

## **Paramètres influençant les variations saisonnières de la réflectance des phragmitaies**

Le profil spectral des phragmitaies en hiver est caractéristique des tiges sèches de phragmites pendant cette saison. La réflectance croissante du visible vers l'infrarouge moyen est en effet typique d'un végétal sénescant (Girard et Girard, 1999). Des précédentes études au Canada (Maheu-Giroux et De Bois, 2005) ont utilisé une image acquise en début de printemps (fin avril) pour distinguer les populations de *Phragmites australis* des autres espèces qui apparaissent vertes tandis que les jeunes pousses de roseaux sont peu visibles sous la nécromasse de la précédente saison de croissance. Cette stratégie ne serait pas intéressante en Camargue puisque le développement des phragmitaies y est plus précoce. En effet, l'apparition des tiges vertes à partir de fin mars début avril modifie le profil spectral du roseau en celui d'un végétal à forte production de chlorophylle dès le printemps. La différence de radiométrie observée entre les deux années au mois de mai peut être expliquée par la forte pluie survenue peu avant l'acquisition de l'image en 2005 (Annexe 2), la présence d'une couche d'eau sur le sol pouvant abaisser les valeurs dans le proche infrarouge. Le roseau atteint son pic de croissance en juin et les réponses spectrales importantes dans les bandes 3 et 4 en juin, juillet et août sont donc liées à une forte production de biomasse chlorophyllienne du roseau en saison estivale (Caillaud et al., 1991 ; Valta-Hulkkonen et al., 2003). En début d'automne, la mise en eau des marais pour la chasse, combinée au développement des panicules, contribuent à réduire la réflectance dans le proche infrarouge. Caillaud et al. (1991) avaient également relevé une incidence des inflorescences sur la réponse spectrale de la plante en septembre. Pengra (2005) a utilisé une image en début d'automne pour la classification des phragmitaies en expliquant qu'en cette période les différences spectrales entre le phragmite et les autres espèces des zones humides sont les plus prononcées.

## **2 - Paramètres influençant les variations saisonnières de la réflectance des herbiers aquatiques**

Le signal de la colonne d'eau est un point important dans la cartographie des espèces submergées par télédétection<sup>13</sup>. Contrairement aux espèces terrestres, il n'y a presque pas de signal provenant de l'eau à des longueurs d'onde aux alentours de 680 nm, phénomène dû à l'absorption par l'eau pure (Kirk, 1994 cité par Pinnel, 2007).

Le profil spectral des herbiers à macrophytes submergées met en évidence les caractéristiques de ce type de communauté végétale dont la croissance en milieu aquatique s'échelonne selon les espèces, les conditions de salinité et les niveaux d'eau, du printemps à la saison estivale voire début de l'automne (Grillas, 1992 ; Bonis et al., 1993) avec une réponse plus ou moins atténuée par l'eau.

En début de période hivernale, le moyen infrarouge et le visible sont influencés par la présence importante d'eau alors que la végétation encore présente se traduit par un léger pic de réflectance dans le proche infrarouge. En fin de période hivernale, les herbiers ont diminués et deviennent sénescents, abaissant un peu les valeurs du proche infrarouge. Cela a notamment été observé par Pinnel (2006) sur *Potamogeton pectinatus* et *Chara contraria*, espèces également caractéristiques des herbiers aquatiques des marais permanents de Camargue (Grillas, 1992). L'augmentation du moyen infrarouge peut être la conséquence d'une eau troublée suite aux pluies et à la diminution des herbiers. En effet, nous avons observé que les espèces submergées ont tendance à diminuer la turbidité de l'eau en limitant la mise en mouvement des sédiments.

A partir du printemps et pendant toute la période estivale, le profil spectral des herbiers est typique d'un développement végétal dont la réflectance est atténuée par l'eau. La variation de la réflectance en mai 2005 met en évidence l'influence de la pluie précédant l'acquisition de l'image. En effet, le profil est comparable à celui de l'eau pure avec une diminution du vert vers l'infrarouge moyen (Annexe 1). Les espèces sont totalement submergées par une importante quantité d'eau ce qui atténue considérablement leur réponse déjà faible en cette période où les herbiers commencent à se développer (Grillas et Roché, 1997).

Enfin, la remise en eau des marais à l'automne pour la chasse entraîne une perturbation de la réflectance dans le visible et une diminution dans l'infrarouge moyen. Le profil reste caractéristique d'une végétation verte mais la réponse est atténuée par une tranche d'eau supérieure augmentée. Les gestionnaires de domaines de chasse ont remarqué que cette remise en eau peut avoir pour conséquence une nouvelle croissance d'herbiers dans les marais inondés en quasi permanence. On peut supposer que sous l'effet de l'augmentation de la tranche d'eau supérieure, les espèces submergées croissent jusqu'à la surface pour atteindre un rayonnement solaire moins atténué et disperser leurs graines. Les conditions climatiques en début d'automne restent favorables à ce développement végétal (Grillas et Roché, 1997). Il

semblerait que ce phénomène se répercute sur les valeurs de réflectance de l'ensemble des canaux d'octobre.

### **3 - Paramètres influençant les variations saisonnières de la réflectance des scirpaies**

Les scirpaies présentent l'inconvénient d'être particulièrement variables en terme de pourcentage de recouvrement, d'association avec d'autres types végétaux, d'espèces de scirpe développées et de pression de pâturage. Les scirpaies sont également peu nombreuses en Camargue, ce qui affaiblit le pouvoir statistique des analyses. La variation de la réflectance traduit assez bien ces faits. Les intervalles de confiance ont tendance à être beaucoup plus larges que pour les herbiers ou les phragmitaies et d'importantes différences apparaissent pour certains mois entre les deux années de suivi. Le recouvrement important des herbiers dans les scirpaies influence également leur réponse spectrale.

En hiver, la scirpaie est un milieu dominé par l'eau et les valeurs de réflectance ont tendance à être basses avec une petite élévation dans l'infrarouge certainement apportée par les herbiers restants et quelques feuilles de scirpes sèches. Caillaud et al. (1991) ont également noté l'importance de la nécromasse sur la réponse spectrale du scirpe en avril tandis qu'elle est principalement influencée par les jeunes pousses le mois suivant. En effet, le profil spectral du mois de mai est caractéristique d'une plante en pleine croissance avec un pic dans le proche infrarouge. La différence entre les deux années est due, comme pour les phragmitaies et les herbiers, à une pluviométrie abondante avant l'acquisition de l'image en 2005.

Le scirpe atteint son maximum de croissance selon les conditions météorologiques vers la mi-juin, en Camargue (F. Mesléard, communication orale, 2007). Il semble que le climat de la Camargue réduit sa période de croissance par rapport à celle observée dans les marais maritimes du centre-ouest français par Caillaud et al. (1991). La différence entre 2005 et 2006 met en évidence cette période de transition après laquelle les feuilles de scirpe s'assèchent et contribuent à augmenter les valeurs de réflectance pour se rapprocher de la courbe d'un végétal sénescant. L'assec estival nécessaire à la pérennisation des scirpaies (Mesléard et Pérennou, 1996) se ressent également par une augmentation des valeurs du proche infrarouge en juillet et août.

L'assèchement des feuilles de scirpe ainsi que la remise en eau de certains marais pour la chasse se traduit par un profil caractéristique des scirpaies en septembre. Caillaud et al (1991) ont également observé l'influence de la couleur rouille due à la prédominance de la carotène dans la plante desséchée sur sa réponse spectrale en septembre. Le développement des herbiers ainsi qu'une légère reprise du scirpe lui-même sur certains marais suite à la remise en eau contribue à augmenter la réflectance plus tard en saison automnale. On peut supposer que l'infrarouge reste toujours influencé par la présence majoritaire des feuilles sèches de scirpes.

