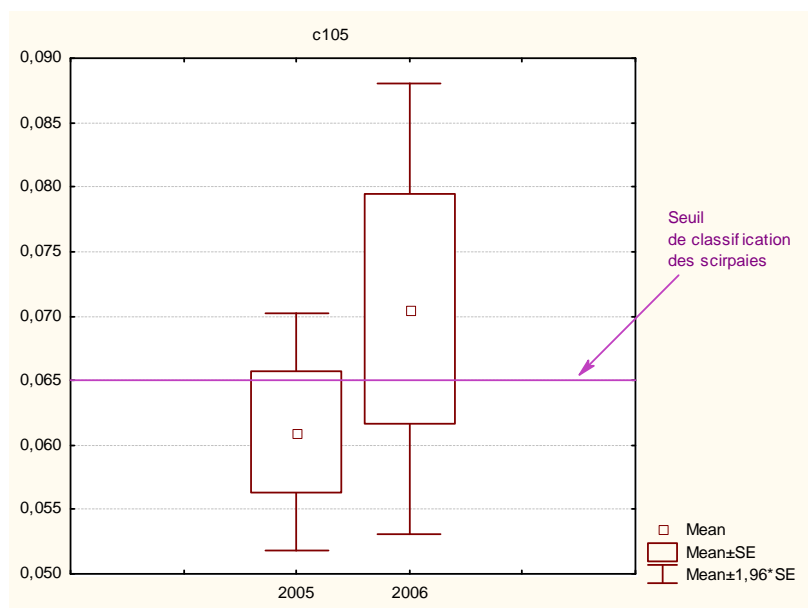


Figure 40 : Comparaison de la variable c105 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons de scirpaies ( $t=-1.30$ ,  $p=0.23$ )

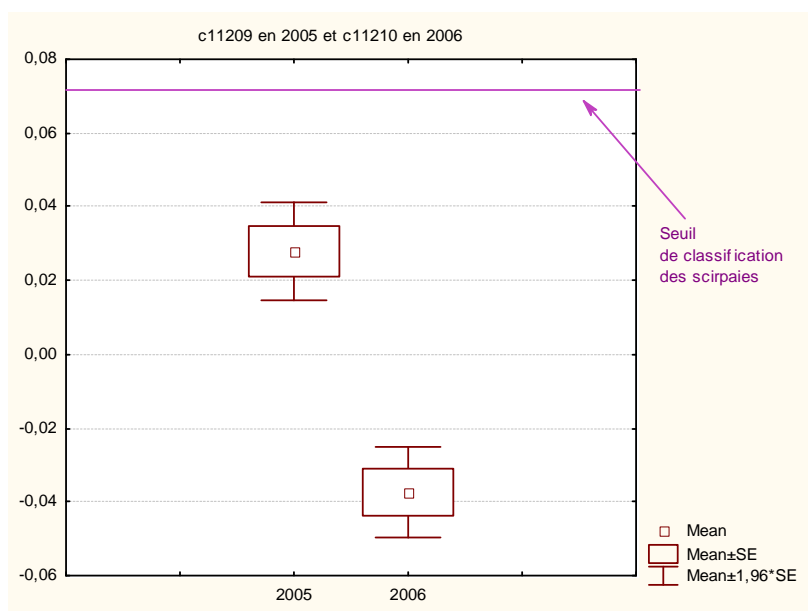


Figure 41 : Comparaison de la variable c11209 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons de scirpaies ( $t=7.32$ ,  $p=0$ )

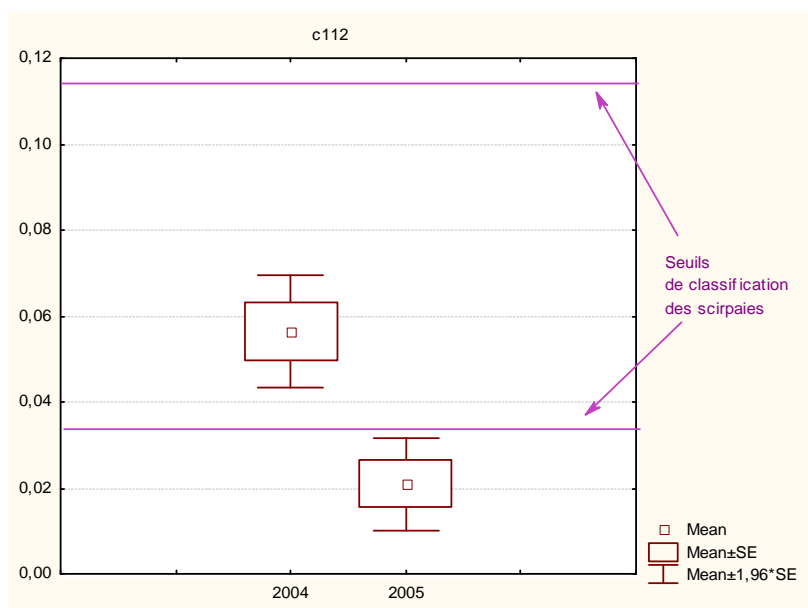


Figure 42 : Comparaison de la variable c112 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons de scirpaies ( $t=5.69$ ,  $p=0$ )

