

L'influence des activités socio-économiques sur les habitats camarguais

A - La Camargue : « l'illusion d'une stabilité enfin maîtrisée » (Chauvelon et Mathevet, 2002).

1 – Sa situation géographique

La Camargue s'étend sur une surface de 145 300 hectares entre les golfes d'Aigues-Mortes et de Fos-sur-Mer selon un delta de forme triangulaire dont le sommet se situe au niveau de la ville d'Arles et dont la base s'étale sur 80 kilomètres de côte sableuse d'est en ouest. La Camargue est drainée par le Rhône qui se divise en deux bras : le Grand Rhône drainant 80 % du territoire et le Petit Rhône qui draine seulement 15 % et qui tend à s'envaser à son embouchure près des Saintes-Maries-de-la-Mer. Ces deux bras divisent notre zone d'étude en trois secteurs : à l'ouest, la Petite Camargue Gardoise qui s'étend jusqu'aux Costières de Nîmes, au centre la Grande Camargue ou Ile de Camargue, et à l'est le Plan du Bourg sur une zone allant de la ville d'Arles jusqu'à la mer et à la plaine de la Crau (Figure 1). Le Petit Rhône constitue une limite administrative avec à l'Est les Bouches-du-Rhône et la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et à l'ouest le Gard et la région Languedoc-Roussillon.