#### **4 - Généralisation : paramètres influençant la réponse spectrale des développements d'espèces végétales dominantes de Camargue**

L'étude des variations saisonnières de la réflectance confirme qu'en Camargue, comme pour d'autres zones humides (Gao et Zhang, 2006), les communautés végétales dominantes présentent des caractéristiques spectrales saisonnières qui doivent permettre de les différencier. Cependant la gestion des niveaux d'eau influence également leur réponse spectrale. On observe par exemple des reprises de croissance suite à la mise en eau des marais pour la chasse et certaines espèces se dessèchent plus précocement que dans d'autres régions. Comme l'ont remarqué Gao et Zhang (2006), l'automne semble être une saison particulièrement intéressante pour la différenciation des communautés végétales des marais littoraux, mais l'ensemble des saisons doit permettre d'apporter une meilleure discrimination.

### **B - Les arbres de classification pour l'identification des habitats dominants de Camargue**

#### **1 - Intérêt des variables sélectionnées pour la classification des communautés végétales de Camargue**

L'un des avantages des arbres de classification est qu'ils offrent une possibilité de découverte de nouvelles connaissances par la sélection des variables et l'interprétation qualitative de l'information contenue dans la structure des données (Gomez-Chova et al., 2003). En observant les échantillons mal classés, les principales règles de décisions des arbres optimaux et en nous appuyant sur les particularités de notre zone d'études (voir Annexe 3), nous

présentons ici quelques hypothèses permettant d'expliquer la pertinence des variables sélectionnées par la méthode des arbres de classification comme étant les plus discriminantes des communautés végétales intéressant cette étude.

### **a - Les phragmitaies**

La différence entre la bande B3 de juin et de mars au premier niveau de l'arbre (Figure 68) met en évidence la différence entre la réponse d'un végétal vert en été et celle de la matière morte en hiver. Les phragmites présentent en effet une réflectance maximale dans le PIR en période de croissance en comparaison à d'autres espèces de macrophytes aquatiques comme la massette (*Typha sp*) ou le scirpe (Asad et al., 2000). Mars est plus intéressant que décembre dans ce cas, car toutes les tiges de roseau sont entièrement sèches. Au deuxième niveau, l'utilisation de l'indice OSAVI (Rondeaux et al., 1996) de décembre permet de mettre en évidence une structure homogène de la végétation. L'utilisation de décembre est ici plus judicieuse que celle de mars, car moins influencée par la coupe du roseau qui se déroule principalement entre janvier et avril.

Enfin, au troisième niveau, apparaît l'indice NDWIF2 de septembre qui permet d'isoler les zones de sol nu et de végétation qui prennent alors des valeurs inférieures ou égales à zéro du fait de la différence de réflectance entre le moyen infrarouge et le vert. En effet, les roseaux complètement développés en septembre ont tendance à cacher l'eau sous-jacente (Cf. III-C-3-c), produisant des valeurs fortement négatives par rapport aux zones moins denses en végétation où l'eau est visible. Le NDWIF2, qui utilise l'infrarouge moyen et le vert, apporte une différence de réflectance inférieure à celle du NDWIF1 (NDWI de Mc Feeters, 1996) basé sur le proche infrarouge, puisque le MIR a des valeurs plus faibles que le PIR pour la végétation. Les valeurs de l'infrarouge moyen de septembre présentent néanmoins un intervalle de confiance plus petit que les valeurs du proche infrarouge. Cela pourrait être expliqué par l'apparition légèrement asynchrone des panicules avec une sensibilité moindre de l'infrarouge moyen qui est lié au volume d'eau des feuilles plutôt qu'à leur teneur en chlorophylle (ici affectée par les panicules). Sur la base de ces observations, le NDWIF2 pourrait donc apporter une meilleure reproductibilité de la classification que le NDWIF1 dans notre cas.

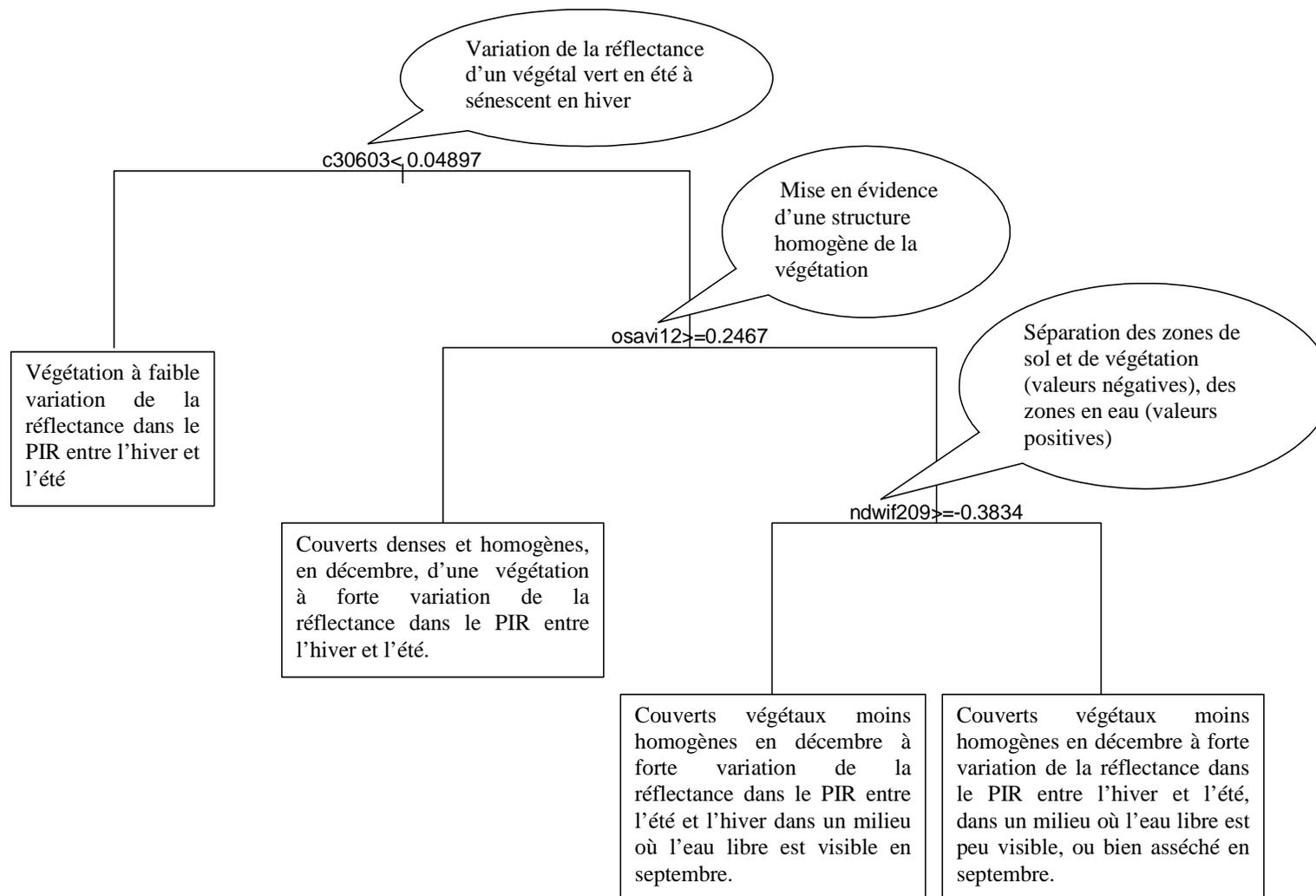


Figure 68 : Intérêt des variables sélectionnées pour la classification des phragmitaies

## **b - Les herbiers**

La principale particularité de ces développements végétaux est le milieu aquatique ; ainsi la variable descriptive sélectionnée pour le premier niveau de l'arbre (Figure 69) est le canal moyen infrarouge avec des valeurs faibles, ce qui permet de distinguer les zones inondées. En effet, l'eau claire a une valeur de réflectance proche de zéro dans le moyen infrarouge. La valeur de décembre est intéressante car les marais de chasse sont en eau.