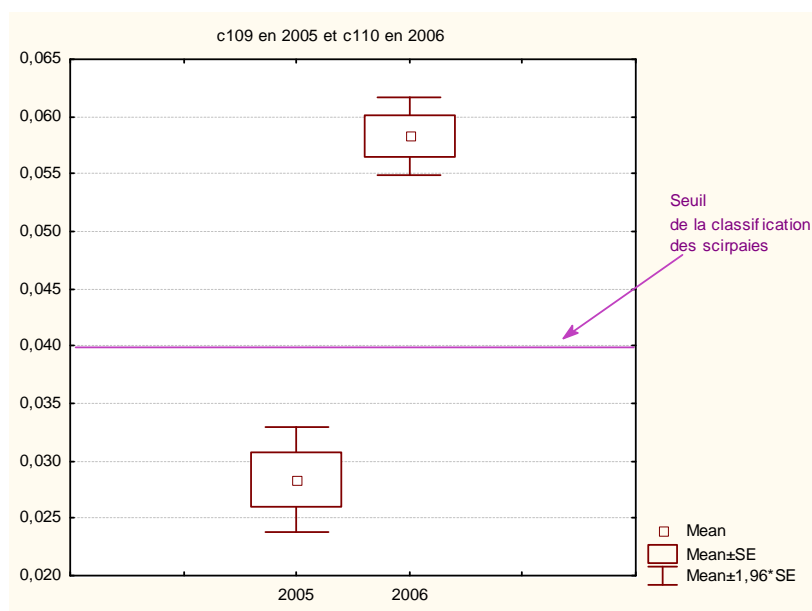


Figure 43 : Comparaison de la variable c109 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons de scirpaies ( $t=-8.46$ ,  $p=0$ )

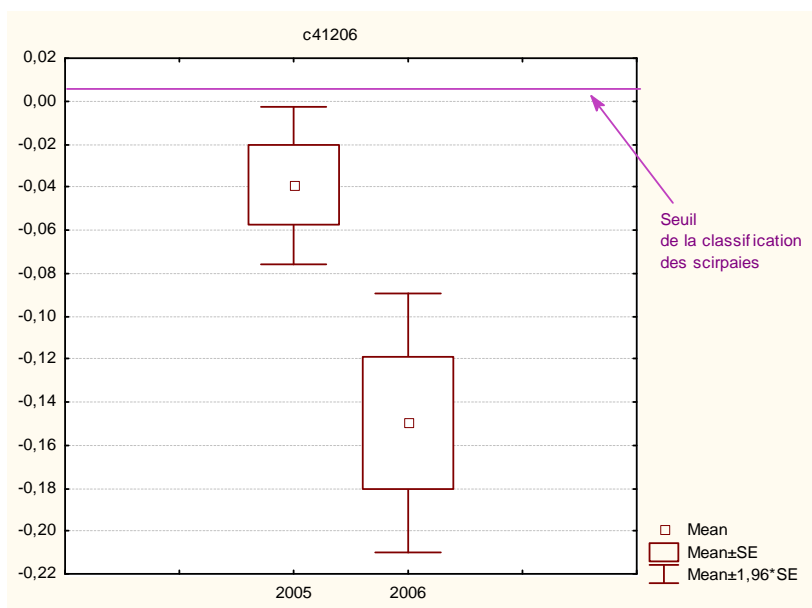


Figure 44 : Comparaison de la variable c41206 calculée pour les années 2005 et 2006 à partir des données de radiométrie des échantillons de scirpaies ( $t=2.85$ ,  $p=0.02$ )



### c - Précision des classifications

L'estimation de la précision de la classification a été effectuée à partir de l'échantillonnage de validation totalement indépendant réalisé sur le terrain en 2006. Une extraction des valeurs de présence/absence (1/0) sur les cartes résultats de 2005 et de 2006 a été effectuée à partir d'une numérisation de cet échantillon basée sur les relevés GPS. La nomenclature générale comprend les « sites » et les « non-sites ». Ces derniers ont ensuite été détaillés selon les types d'occupation du sol suivants : mer, tamaris, herbiers aquatiques, phragmitaies, ripisylves, cladaïes, jonchaies, pelouses, dunes et plages, salins, sansouïres ou sols nus, habitations, scirpaies, boisement, milieu agricole.

- **Les phragmitaies**

La phase d'apprentissage montre que l'arbre optimal obtenu pour les phragmitaies permet de classer correctement 98,7 % du nombre total de sites de l'échantillon d'entraînement élaboré en 2005.

La validation réalisée grâce à l'application de la formule de classification des phragmitaies sur les images de l'année 2005 (Figure 45) et l'extraction des valeurs des pixels de l'échantillon de validation indépendant élaboré en 2006, offre une précision totale de **91,9** % avec une erreur de déficit de 16,7% sur les phragmitaies et de 1,4 % sur les non-phragmitaies. De même à l'aide de cet échantillon indépendant, la validation sur l'année 2006 (Figure 46) indique que la précision totale est de **92,6** % avec une erreur de déficit de 13,3 % pour les phragmitaies et de 1,5% pour les non-phragmitaies.

Les phragmitaies sont le plus confondues avec les tamaris (Tableau 7 et 8). Des visites *a posteriori* en 2007 ont montré que certains polygones de la classe « Tamaris » contenaient un mélange avec des jeunes pousses de phragmitaies, de scirpe maritime ou littoral, et/ou d'herbiers (Duborper, communication orale, 2007).