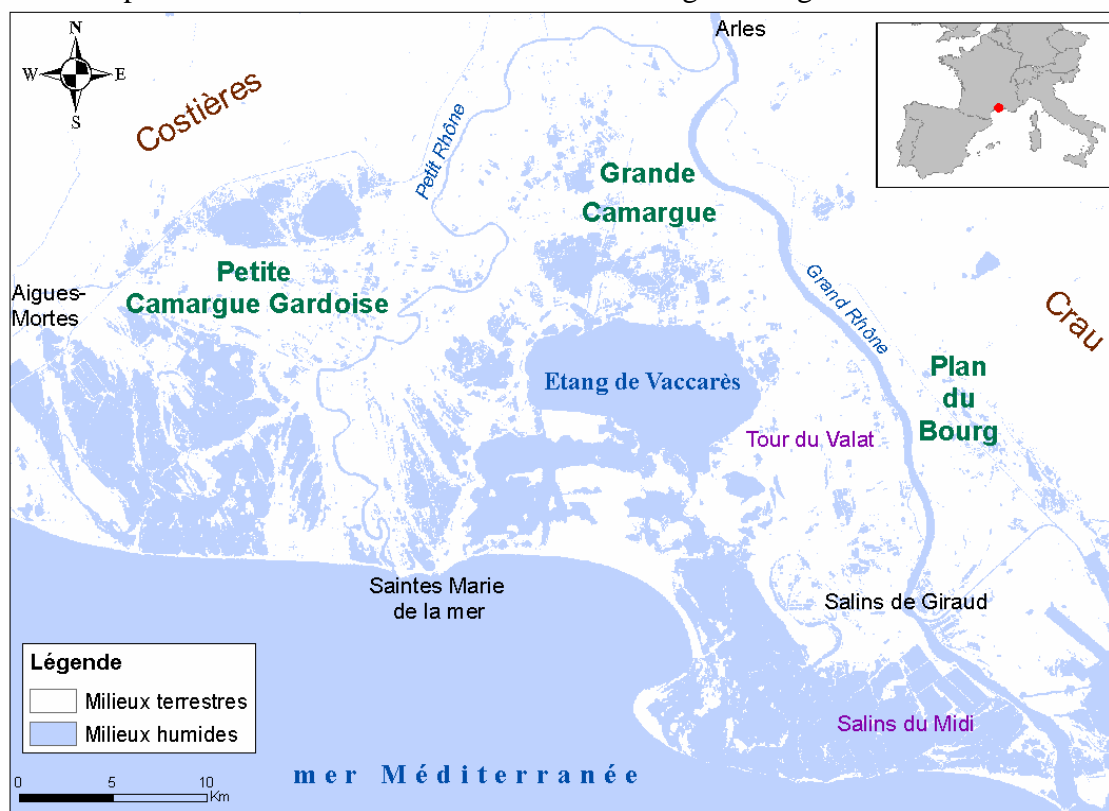


Figure 1 : Situation géographique de la Camargue

2 – Son climat

Le climat observé en Camargue est typiquement méditerranéen et caractérisé par une période estivale longue, chaude et sèche, des hivers doux et un ensoleillement important. Les précipitations sont mensuellement irrégulières et inter-annuellement très variables (Chauvelon, 1996). « *Plus de 200 mm d'eau peuvent tomber en deux ou trois jours et être suivis de plusieurs semaines totalement sèches notamment au printemps* » (Chauvelon et Mathevet, 2002). Les saisons les plus humides sont, en effet, le printemps et l'automne. Le mois le plus froid est janvier (6.3°C normale 1944-1994) et le mois le plus chaud est juillet (22.8 °C normale 1944-1994). Les vents sont courants (plus de 300 jours par an) et violents (25 jours par an à plus de 80 km/h) avec une prédominance du mistral (NNW) qui participe à limiter la nébulosité et l'hygrométrie des vents marins. L'évaporation liée aux températures estivales élevées, à l'ensoleillement et à la violence des vents est responsable d'un déficit hydrique qui s'étend généralement de mars à septembre (Chauvelon, 1996). L'évaporation totale est de 1200 mm par an, elle est ainsi responsable d'un déficit hydrique de 600 mm par an qui peut atteindre 200 mm en saison estivale (Chauvelon, 1996).

3 – Son fleuve : le Rhône

Le bassin versant du Rhône occupe une superficie de 95 500 km². Il est l'un des fleuves les plus importants d'Europe occidentale. Il s'écoule sur 812 km. En France, il parcourt 517 km pour se jeter dans la mer Méditerranée par son delta, la Camargue. On lui a souvent attribué le surnom de « fleuve fantasque » car il se situe au 48^{ème} rang mondial par son débit (moyenne interannuelle de 1700 m³/s mesuré à Beaucaire) ce qui lui vaut la capacité d'écouler 54 km³ d'eau par an en moyenne. Il constitue ainsi le plus important apport fluvial à la Méditerranée (1/6 des apports totaux). Depuis la seconde moitié du 19^{ème} siècle, l'homme a tenté de contrôler le cours du Rhône par une succession d'aménagements (Figure 2) d'abord destinés à améliorer les conditions de navigation, puis voué à limiter les inondations à la suite de la crue générale la plus simple mais la plus brutale qu'ait connu le Rhône en 1856 avec un débit maximal estimé à 12500 m³/s à Beaucaire (Pardé, 1925, Bravard, 1987, Dambre et al., 1994, CARE, 1999, Fruget, 2003, CNR, 2004). Ainsi, « *en l'espace d'un siècle environ, le cours d'eau est passé d'un style géomorphologique tressé à une succession de biefs aménagés* » (Fruget, 2003).