La branche gauche de l'arbre contient un seul site d'herbier et est particulièrement intéressante. Parmi les sites qui ont fait l'objet d'une observation en 2004 et en 2005, il est le seul à avoir subi un changement complet de sa composition en espèces végétales. En 2004, il était composé majoritairement de potamot pectiné avec un fort pourcentage de recouvrement (aux environs de 80 %), alors qu'en 2005 le myriophylle devenait l'espèce dominante avec 50% de recouvrement. Ce changement suggère un adoucissement du marais, le potamot pouvant supporter un taux de salinité plus important que le myriophylle qui se développe typiquement en eau douce (Grillas, 1990). Cet adoucissement découle probablement d'une entrée d'eau via le Rhône ou de fortes précipitations en automne ou début d'hiver. Ces entrées troublent l'eau en général de façon plus ou moins importante selon la quantité de sédiments mis en mouvement. Il semble que cette turbidité soit apparue avant l'acquisition de l'image de décembre ce qui ne permet pas de classer cet herbier correctement avec le seuil du moyen infrarouge comme un site en eau. L'utilisation de l'indice SR (Pearson et Miller, 1972, cités par Bannari et al., 1995) confirmerait cette remarque puisqu'il peut être utilisé pour mettre en évidence le contraste entre le sol et la végétation (Bannari et al., 1995). En effet, ici ce sont les valeurs les plus importantes de cet indice qui sont sélectionnées ce qui indique que le canal rouge présente une réflectance élevée. Ceci est caractéristique de la réponse spectrale d'un sol (Annexe 1). L'herbier serait donc sélectionné ici parce qu'il se trouve dans un milieu aquatique très turbide dû à un mouvement d'eau abaissant la teneur en sel et apportant des conditions plus favorables au développement du myriophylle au printemps suivant. Les neuf autres sites appartenant à cette feuille sont des milieux où la part du sol dans la réponse spectrale est susceptible d'être plus importante. Ainsi cette branche, même si elle ne classifie qu'un seul herbier, permet de tenir compte des herbiers de marais en « mutation » pendant les saisons froides.

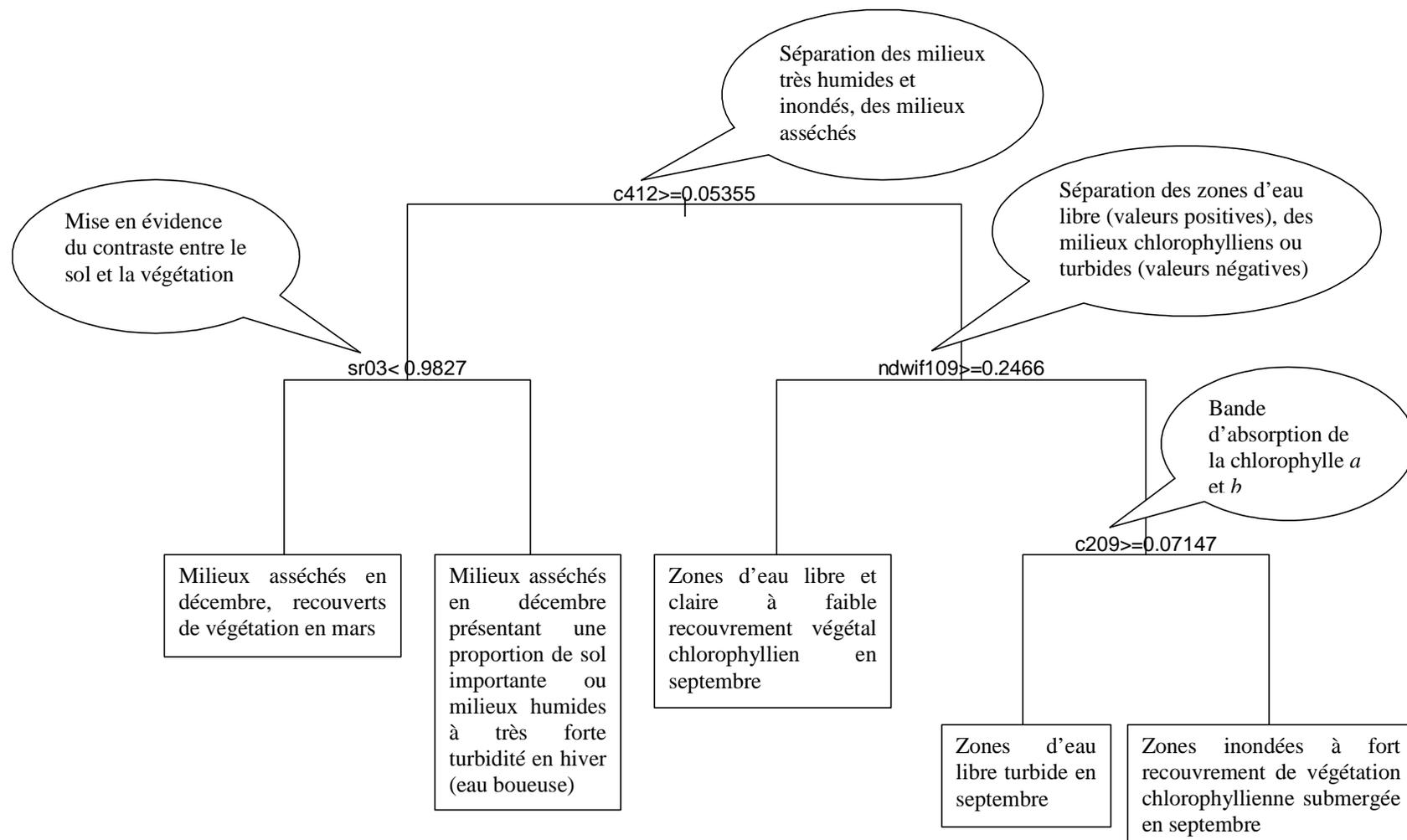


Figure 69 : Intérêt des variables sélectionnées pour la classification des herbiers aquatiques

L'autre branche (à droite) s'intéresse aux herbiers majoritaires caractéristiques de milieux constants. Parmi les milieux en eau en saison hivernale, les herbiers ont la particularité de subir une remise en eau avant la période de chasse qui débute en septembre. Ils représentent alors un milieu en eau libre où l'on perçoit une certaine teneur en chlorophylle. La chlorophylle *a*, qui peut être suivi à partir du NDWI de Mc Feeters (1996) mais non différenciée des particules sédimentaires en suspension, est en effet un des pigments les plus présents dans les espèces de la famille *Potamogetonacea* (Pinnel, 2007) qui représentent la majorité des espèces submergées des marais permanents à semi-permanents de Camargue (Grillas, 1992). Les valeurs les plus élevées du NDWIF1 sont séparées, isolant les milieux en eau libre sans végétation des milieux en eau avec présence de végétation et une possible turbidité due à la mise en mouvement des eaux. Le NDWIF1 est en effet incapable de différencier la chlorophylle *a* des sédiments en suspension. Cet indice permet également de combiner les informations des canaux vert et proche infrarouge respectivement liés à la variations de densité et de profondeur de submersion des herbiers aquatiques (Lieutaud et Puech, 1996).

Enfin, il reste 15 sites qui peuvent être classés comme « non-herbiers » grâce à la réflectance de la bande B2 du mois de septembre. Ce canal est lié à l'absorption par la chlorophylle et présente, pour les herbiers en septembre, un petit intervalle de confiance montrant une quasi constance des valeurs pour l'ensemble des sites échantillonnés. La combinaison avec le niveau supérieur occupé par le NDWIF1, permet d'appuyer la sélection des sites sur le critère de la teneur en chlorophylle *a*. Le NDWIF1 traduit l'ensemble chlorophylle *a* et matières en suspension et le canal vert de septembre renforce l'absorption pigmentaire. Les onze sites restants sont des scirpaies et des salins, soit deux types d'habitats présentant ou susceptibles de présenter des pourcentages de recouvrement en herbiers assez importants.

### **c - Les scirpaies**

La différence entre la bande 3 de juin et de septembre, permet de prendre en compte la croissance maximale et la sénescence des scirpes. Cet indice permet de séparer la majorité des sites de scirpaies homogènes et les plus denses (Figure 70). La bande 1 du mois de mai traduirait alors la réponse due à la pigmentation chlorophyllienne des feuilles de scirpe en pleine croissance.