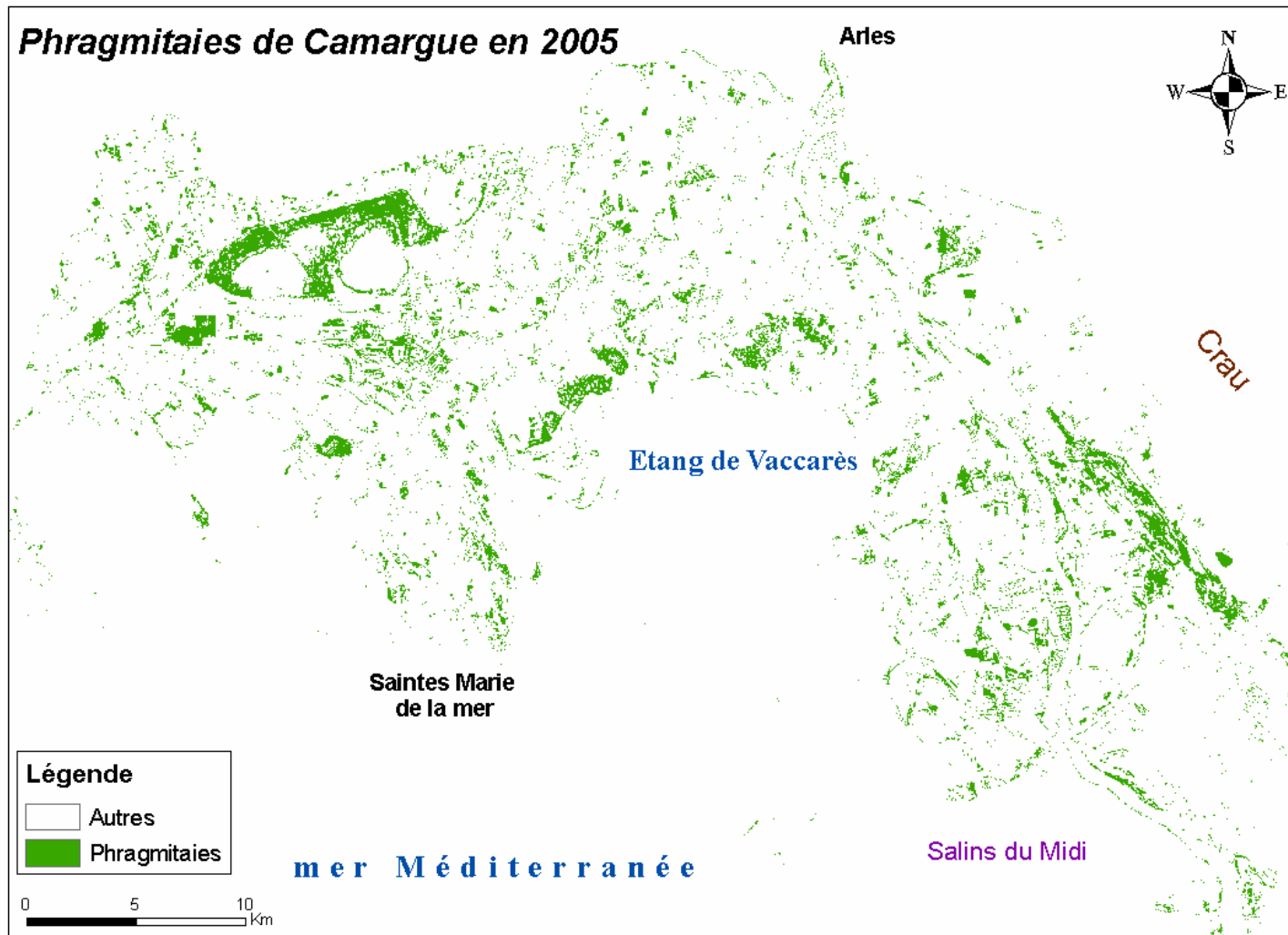


Figure 45 : Cartographie des phragmitaies de Camargue en 2005 obtenue par application de la formule de classification de la présence de phragmitaies aux images satellitales de l'année 2005.