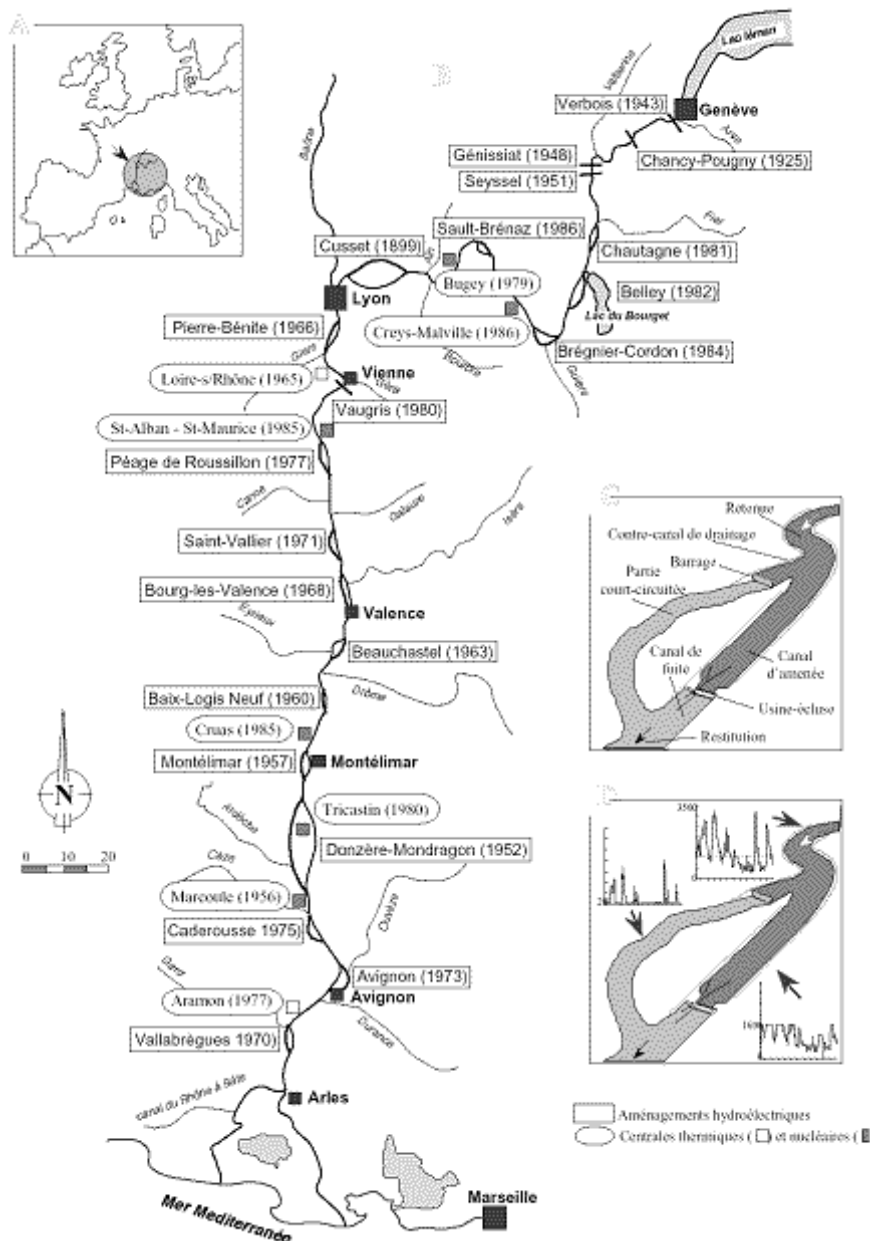


Figure 2: Le Rhône Français, tiré de Fruget 2003.

A - Situation générale. B- Localisation et chronologie des aménagements. C - Aménagement type Compagnie nationale du Rhône (CNR). D - Exemple du fonctionnement hydrologique annuel d'un aménagement

Trois principales composantes déterminent le débit du Rhône : (1) le milieu alpin l'alimente de façon soutenue entre mai et juillet avec la fonte des neiges et des glaciers ; (2) les climats méditerranéen et cévenol provoquent des étiages importants en été et des crues parfois mémorables en automne et enfin (3), la Saône autour de la région lyonnaise, son principal affluent soumis à des crues dites lentes, lui apporte des entrées océaniques hivernales. Ainsi,

en hiver le régime hydraulique est élevé mais moins qu'à l'automne qui concentre les débits maxima tandis que la période estivale enregistre ses valeurs minimales d'écoulement. On considère que le Rhône est en crue dès que son débit dépasse les 5000 m³/s. Quatre types de crues sont caractéristiques du Rhône : les crues océaniques, principalement menées par la Saône; les crues méditerranéennes, avec une forte participation de la Durance à l'Est ; les crues cévenoles, influencées par les affluents venant de l'ouest tels que le Gardon, l'Ardèche ou la Cèze, et les crues généralisées. Les aménagements hydroélectriques ne gèrent que les débits ordinaires et les débits observés en octobre 1993 (9800 m³/s)*, janvier 1994 (11000 m³/s)*, septembre 2002 (10500 m³/s)* et décembre 2003 (12500 m³/s)*, et les inondations qui en ont découlées dans le delta, ont montré que ces aménagements n'empêchent pas la formation de grandes crues similaires à celles du 19e siècle.

4 - Quelques éléments géomorphologiques

La plaine de Camargue, légèrement inclinée du nord vers le sud (pente de $1,7 \cdot 10^{-4}$) et dépassant rarement les 5 mètres d'altitude, a une origine alluviale récente. « *Le sous-sol pourrait être comparé à un gigantesque « mille-feuilles » composé de couches successives d'alluvions fluviales, marines, ou encore palustres* » (Molina, 1996). Cette rencontre du Rhône et de la mer permet de distinguer trois éléments géomorphologiques. La « Haute Camargue », d'origine fluviale, au nord de l'Etang du Vaccarès, prend la forme d'une série de bourrelets alluviaux avec des marais d'eau douce dans les dépressions. La « Moyenne Camargue », formée de processus incluant les étangs et le fleuve, est sous l'influence de l'eau salée. La gamme de salinité y est très large, on y trouve de vastes zones déprimées, marécageuses ou palustres. La « Basse Camargue », d'origine laguno-marine, est un complexe de lagunes saumâtres, de sansouïres, de zones périodiquement inondées qui sont très fortement halomorphes.