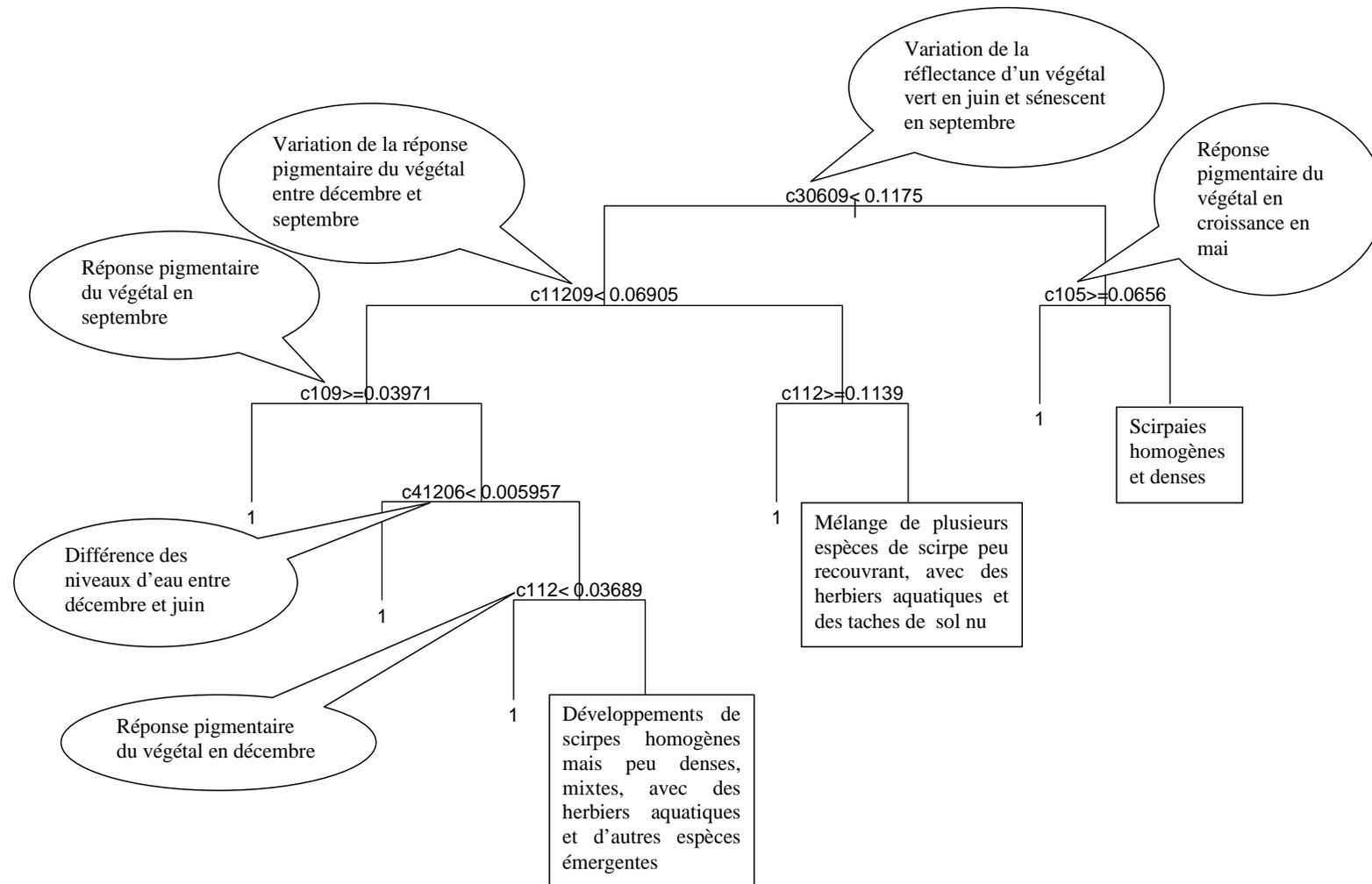


Figure 70 : Intérêt des variables sélectionnées pour la classification des scirpaies

Les quatre sites restants présentent certaines particularités. Le site isolé sur le troisième niveau de la deuxième branche de l'arbre est un site caractérisé par un faible recouvrement homogène en scirpe maritime (environ 20%) mélangés à des herbiers (35 %) et dont le sol reste apparent (à 45 %). En 2004, ce site présentait un plus fort recouvrement en herbiers (65%) pour le même recouvrement en scirpe. Ce site subit également une forte pression de pâturage ce qui accentue, par le piétinement, la proportion du sol.

Dans la dernière branche, les 3 sites de scirpaies restants, présentent des caractéristiques différentes. L'un est dominé par le scirpe littoral, un autre par le scirpe lacustre mélangé à du chiendent d'eau et le dernier combine du petit roseau avec du scirpe maritime et un important pourcentage d'herbiers. De façon générale, le scirpe a un faible pourcentage de recouvrement tout en présentant une répartition homogène sur la zone échantillonnée. Leur classification semble se faire majoritairement sur la réponse des pigments du végétal avec les bandes 1 de septembre et de décembre, périodes pendant lesquelles la majorité des espèces de scirpe est asséchée. La différence de quantité d'eau entre décembre et juin permet également de les identifier grâce à la réflectance dans l'infrarouge moyen, le scirpe ayant besoin d'un assec estival en condition de développement optimal (Mesléard et Perennou, 1996)

#### **d - Généralisation : intérêt de la combinaison de variables pour la discrimination des grandes communautés végétales de Camargue.**

Les variables sélectionnées pour la classification des communautés végétales dominantes de Camargue sont principalement des différences de canaux permettant de suivre la variabilité saisonnière des réponses spectrales en fonction de la phénologie<sup>3</sup> mais également des indices multispectraux qui permettent de prendre en compte l'influence de la mise en eau (anthropique ou naturelle) des marais. Plusieurs études portant sur le monitoring des zones humides ont utilisé des indices de végétation (Budd et Milton, 1982 ; Gross et al., 1987 ; Lee et Park, 1992 ; Mc Carthy et al., 1993 ; Raabe et Stumpf, 1996 cités par Ozesmi et al., 2002). Certaines études ont même conclu que l'utilisation d'indices pouvait parfois être plus efficace que les classifications traditionnelles (Johnston et Barson, 1993 cités par Ozesmi et al., 2002). L'intérêt de pouvoir combiner simplement l'effet de ces indices est donc particulièrement intéressant. Ceci est rendu possible grâce à l'utilisation des arbres de classification qui permettent d'intégrer un grand nombre de variables. En effet, l'utilisation des algorithmes tel

Rpart permet de s'affranchir de la présélection des variables nécessaire à la plupart des méthodes de classification. Rpart offre au contraire la possibilité de sélectionner les variables pertinentes en fonction du succès de la classification (Gomez-Chova et al., 2003) et confirme que la combinaison d'indices peut être plus efficace que l'utilisation des canaux seuls pour la discrimination des grandes communautés de Camargue. Il optimise ainsi la caractérisation de la réponse spectrale due à la phénologie<sup>3</sup> et à la variation des niveaux d'eau essentielles pour la cartographie des développements homogènes de la végétation typique des zones humides (Caillaud et al., 1991 ; Gao et Zhang, 2006 ; Pinnel, 2006).

## **2 - Précision et reproductibilité de la classification**

Les arbres de classification offrent une bonne précision lorsqu'ils sont utilisés avec des données de télédétection<sup>13</sup> (Mahesh et Mather, 2001). Dans ce domaine, les études portant sur la classification par arbre de décision ont été essentiellement basées sur l'utilisation d'images satellitaires de type Landsat sur une ou plusieurs dates, les études en multidates offrant de meilleurs résultats (Lees et Ritman, 1991 ; Friedl et al., 1999 ; Mc Iver et Friedl, 2001 ; Brown de Colstoun et al., 2003). Baker et al (2006) ont conclu qu'une cartographie présentant une précision totale de 86 % apporte un outil précieux à l'inventaire des milieux humides. Dans notre étude nous avons utilisé la classification par arbre de décision en renforçant la précision des données en entrée : résolution plus fine avec le satellite SPOT 5, précision de l'échantillonnage terrain, optimisation des données images par calcul d'indices intégrant des données en multidates. La combinaison de ces paramètres permet d'obtenir une précision variant de 85 à 93 %.