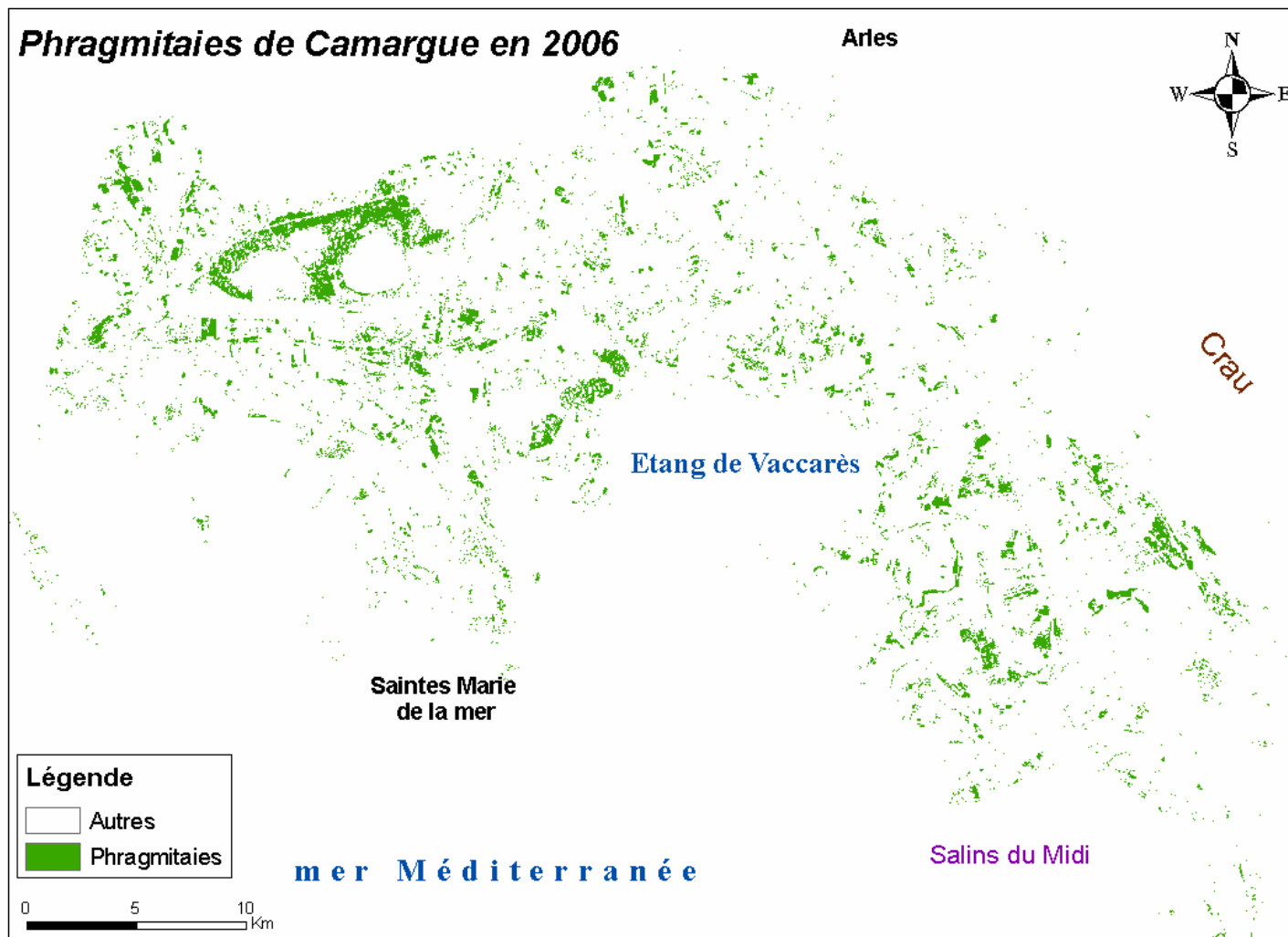


Figure 46 : Cartographie des phragmitaies de Camargue en 2006 obtenue par application de la formule de classification de la présence de phragmitaies aux images satellitales de l'année 2006 avec utilisation d'une image d'octobre en remplacement de l' image de septembre.

Tableau 7 : Erreur de déficit en pourcentage des différentes catégories composant les 1.4 % d'erreur de déficit de la classe « non-phragmitaies » pour l'année 2005

Catégories	Erreur de déficit (en %)
<b>Mer</b>	0,0
<b>Tamaris</b>	18,8
<b>Herbiers</b>	0,0
<b>Ripisylve</b>	8,8
<b>Cladiaies</b>	0,0
<b>Jonchaies</b>	0,5
<b>Pelouses</b>	0,7
<b>Dunes et plages</b>	0,1
<b>Salins</b>	0,0
<b>Sansouïres</b>	1,5
<b>Habitations</b>	4,5
<b>Scirpaies</b>	0,0
<b>Boisement</b>	1,0
<b>Agricole</b>	3,1

Tableau 8 : Erreur de déficit en pourcentage des différentes catégories composant les 1.5 % d'erreur de déficit de la classe « non-phragmitaies » pour l'année 2006

Catégories	Erreur de déficit
<b>Mer</b>	0,0
<b>Tamaris</b>	16,1
<b>Herbiers</b>	0,0
<b>Ripisylve</b>	1,7
<b>Cladiaies</b>	17,2
<b>Jonchaies</b>	1,4
<b>Pelouse</b>	0,2
<b>Dunes et plages</b>	0,0
<b>Salins</b>	0,0
<b>Sansouïres</b>	2,8
<b>Habitations</b>	3,8
<b>Scirpaies</b>	33,3
<b>Boisements</b>	0,4
<b>Agricole</b>	4,6

A noter que le pourcentage de mauvaise classification des scirpaies apparaît seulement sur la classification de 2006. En effet en 2005, ce pourcentage est égal à 0 tandis qu'en 2006 il est de 33 %. La seule variable pour laquelle le seuil est dépassé en 2006 pour les scirpaies est l'indice NDWIF2 du mois de septembre, calculé en 2006 avec le mois d'octobre (Figure 47). La valeur du NDWIF2 doit être strictement inférieure à -0.3834 mais calculé avec l'image

d'octobre l'intervalle de confiance des valeurs de cette variable est proche de -0.45 pour les scirpaies.