5 - Brève histoire de l'occupation du sol camarguais

L'occupation du sol en Camargue est marquée par quatre grandes périodes de son histoire (Mathevet, 2000, PNRC, 2001). « La Camargue avant les digues jusqu'en 1869 » est

*débits de pointe relevé à Beaucaire,
source Compagnie nationale du Rhône (CNR), 2004

caractérisée par un paysage sculpté par les phénomènes naturels tels que les assècs estivaux et les crues du Rhône. La « Camargue viticole (1869-1942) » fait suite à la construction d'une digue pour isoler le delta de l'influence de la mer et se caractérise par une évolution de l'irrigation et la possibilité d'inonder les vignes en hiver afin de les protéger contre le parasitisme. La « Camargue du riz (1942-1970) » s'est développée afin de réduire la salinité des sols pour la culture du blé. La riziculture va prendre une place importante sur la surface du delta jusqu'à diminuer de moitié l'aire occupée par les milieux naturels (PNRC, 2001). Enfin, depuis 1970, la création du Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC), le développement de l'écotourisme, l'investissement foncier de structures intéressées par la conservation des habitats ou encore des mesures agri-environnementales Natura 2000, tentent de renforcer les actions de protection de la richesse naturelle et des paysages camarguais, débutées en 1927, avec la mise en place de la Réserve Nationale de Camargue. La Camargue est ainsi devenue le siège d'un ensemble d'activités économiques qui déterminent son occupation du sol (Fig. 3).