- **Classification des phragmitaies**

La difficulté de classification des phragmitaies réside généralement dans le mélange avec d'autres espèces végétales comme par exemple le typha (Maheux-Giroux, 2005 ; Pengra, 2005) ou des arbrisseaux (Ramesh et al., 2006). Les paramètres structuraux sont également une contrainte rencontrée pour la discrimination des phragmitaies. L'abondance des tiges peut être responsable d'une variation passablement considérable de la réflectance (Valta-Hulkkonen et al., 2003) et peut nécessiter la prise en compte de classe de densité dans l'estimation de la précision de la classification (Maheu-Giroux, 2005). Les régressions

logistiques réalisées sur les paramètres de biomasse et de structure relevés sur le terrain montrent que la méthodologie employée ici s'affranchit de ce type de limitations. D'autant que des vérifications sur le terrain *a posteriori* ont montré qu'une partie des erreurs de classification pouvait être la conséquence de la précision de l'échantillonnage due notamment à la numérisation utilisée pour la catégorie « non-sites ». DongMei et Douglas (2002) ont par ailleurs démontré que des approches différentes de l'échantillonnage ont plus d'impact sur les résultats de la classification lorsqu'une résolution fine est utilisée.

- **Classification des herbiers aquatiques**

La précision minimale obtenue pour les herbiers peut s'expliquer en partie par une adaptation des espèces végétales submergées composant les herbiers de marais permanents à des milieux temporaires (Grillas, 1990) comme les scirpaies. Ainsi les milieux ayant une proportion de sol nu importante, comme les sansouïres ou certaines dunes, peuvent être susceptibles, selon la topographie et la pluviométrie, de présenter un développement d'herbiers aquatiques dans les dépressions. Cependant, il apparaît également sur la carte une confusion avec d'autres espèces, comme les zostères (*zostera noltii*) du Vaccarès et le Rhône, qui montre que la classification intègre d'une part d'autres espèces de macrophytes submergées à recouvrement denses et, est qu'elle est affectée d'autre part par un facteur qui pourrait être la turbidité. Le Vaccarès est en effet susceptible de présenter une certaine turbidité affectant la classification de ses herbiers (Puente, 2004). Cela semblerait cacher les zostères en 2005 tandis qu'elles apparaissent en 2006. Cependant cette observation reste à être démontrée avec l'application de la formule à une année bénéficiant d'une scène en septembre, car on pourrait également supposer que le mois d'octobre ne permet pas la distinction des espèces submergées caractéristiques des marais permanents de domaines privés camarguais d'avec les zostères du Vaccarès. Il faut également noter que Puech et al (2005) ont observé la présence de potamots, *Ruppia* et *Chara* lors de l'échantillonnage des herbiers du Vaccarès.

La distinction des espèces de macrophytes submergées est possible à l'aide de données multispectrales et multitemporelles (Pinnel, 2006). Un effort d'échantillonnage pourrait ainsi être envisagé afin de distinguer des classes en fonction des espèces de macrophytes dominantes et prendre en compte les marais temporaires. La catégorie « salins » devrait également être arrangée en fonction de la salinité car certaines espèces comme le ruppia

(*Ruppia maritima*) sont adaptées à des milieux inondés en permanence présentant une forte conductivité (Grillas, 1990).

- **Classification des scirpaies**

La classification des scirpaies dépend essentiellement de trois types de paramètres : le petit nombre de sites, l'hétérogénéité du milieu et la réponse spectrale caractéristique en septembre. Les grandes zones homogènes de scirpaies sur la zone d'étude étant peu nombreuses, nous avons été contraints de regrouper les espèces de scirpes, même si elles pouvaient présenter une phénologie légèrement différente, se développer dans des milieux de profondeur variable (Mesléard et Perennou, 1996), avec ou sans herbiers aquatiques (Grillas et Roché, 1997). L'échantillon souffre donc d'une importante variabilité statistiquement difficile à maîtriser étant donné sa petite taille. On peut supposer que cela affecte la reproductibilité des formules obtenues, suite à l'instabilité des arbres de décision pour des petits échantillons (Brostaux, 2005).

Si certains auteurs ont trouvé un intérêt particulier aux arbres de décision pour créer des méthodes de classification de données de télédétection de haute dimension spectrale à partir de petits échantillons (Tadjudin et Landgrebe, 1996), il demeure qu'un « petit échantillon » est normalement constitué au minimum d'une cinquantaine d'individus (Brostaux, 2005). Par ailleurs, nous n'avons trouvé aucune étude précisant l'impact d'une classe extrêmement rare dans un échantillon non-équilibré. Scarpa et Torelli (2004), incapables de conclure sur l'utilisation de poids en cas d'échantillon déséquilibré dans un test de classification, conseillent d'utiliser préférentiellement un échantillon équilibré. D'autres auteurs montrent que l'utilisation de probabilités de priorité peut être une bonne solution pour ne pas pénaliser les classes rares dans le cadre d'une classification de type non-paramétrique (McIver et Friedl, 2001). Les résultats de l'année 2006 pour les herbiers et les phragmitaies montrent que l'application des formules obtenues avec des données de 2005 à d'autres années est envisageable avec une bonne précision. Les arbres de classification sont effectivement réputés pour fournir des estimateurs reproductibles.

Pour les scirpaies, il est vrai que l'utilisation du mois d'octobre est particulièrement pénalisante, mais cela n'explique pas la différence observée pour la bande 1 du mois de décembre qui ne permet pas d'appliquer correctement l'un des seuils sur les données de

l'année suivante. On pourrait alors envisager une mauvaise classification des sites restants, même avec l'utilisation d'une image de septembre en 2006. Il serait donc intéressant de tester cette formule sur une année ayant une acquisition en septembre afin de savoir si, effectivement, le petit nombre de sites affecte réellement la fiabilité de la formule ou si l'évolution des sites de scirpaies très hétérogènes peut être responsable de l'impossibilité d'appliquer ce seuil de décembre à l'année 2006.

Il reste cependant deux points qui permettraient d'appuyer l'hypothèse du petit nombre d'échantillon. Il s'agit des paramètres utilisés pour l'élaboration de l'arbre optimal. L'instabilité des arbres de décision face à un petit nombre d'individus est lié à un souci de prédiction trop proche de l'échantillon d'entraînement. Or, l'arbre obtenu pour le scirpe, est le seul à être identique avec les méthodes d'élagage du CV1-SE et du CV0-SE. Cette dernière méthode a souvent tendance à produire des arbres plus grands et légèrement moins performants que la première car plus proche des informations contenues dans l'échantillon d'entraînement (Esposito et al., 1999 ; Brostaux, 2005). L'équivalence du résultat pour les scirpaies laisse donc penser que l'échantillon couvre une importante variabilité, ainsi, un arbre très peu élagué serait nécessaire pour prendre en compte l'ensemble de cette variabilité. Dès lors l'impossibilité d'appliquer la formule à une année suivante avec une image de septembre serait bien lié à une limitation de la capacité du test statistique dû à un trop petit nombre d'individus de cette classe « scirpaies » ne permettant pas de bénéficier de l'avantage des arbres de classification en terme de reproductibilité.

L'utilisation des paramètres de priorité peut également être un signe des limitations des arbres de décision face à cette petite classe. L'utilisation de ce paramètre est particulièrement intéressante pour les arbres de classification, car les algorithmes sont créés, à l'origine, pour maximiser la précision basée sur les données de l'échantillon d'entraînement (McIver et Friedl, 2002) en supposant que celui-ci est représentatif de la variabilité et de la fréquence relative des classes de la population (Breiman, 1984). Ajouter cette donnée de priorité permet d'aider à la distinction de classes difficilement séparables en télédétection (McIver et Friedl, 2002). Les meilleurs résultats pour les herbiers aquatiques et les roselières ont été obtenus grâce à la possibilité de rééquilibrer l'échantillon, permettant d'offrir une bonne classification (98.7 % et 97.4 %) malgré le déséquilibre important des classes à l'origine. Ce « jeu » du paramètre de priorité n'a pas été possible avec les scirpaies, le meilleur résultat étant obtenu avec le paramètre par défaut.