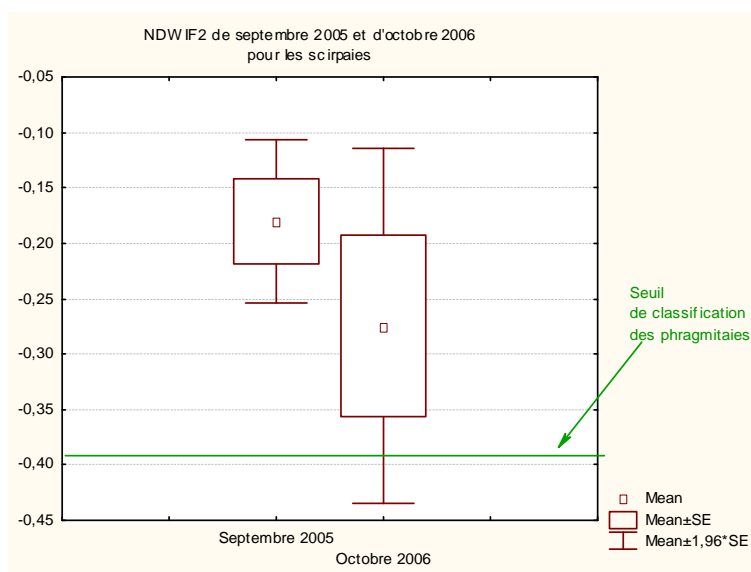


Figure 47 : L'intervalle de confiance du NDWIF2 calculé avec l'image d'octobre pour les scirpaies dépasse le seuil nécessaire à la différentiation des phragmitaies ( $t=1.21$ ,  $p=0.26$ )

En 2006, le détail du milieu agricole apporté par la mise à jour de la cartographie du PNRC apporte des précisions sur le pourcentage de mauvaise classification des différents types de cultures (Tableau 9).

Tableau 9 : Erreur de déficit en pourcentage des différents types de cultures recensées en 2006 par la cartographie du PNRC.

Catégorie	Erreur de déficit
Riz	5,3
Tournesol	22,8
Blé	2,8
Vergers	0,0
Colza	0,0
Vignes	8,1
Cultures maraîchères	3,3
Friches	0,0
Maïs	0,0
Terre	2,4
Prés	0,0

Cependant ces résultats sont à considérer avec prudence car ils sont obtenus avec des variables calculées à partir des images du mois d'octobre en remplacement de septembre. Nous n'avons pas le détail des cultures en 2005, il n'est donc pas possible de comparer les

variables sélectionnées pour chaque type de cultures entre les deux années. Ainsi, d'après ces résultats, le type de culture pouvant être le plus confondu avec des phragmitaies serait le tournesol. Des vérifications sur le terrain en 2007 ont montré que le phragmite se développe sur les bordures des parcelles agricoles, dans les fossés et sur les talus. En Camargue, la majorité des vignes a également la particularité de présenter aux pieds des ceps un certain recouvrement de petits phragmites, les entre-rangs étant labourés sans addition d'herbicide (Duborper, communication orale, 2007).

Le test par modèle linéaire généralisé en régression logistique a montré que ni la proportion de trouée<sup>14</sup>, ni la hauteur des tiges vertes, ni les densités de tiges vertes ou de tiges sèches, ni le rapport du nombre de tiges sèches sur le nombre de tiges vertes, ni même le pourcentage de recouvrement de roseaux, d'autres émergentes (estimation avec CANEYE et visuellement) ou d'herbiers (estimation visuelle) présents sur le site au moment de l'échantillonnage ne permet d'expliquer les erreurs de classification.

Cette classification des phragmitaies permet d'estimer leur superficie totale sur la zone d'étude à 9200 hectares.

- **Les herbiers**

La phase d'apprentissage montre que l'arbre optimal obtenu pour les herbiers aquatiques caractéristiques des marais ouverts permanents des domaines privés de chasse permet de classer correctement 97,4% du nombre total de sites de l'échantillon d'entraînement élaboré en 2005.

La validation réalisée grâce à l'application de la formule de classification des herbiers sur les images de l'année 2005 (Figure 48) et l'extraction des valeurs des pixels de l'échantillon de validation indépendant élaboré en 2006, offre une précision totale de **88,3 %** avec une erreur de déficit de 10,1% sur les herbiers aquatiques des marais privés et de 13,3 % sur les non-herbiers. De même, à l'aide de l'échantillon indépendant, la validation sur l'année 2006 (Figure 49), indique que la précision totale est de **84,9 %** avec une erreur de déficit de 16,2 % pour les herbiers et de 14,1% pour les non-herbiers.

Les herbiers des marais permanents ou semi-permanents sont fortement confondus avec les scirpaies et les salins (Tableaux 10 et 11). Une confusion plus importante apparaît en 2006 avec la ripisylve. L'utilisation d'octobre à la place de septembre n'explique pas cette confusion. Des visites *a posteriori* sur le terrain en 2007 ont cependant montré que certains polygones de la classe ripisylve montraient une imprécision sur la numérisation (Duborper, communication orale, 2007). Ainsi certains polygones ont été numérisés en intégrant les premiers mètres des bords du Rhône où un développement d'herbiers est susceptible d'apparaître. Cependant la carte montre un fort développement d'herbiers dans le Rhône qui semble peu probable. La confusion avec les tamaris peut également venir du mélange avec des scirpaies et des herbiers en bordure de marais dû à l'imprécision de la numérisation.