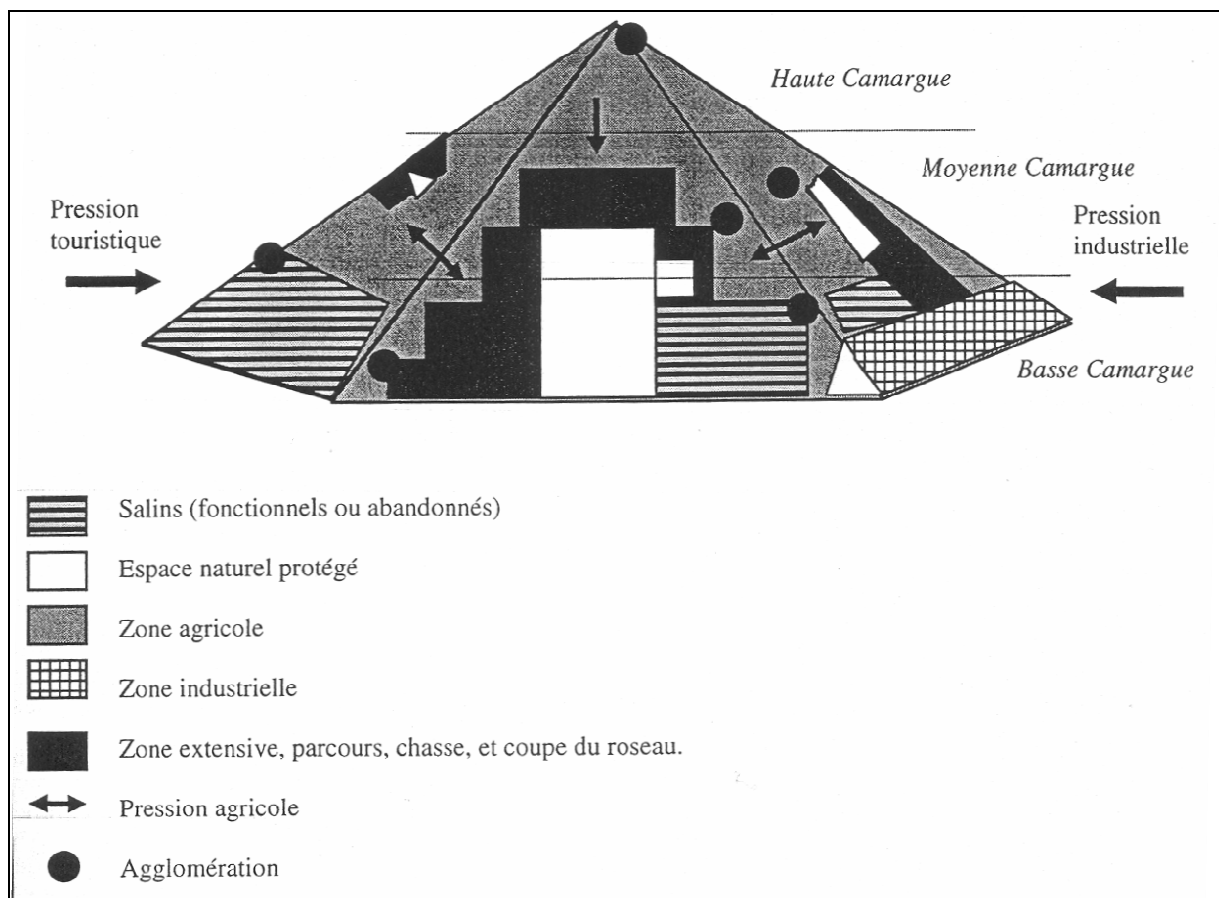


Figure 3 : Répartition spatiale des différentes activités humaines dans le complexe deltaïque du Rhône (Mathevet, 2000)

6 - L'hydrosystème camarguais

Ces activités économiques et le jeu des acteurs sociaux du delta nécessitent, comme le montre le schéma de fonctionnement hydrologique de l'île de Camargue (Figure 4), le contrôle des niveaux d'eau par l'homme. Au fil des années, la Camargue s'est donc dotée d'un système hydraulique, conditionné par les phénomènes naturels, de plus en plus contrariés par les changements climatiques qui jouent sur le niveau de la mer et les crues du Rhône.

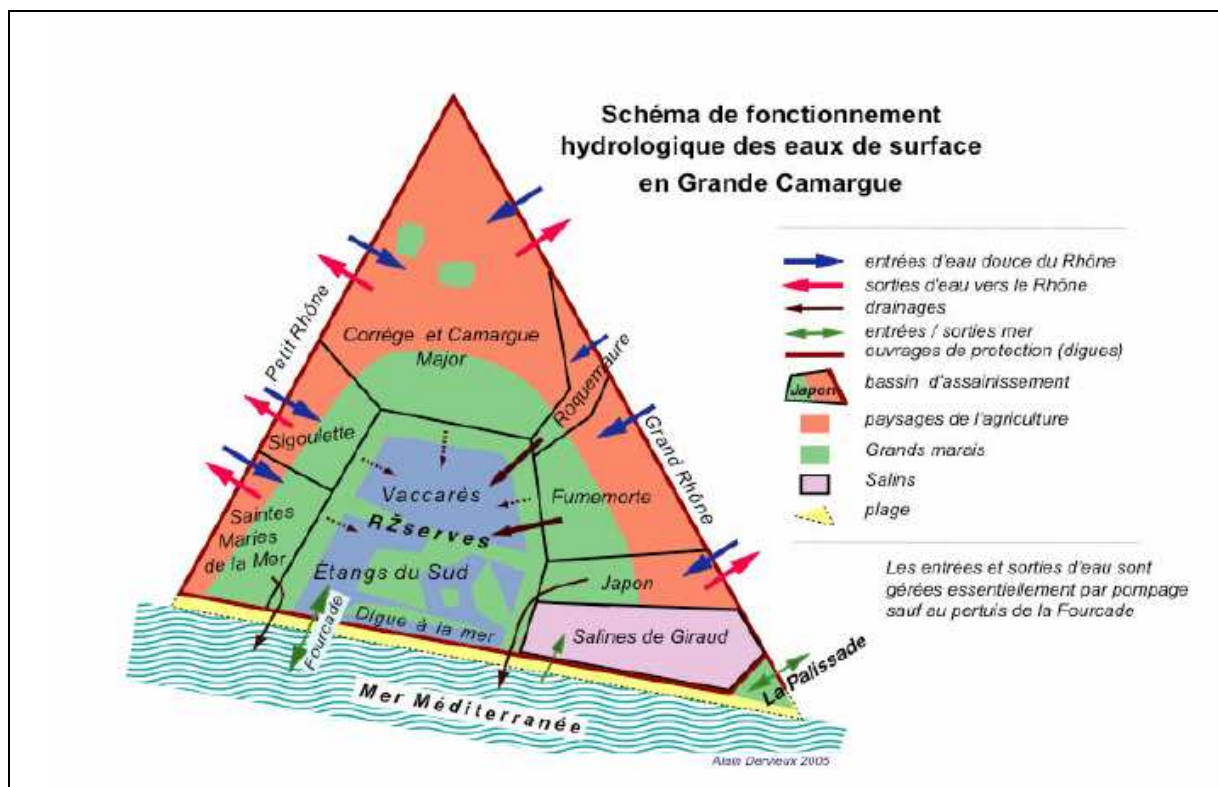


Figure 4 : Schéma de fonctionnement hydrologique des eaux de surfaces en Grande Camargue (Dervieux, 2005)