- **Superficie des roselières**

L'observatoire national des roselières incluant scirpaies, phragmitaies, phalaridaies, typhaies, et glyceriaies, estime la superficie des recouvrements de plus de 1 hectare, à 12 400 hectares en Camargue. Dans le delta, les roselières sont principalement des phragmitaies, des scirpaies et des cladiaies. Celles-ci se trouvent presque exclusivement sur la zone du Plan du Bourg. Les typhaies recouvrent généralement de petites surfaces et sont très localisées. Mathevet et Sandoz (1999) estiment la superficie des phragmitaies à 8000 ha. Nous avons évalué la surface recouverte par les roselières type phragmitaies et scirpaies à 12700 hectares en Camargue. De façon générale nous obtenons des valeurs supérieures aux précédentes estimations mais cela s'explique par l'aire minimale considérée, 10 m<sup>2</sup>, qui permet de tenir compte des petits développements de phragmitaies répartis sur l'ensemble du territoire occupé par la zone d'étude comme, par exemple, sur les bordures de parcelles agricoles et hydrauliques. Des travaux récents sur les digues du Rhône ont également participé au développement du roseau dans des zones autrefois peu colonisées. Il faut cependant garder en mémoire, qu'au vue de la cartographie des scirpaies, nous avons supposé une confusion, qui reste à vérifier, avec les algues filamenteuses se développant en fin de saison estivale sur certains marais permanents à herbiers aquatiques denses, et qui prennent une couleur rouille (Annexe 8) avant de disparaître avec les premières pluies automnales.

### **3 - Intérêt des arbres de décision pour la classification des communautés végétales dominantes de Camargue**

Les arbres de décision sont donc une bonne méthode de classification de la végétation des zones humides se développant sous forme de communautés homogènes. Ils présentent l'avantage de pouvoir tester un grand nombre de variables et ainsi de comprendre l'intérêt des indices de végétation pour la cartographie d'espèces dont la phénologie<sup>3</sup> est influencée par une gestion contrôlée des niveaux d'eau. Ils permettent également d'intégrer facilement le mode multitemporel nécessaire à une classification optimale de ce type de végétation. L'utilisation du paramètre de priorité permet d'envisager l'obtention d'un arbre optimal à partir d'un échantillon déséquilibré. Cela est particulièrement intéressant pour les zones d'études difficiles d'accès où l'organisation de l'échantillonnage est contraignante. L'influence d'une classe à effectif très réduit sur la reproductibilité de la formule obtenue n'a

pas pu être démontrée avec les données à notre disposition, mais nous conseillerions, au vu des résultats obtenus, d'utiliser un minimum de 20 à 25 individus pour la classe la moins représentée sur le terrain, dès lors que l'échantillonnage reste coordonné à la résolution envisagée pour les données satellitales. On peut supposer que la reproductibilité des formules obtenues serait liée à la méthode d'élagage du CV1-SE qui contribue, comme le paramètre de priorité, à atténuer la particularité des arbres de décision à considérer que l'échantillon d'entraînement est une représentation fiable de la population.

### **C – La classification des surfaces en eau selon le type de végétation à l'aide des arbres de décision**

L'utilisation de satellites tels SPOT ou LANDSAT pour la détection des superficies en eau a permis de mettre en évidence que les bassins inondés des zones humides peuvent être identifiés en utilisant les canaux de l'infrarouge où l'eau a une réflectance minimale (Smith, 1997 ; Töyrä et al., 2002). Baret et al (1988) ont également remarqué que le moyen infrarouge était sensible à l'humidité du sol sous le couvert végétal. Des indices permettent de mettre en évidence l'eau par rapport à la végétation et le sol sec en utilisant les canaux de l'infrarouge (Gao, 1996 ; Mc Feeters, 1996). Mais, de façon générale, les zones inondées restent sous estimées lorsqu'un développement de la végétation émergente ou submergée intervient (Smith, 1997). Le NDVI (Rouse et al. en 1973 cités par Bannari et al. , 1995) a permis de prédire les précipitations en milieux semi-arides (Kerr et al., 1989 et Nicholson et al., 1990 cités par Bannari et al., 1995). Gond et al. (2004) l'ont par ailleurs utilisé pour détecter des petits plans d'eau et zones humides de régions arides, en combinaison avec l'indice normalisé de différence d'eau (NDWI) de Gao (1996). Lorsque le manque d'eau augmente, la plante se fane et la production photosynthétique de chlorophylle peut être réduite (Pettigrew, 2004 ; Souza et al., 2004). La présence ou absence d'eau devrait, en effet, avoir une influence sur le stress hydrique de la végétation supérieure à un degré différent selon que le sol est asséché en profondeur ou recouvert d'une lame d'eau. Clay et al. (2006) suggèrent, par exemple, qu'une relation au stress hydrique influence la réflectance. Ainsi, détecter l'eau libre sous-jacente, reviendrait à considérer à la fois la réponse de l'eau libre visible entre les feuilles mais également celle contenue dans la végétation.

## 1 - La formule de classification de la présence/absence d'eau

L'arbre optimal permettant de classer la présence d'eau se base sur un seuil appliqué au canal infrarouge moyen qui permet, en sélectionnant les valeurs les plus faibles, d'isoler la majorité des sites présentant un niveau d'eau élevé (Figure 71). Ainsi, la branche gauche s'attache à distinguer les zones en eau avec végétation des zones sèches avec végétation. Le deuxième niveau utilise l'indice NDWIF2 basé sur le NDWIF1 mais avec le canal infrarouge moyen. Le MNDWI (Hanqiu, 2006), qui est similaire à notre NDWIF2, est moins sensible aux bruits de l'environnement et permet ainsi une meilleure discrimination des zones en eau que le NDWIF1. Cela pourrait expliquer pourquoi le NDWIF2 a été préférentiellement sélectionné par Rpart. Le seuil défini à ce nœud, permet d'écarter une majorité de sites secs. Le NDWIF2 ayant des valeurs négatives pour le sol et la végétation, certains sites de phragmites sont également isolés du fait du recouvrement dense de cette espèce végétale. Le dernier nœud de cette branche tente de séparer les sites secs des sites en eau restant. Le seuil très négatif du DWV qui isole les sites en eau, est caractéristique d'une végétation chlorophyllienne avec un NDVI très positif par rapport au NDWI de Gao (1996). La sélection des sites en eau se ferait donc ici selon l'état hydrique de la végétation liée à la présence d'eau sous-jacente.

La non sélection du NDWI de Gao (1996), pourrait être lié à un phénomène relevé par Clay et al (2006) qui montrent que pour un stade de développement végétal avancé d'une espèce de maïs, le NDWI, bien que mis au point pour suivre le contenu en eau de la végétation, n'est pas corrélé au stress hydrique de la plante. Cet indice serait donc limité par le développement végétal et ne serait pas performant pour détecter la présence d'eau sous-jacente à la végétation. La combinaison avec le NDVI, lié au stress hydrique des plantes (Clay et al., 2006), permet alors d'accentuer la mise en évidence des zones où la plante est suffisamment alimentée en eau.