*Tableau 10 : Erreur de déficit des différentes catégories composant les 13.3 % d'erreur de déficit de la classe « non-herbiers » pour la cartographie 2005*

<b>Catégories</b>	<b>Erreur de déficit</b>
<b>Mer</b>	0,0
<b>Tamaris</b>	1,0
<b>Phragmitaies</b>	0,0
<b>Ripisylve</b>	0,4
<b>Cladiaies</b>	0,0
<b>Jonchaies</b>	0,8
<b>Pelouses</b>	0,1
<b>Dunes et plages</b>	2,5
<b>Salins</b>	26,4
<b>Sansouïres</b>	5,3
<b>Habitations</b>	0,0
<b>Scirpaies</b>	44,4
<b>Boisement</b>	1,4
<b>Agricole</b>	0,0

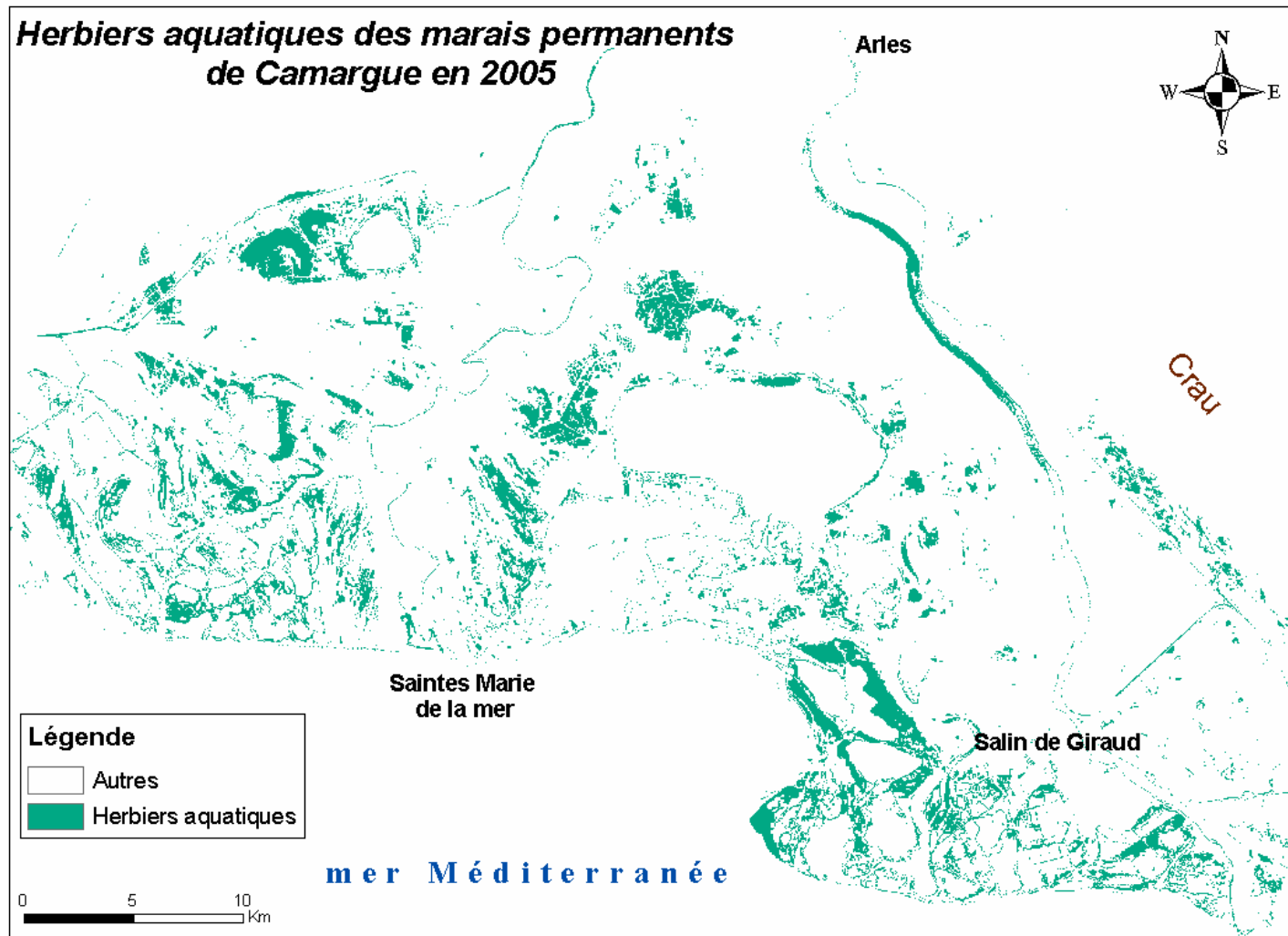


Figure 48 : Cartographie des herbiers typiques des marais de domaines privés de Camargue en 2005 obtenue par application de la formule de classification de la présence d'herbiers aux images satellitales de l'année 2005.



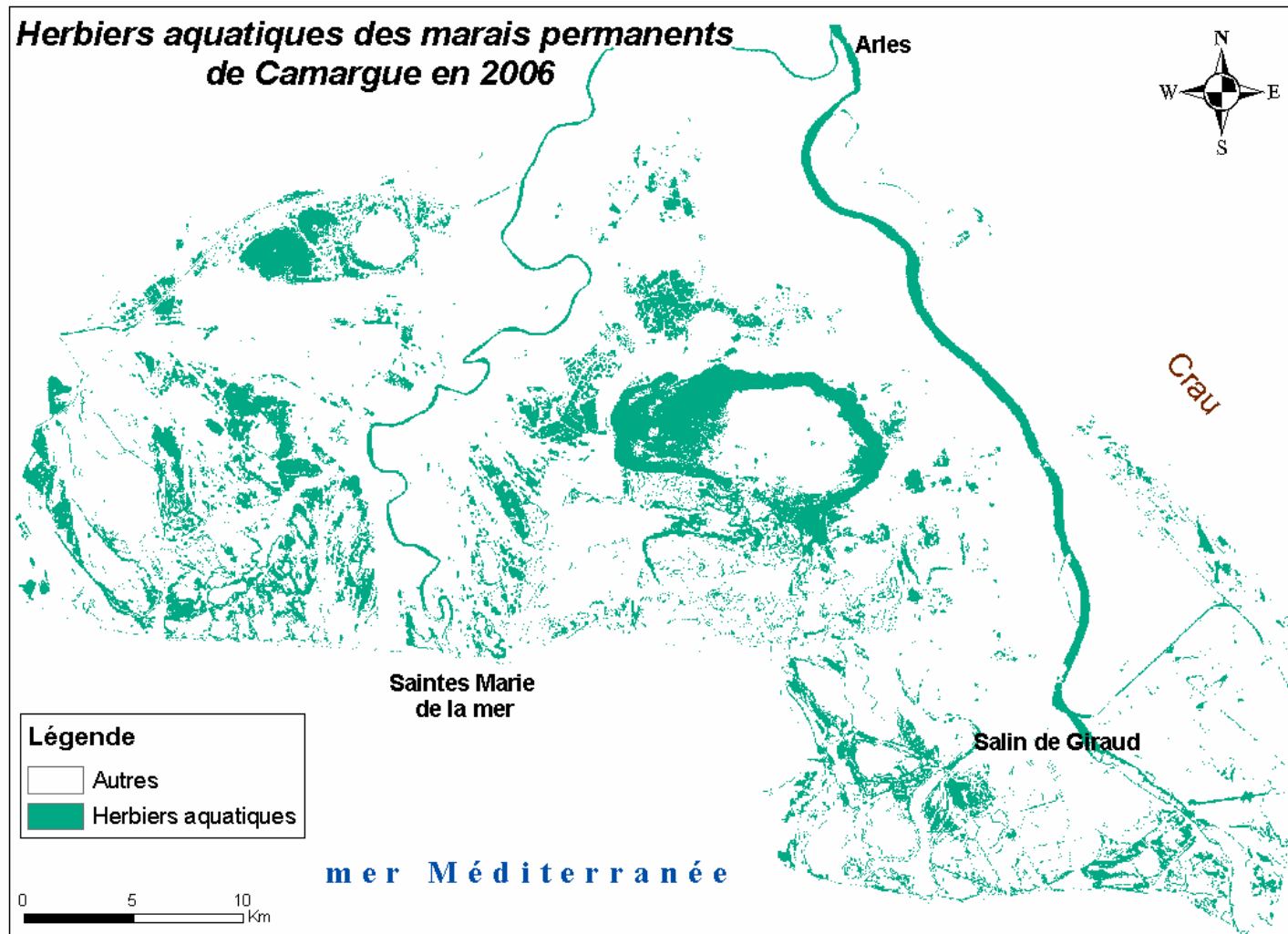


Figure 49 : Cartographie des herbiers typiques des marais de domaines privés de Camargue en 2006 obtenue par application de la formule de classification de la présence des herbiers aux images satellitales de l'année 2006 avec utilisation d'une image d'octobre en remplacement de l'image de septembre.

Tableau 11 : Erreur de déficit des différentes catégories composant les 14.1% d'erreur de déficit de la classe « non-herbiers » pour la cartographie 2006

Catégories	Erreur de déficit
<b>Mer</b>	0,1
<b>Tamaris</b>	9,1
<b>Phragmitaies</b>	0,0
<b>Ripisylve</b>	6,9
<b>Cladiaies</b>	0,0
<b>Jonchaies</b>	2,1
<b>Pelouses</b>	0,3
<b>Dunes et plages</b>	1,1
<b>Salins</b>	24,1
<b>Sansouïres</b>	13,0
<b>Habitations</b>	0,0
<b>Scirpaies</b>	77,8
<b>Boisements</b>	2,9
<b>Agricole</b>	0,0

Le test par modèle linéaire généralisé en régression logistique a montré que ni la mesure de la tranche d'eau, ni la turbidité, ni le niveau d'eau, ni la proportion de sol, ni le pourcentage de recouvrement des espèces submergées ou émergentes, ni le pourcentage d'affleurement des herbiers ne permet d'expliquer les erreurs de classification. A noter qu'il est normal que le pourcentage de recouvrement des espèces submergées ne soit pas significatif puisque les sites échantillonnés ont été sélectionnés pour être caractéristiques des herbiers quasi mono-spécifiques, très denses des marais ouverts des domaines privés camarguais. Les estimations de leur recouvrement très élevé, varient donc peu d'un site à un autre. Il est probable que la turbidité ait eu un effet en fonction de la date. Dans les grands marais et étangs c'est un facteur dynamique car il est associé au vent.

Cette cartographie permet d'estimer la superficie totale couverte par les herbiers aquatiques typiques des marais permanents à semi-permanents à 11200 hectares.

- **Les scirpaies**

La phase d'apprentissage montre que l'arbre optimal obtenu pour les scirpaies permet de classer correctement 98,6% du nombre total de sites de l'échantillon d'entraînement élaboré en 2005.

La classification des scirpaies n'étant pas applicable en 2006 avec la formule obtenue en 2005, les résultats de la classification présentés ici sont donc seulement issus de la cartographie 2005 et estimés à l'aide de l'échantillon indépendant élaboré sur le terrain en 2006. La validation réalisée grâce à l'application de la formule de classification des scirpaies sur les images de l'année 2005 (Figure 50) et extraction des valeurs des pixels de l'échantillon de validation indépendant élaboré en 2006, offre une précision totale de **93 %** avec une erreur de déficit de 11,1% sur les scirpaies et de 3,4 % sur les non-scirpaies.