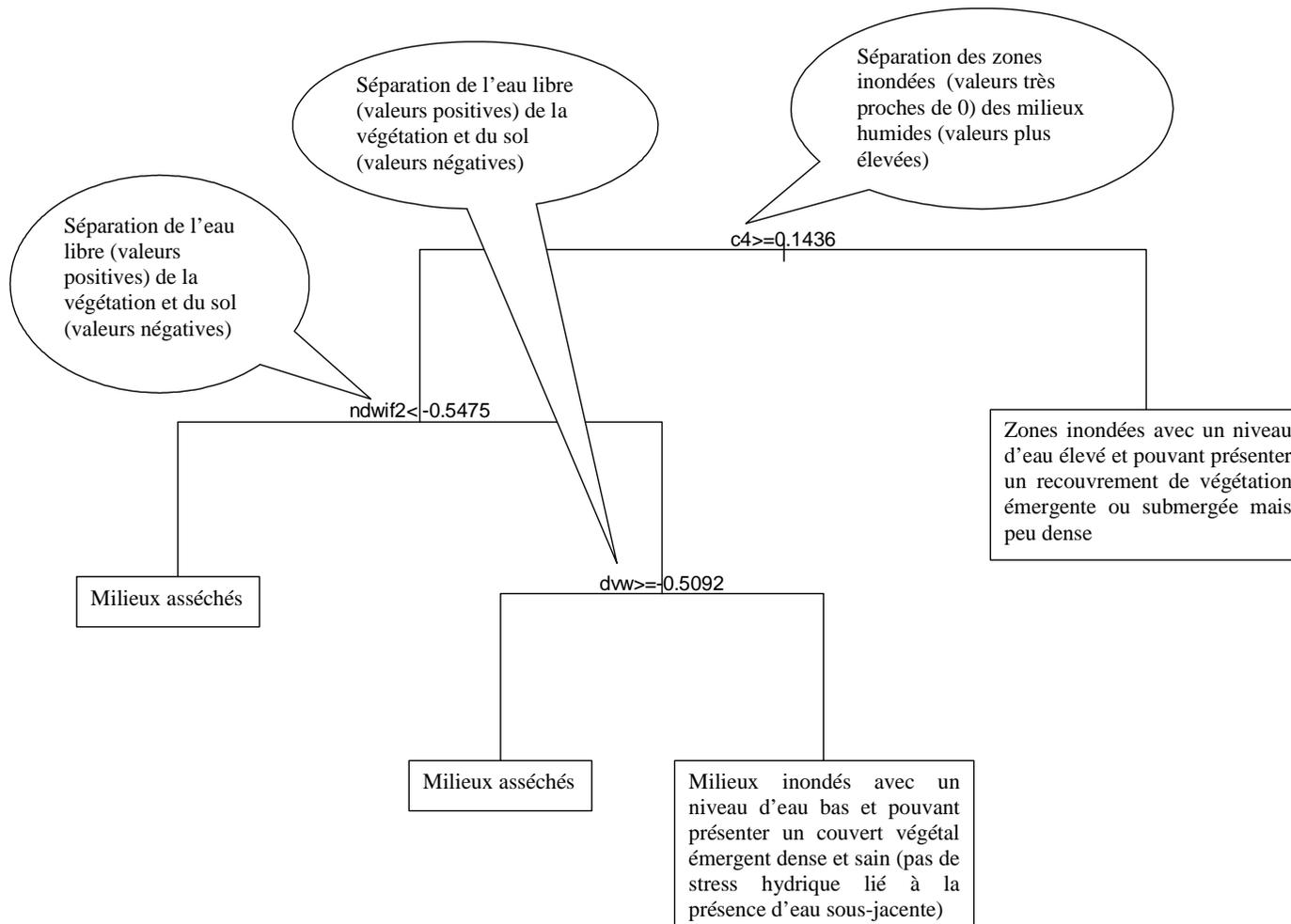


Figure 71 : Intérêt des variables sélectionnées pour la classification de la présence/absence d'eau

## **2 - Précision et reproductibilité de la classification de la présence/absence d'eau**

La combinaison d'indices multispectraux à l'aide des arbres de décision pour la classification de la présence/absence d'eau ne résout pas totalement le problème de détection de l'eau à travers une végétation émergente dense. En effet, il apparaît plus facile de classer la présence/absence d'eau dans un marais ouvert à semi-ouvert que dans un marais fermé bien que les résultats obtenus pour les marais à hautes émergentes demeurent acceptables (précision totale de 70 %). Comme l'a suggéré Carter (1982, cité par Töyrä et al 2002), la détermination des superficies inondées s'avèrent plus facile pendant la période de perte des feuilles et/ou de dormance que pendant la saison de croissance de la végétation. Les tests par modèles linéaires généralisés montrent que, pendant la période de croissance de la végétation, plus le phragmite est haut, plus il est difficile de classer correctement la présence d'eau. Lorsque les feuilles et les tiges atteignent une couverture importante, la part de l'eau libre dans la valeur du pixel devient probablement insuffisante pour être prise en compte. Par ailleurs, on retrouve uniquement des roselières parmi les sites mal classés, même si les cladaïes offre une couverture végétale souvent plus dense. Or le roseau peut présenter une réponse retardée au stress hydrique (Sinnassamy et Mauchamp, 2000), il serait donc intéressant de réaliser une classification en tenant compte de la durée de l'assèchement en condition de sol sec dans les phragmitaies. Les niveaux d'eau n'étant pas mesurés sur chaque pixel le jour même de l'acquisition de l'image, des biais relatifs à l'échantillonnage sont également possibles, tout particulièrement en période de forte variation des niveaux d'eau.

Les résultats obtenus montrent néanmoins qu'il est possible, à l'aide des arbres de classification, d'obtenir une formule reproductible permettant de classer la présence/absence d'eau dans une zone humide caractérisée par une végétation émergente et submergée plus ou moins dense. De manière générale, l'application de la formule peut apporter une estimation des superficies en eau, tous types de végétation confondus, sur l'ensemble de l'année avec une précision convenable. Cela ne nécessite pas d'échantillonnage annuel comme il est indispensable d'avoir avec des classifications supervisées. Gond et al (2004) ont montré que l'utilisation d'indices multispectraux liés à la détection de l'eau est particulièrement intéressante pour le suivi des superficies en eau dans les zones arides. Nous montrons ici que leur combinaison peut également être un bon outil dans le monitoring des zones humides méditerranéennes.

## **D - Intérêt du mode multispectral en multidates pour le suivi de la qualité et de l'intérêt avifaunistique des roselières de Camargue**

Les indices multispectraux et plus spécialement les indices dits « de végétation » sont des outils utilisés couramment en télédétection<sup>13</sup>, comme une mesure quantitative, indicatrice de la vigueur de la végétation (Bannari et al., 1995). Ils sont plus ou moins sensibles aux conditions atmosphériques, les indices de dernière génération étant moins affectés (Bannari et al., 1995). Ils peuvent être intéressants dans des études de suivis du couvert végétal, notamment en relation avec des paramètres biophysiques ou avec l'indice de surface foliaire (LAI : indice foliaire<sup>9</sup>) (Broge et Leblanc, 2000 ; Haboudane et al., 2004 ; Yang et Chen, 2004 ; Buchanan et al., 2005 ; Schlerf et al., 2005 ; Clay et al., 2006). Le NDVI est l'indice le plus communément et intensément utilisé, notamment afin de différencier les changements naturels des évolutions dues aux activités humaines (Kerr et Ostrovsky, 2003). Slocum et Perry (2002) ont montré que le NDVI, calculé à partir de données issues d'une imagerie haute résolution en mode multispectral, pouvait expliquer 97 % de la variance dans la modélisation de la biomasse de *Phragmites australis*. Cet indice est également utilisé dans le cadre d'un suivi de la densité par parcelle des roselières de la Petite Camargue Gardoise à partir d'images acquises par le satellite LANDSAT en saison estivale (Poulin et al., 2007).

Plusieurs de ces indices sont sensibles aux conditions atmosphériques (Girard et Girard, 1999). Il faut également noter que le calcul d'un indice à partir de données reçues d'une même cible mais pour des capteurs différents ne donnera pas le même résultat du fait des caractéristiques particulières de ces capteurs (Bannari et al., 1995). Egalement, la résolution considérée pour le calcul de cet indice influe sur le résultat ainsi que le stade de développement de la végétation (Bannari et al., 1995 ; Yang et Chen, 2004). Les images que nous avons utilisées sont corrigées radiométriquement, pourtant un grand nombre des indices testés dans cette étude sont instables entre les deux années de suivi, notamment le NDVI. Il semble donc nécessaire de sélectionner avec précaution les indices utilisés pour qu'une modélisation du couvert végétal soit reproductible chaque année. Nous avons écarté l'hypothèse de l'influence atmosphérique et du stade phénologique<sup>3</sup>. Il reste celle de la résolution considérée pour l'extraction des données, qui tient compte de la valeur d'un pixel ou de la moyenne sur 4 pixels au lieu de polygones employés généralement et représentant une moyenne sur un nombre bien plus important d'unités. Les autres particularités du capteur SPOT 5 telles que le jeu des miroirs pourraient également être responsables d'une variation de

la réponse de la végétation liée, par exemple, à la différence d'angle d'incidence entre les dates (variation de 2,59° à 25,28° sur les deux années). Mais il n'a pas été possible de savoir, dans le cadre de cette étude, laquelle de ces caractéristiques peut être responsable du fait que le NDVI, pourtant souvent utilisé, n'est pas l'indice le plus adéquat pour le suivi par télédétection<sup>13</sup> satellitale des paramètres mesurés dans les roselières camarguaises traduisant leur qualité et intérêt avifaunistique.

La plupart des études portant sur les caractéristiques de développement de la végétation sont réalisées à partir des données d'une image et souvent en testant l'intérêt du NDVI sur une date (Broge et Leblanc, 2000 ; Yang et Chen, 2004 ; Buchanan et al., 2005 ; Schlerf et al., 2005). Les suivis en multi-date, pour leur part, portent sur la comparaison des indices obtenus pour chacune des dates en relation avec les différentes phases de la phénologie<sup>3</sup> (Yang et Chen, 2004). Sur de très grandes aires d'étude, l'analyse en composantes principales utilisée pour la sélection des canaux ou indices les plus significatifs montre que la source de variabilité est spatiale plutôt que temporelle, notamment lorsque cette sélection est liée au choix de l'habitat par l'avifaune. Les variables utilisées peuvent être issues du NDVI et représentent des moyennes sur l'année ou sur les saisons (Suarez-Seoane et al., 2002). Les résultats que nous avons obtenus montrent que le suivi de la qualité et de l'intérêt avifaunistique des roselières sera plus efficace avec l'utilisation d'une imagerie multispectrale et multitemporelle. En effet, les meilleurs modèles obtenus, qui combinent à la fois plusieurs indices et plusieurs dates, permettent d'expliquer plus de variance que les indices utilisés seuls. La combinaison des indices semble apporter beaucoup plus d'information que celle pour laquelle ils ont été créés à l'origine.

Les paramètres de végétation généralement modélisés à l'aide de données de télédétection<sup>13</sup> sont le plus souvent le LAI (indices foliaire<sup>9</sup>), le pourcentage de recouvrement, la densité évaluée à partir du nombre de tiges, la hauteur, la biomasse ou le rendement pour les surfaces agricoles. Les résultats obtenus permettent d'améliorer une probabilité d'occurrence ou une estimation de l'abondance avifaunistique (Jakubauskas et al., 2001 ; Locke et al., 2002 ; Goel et al., 2003 ; Yang et Chen, 2004 ; Buchanan et al., 2005 ; Bradbury et al., 2005 ; Marsett et al., 2006 ; Vohland et al., 2007). Les roselières de Camargue constituent un milieu particulier par la présence de matière sèche qui demeure plusieurs années. Elles ont également la particularité d'être un milieu homogène couvrant de grandes surfaces et exploité pour la sagne. Cela induit des habitats diversifiés pour un même milieu. La sélection par l'avifaune

montre bien l'importance d'un ensemble de paramètres à prendre en compte. Le héron pourpré, par exemple, sélectionne son habitat en liaison avec les niveaux d'eau et la structure de la roselière. La modélisation d'un seul paramètre n'est donc pas suffisante pour caractériser ce milieu. Lorsqu'on s'intéresse à un ensemble de paramètres et de variables descriptives, les modèles linéaire généralisés sont de bons outils car ils permettent de prendre en compte une certaine non-linéarité par le biais de transformation et sont plus performants que les régressions linéaires simples lorsqu'il s'agit de les appliquer sur des données issues du milieu naturel plutôt qu'en laboratoire (Suarez-Seoane et al., 2002). La reproductibilité des modèles a rarement été démontrée (Yang et Chen, 2004).

Nos résultats montrent qu'un petit nombre de sites d'échantillonnage permet d'obtenir des prédictions justes et reproductibles. La modélisation de la hauteur des tiges vertes est très satisfaisante et permet d'envisager une bonne reproductibilité du modèle. Les formules du nombre de tiges sèches totales et du rapport du nombre de tiges sèches sur le nombre de tiges vertes offrent également de bons résultats. Ces modèles sont d'autant plus prédictifs qu'on leur combine un suivi de la coupe des roselières par survols aériens ou une cartographie de la coupe. Cette dernière pourrait être envisagée à l'aide des arbres de classification. Il existe en effet différents « profils » liés à la période de coupe avec la mise en eau et la durée d'inondation et les conséquences de ces facteurs sur le développement du phragmite. Ainsi, plusieurs types de roselières coupées pourraient être définis en fonction de la densité et de l'inondation pour constituer des classes à intégrer dans une cartographie basée sur les arbres de décision. La formule de prédiction du pourcentage de trouées<sup>14</sup> fait également partie des bons modèles. En effet, les moins bonnes corrélations obtenues pour les données échantillonnées en 2006 sont essentiellement dues à une imprécision méthodologique découlant d'un effet observateur. La modélisation du nombre de tiges sèches entières n'offre pas de résultats satisfaisants mais cette variable contient un grand nombre de valeurs nulles. En effet, une roselière coupée ne doit, en principe, pas contenir de tiges sèches, le vent peut également être responsable de la brisure des tiges sèches. Un suivi en présence-absence pourrait être plus efficace, notamment avec l'utilisation des arbres de décision.

Même si la formule de prédiction du nombre de tiges vertes offre de bons résultats sur l'année 2005, sa non-reproductibilité sur l'année 2006 n'autorise pas l'utilisation de ce modèle. Ce résultat peut être expliqué par des réponses spectrales similaires des phragmitaies selon deux modes de développement : les petites tiges fines avec des feuilles courtes en groupements

homogènes denses et les grandes tiges à gros diamètre basal avec des feuilles longues en groupements homogènes moins denses. Des mesures réalisées sur les feuilles de phragmites montrent en effet, une corrélation entre la hauteur des tiges avec leur diamètre et la longueur des feuilles (respectivement  $r = 0,82$  et  $r = 0,72$ ,  $dl = 39$ ,  $p \leq 0,001$ ). On pourrait envisager un suivi par GAM (Additive Generalized Models). Cette méthode de modélisation s'affranchit, en effet, de la prédéfinition de fonction approximant la façon dont les données sont modélisées comme c'est le cas pour les GLM. Les données dictent elles-mêmes la forme de la fonction par un lissage, ce qui permet d'obtenir selon certains auteurs une vision plus réaliste de la réponse à l'environnement (Suarez-Seoane et al., 2002). Considérant ces données bi-modales, une classification par arbre de décision pourrait également être utilisée pour le suivi du nombre de tiges vertes, mais cela nécessiterait au préalable, de plus importantes investigations sur le terrain.

L'approche multispectrale en multi-dates associée à des mesures précises sur le terrain apparaît donc comme une technique prometteuse pour le suivi de la qualité d'un habitat naturel homogène sur de grandes surfaces à l'aide de la télédétection<sup>13</sup> satellitale. Divers paramètres de structure et de biomasse de la végétation susceptibles d'influencer la faune vulnérable peuvent être suivis par l'imagerie satellitale. Cela permet d'envisager la réalisation de cartes de probabilité d'occurrence des espèces d'oiseaux caractéristiques des roselières par la combinaison des divers paramètres pertinents à chaque espèce. Un suivi de la qualité du roseau par cartographie annuelle peut également être mis en œuvre à partir de ces outils. La reproductibilité des formules montrent qu'il est possible d'envisager ce type de suivi en limitant, voire en supprimant, un échantillonnage terrain lourd et coûteux.