La confusion maximale avec une autre catégorie se fait avec une erreur de déficit de 8,6 % pour la sansouïre (Tableau 12). Cependant, la carte montre que les scirpaies sont également confondus avec des développements d'algues filamenteuses non échantillonnées mais observés en fin de saison estivale, dans certains marais permanents à herbiers aquatiques très denses. En début d'automne, ces algues prennent une couleur rouille (Annexe 8).

*Tableau 12 : Erreur de déficit des différentes catégories composant les 3.4 % d'erreur de déficit de la classe « non-scirpaies »*

<b>Catégories</b>	<b>Erreur de déficit (en %)</b>
<b>Mer</b>	0,0
<b>Tamaris</b>	2,9
<b>Herbiers</b>	5,1
<b>Phragmitaies</b>	0,0
<b>Ripisylve</b>	5,8
<b>Cladiaies</b>	4,3
<b>Jonchaies</b>	2,5
<b>Pelouse</b>	0,8
<b>Dunes et plages</b>	1,3
<b>Salins</b>	2,6
<b>Sansouïres</b>	8,6
<b>Urbains</b>	0,5
<b>Boisements</b>	0,5
<b>Agricole</b>	1,1

Cette classification permet d'estimer la superficie couverte par les scirpaies sur l'ensemble de la zone d'étude à 3500 hectares.

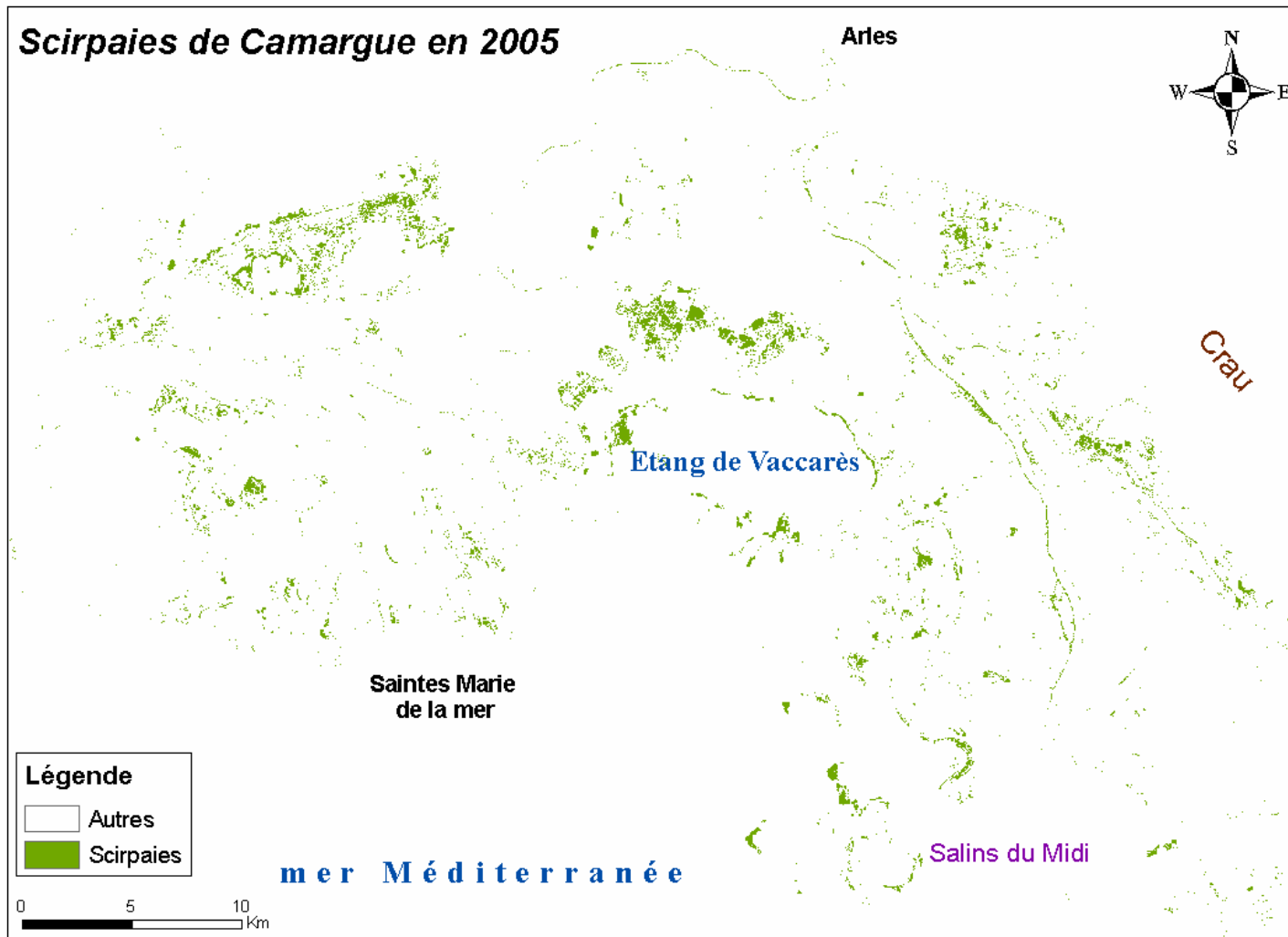


Figure 50 : Cartographie des scirpaies de Camargue en 2005 obtenue par application de la formule de classification de la présence de scirpaies aux images satellitales de l'année 2005