Ce système se compose d'un réseau d'irrigation et de drainage, dont les entrées d'eau douce, venant du Rhône, sont basées sur la riziculture. Il fonctionne sur deux secteurs, l'irrigation concernant plutôt le privé tandis que le drainage est essentiellement géré par des associations syndicales d'assainissement (ASA) selon une cotisation fixe et obligatoire par unité de surface de la propriété (Chauvelon et Mathevet, 2002). Le refoulement des eaux s'effectue vers la mer ou le fleuve. L'irrigation des zones privées peut s'effectuer selon deux modes : soit par un canal au sol nécessitant un relevage des eaux ou bien de façon gravitaire (Chauvelon 1996). Ce second mode est le moins coûteux. Compte tenu des catégories de gestion de l'irrigation

en Camargue, Chauvelon (1996) a défini trois types de parcelles : les parcelles agricoles irriguées pour le riz ou les pelouses en relation avec l'élevage bovin camarguais, les parcelles agricoles non irriguées qui sont au repos, et les parcelles de terrain naturel où l'on peut trouver soit des zones où le sol nu est très présent soit des zones de mares, marais et baisses¹.

7 - Les habitats de Camargue

La flore du delta est dictée par le régime hydrologique et la salinité. La nappe aquifère salée (parfois sursalée avec des teneurs en sel supérieure à 100g/L) peu profonde (10 à 50 m), peut en effet entraîner une salinisation et une hydromorphie de surface selon la nature des sols (Chauvelon et Mathevet, 2002). Selon le degré de salinité et les niveaux d'eau, on peut ainsi distinguer cinq grands types d'habitats (Isenmann, 2004) : Les milieux « naturels » saumâtres à grands parcellaires au centre de la Camargue (16000ha), les milieux « naturels » doux et faiblement saumâtres (42000ha) situés autour du bassin central selon une forme de croissant, les salins (25000ha) (anciennes lagunes aménagées pour l'exploitation du sel), les milieux agricoles en périphérie sur les zones les plus hautes, les moins salées et les moins inondables (50000ha) et les zones industrielles dans le golfe de Fos (8000ha). Mathevet (2000) définit la Camargue comme une « mosaïque d'agro-écosystèmes » les écosystèmes étant de trois types : les milieux terrestres dits relictuels avec les boisements et ripisylves se composent de pins parasols, chênes pubescents, peupliers blancs, frênes ou encore saules, ainsi que les pelouses qui accueillent soude, saladelle, graminées, joncs piquants ou autres cypéacées ; les milieux inondés temporairement comprennent les sansouïres (ou enganes⁶), les baisses¹ ou mares temporaires halomorphes caractérisées par des espèces végétales submergées et des ceintures de scirpes, soudes ou salicorne (Grillas, 1992, Grillas et Roché, 1997) et où le tamaris peut se développer en périphérie (Mesléard et Pérennou, 1996), ainsi que les prés salés avec des possibles développements de joncs. Les milieux en eau de façon permanente ou semi-permanentes incluent les marais à scirpaies, les à phragmitaies, les à cladiaies (marais à marisques) ou encore les étangs et les lagunes où se développent divers herbiers aquatiques en fonction des taux de salinité (Grillas, 1992). Les agro-systèmes, quant à eux, regroupent les rizières, les parcelles de céréales (blé dur, maïs, sorgho, colza, tournesol), de friche et luzerne, la vigne, les cultures maraîchères, et les vergers (Mathevet, 2000, PNRC, 2001). Ces milieux constituent des habitats pour la faune et notamment l'avifaune qui fait de la Camargue sa renommée. Elle est, de par sa situation géographique et son étendue spatiale, un espace de

reproduction et de halte au cours de la migration pour de nombreuses espèces d'oiseaux. Elle est, en effet, située sur la voie de migration des oiseaux du nord de l'Europe vers les quartiers d'hivernage africains. Sa position géographique très au sud en fait une halte de choix pour les migrateurs souhaitant atteindre l'Afrique sub-saharienne ou le Guadalquivir. Elle est également le plus important site d'hivernage pour les canards de surface en France (Deceuninck et al 2005, cité par Arzel, 2006).

Ainsi, « *la Camargue est un espace en mutation constante sous l'effet des agents naturels mais surtout, depuis un siècle et demi, sous l'effet des actions anthropiques* » (Isenmann, 2004). Afin de mieux comprendre cette influence de l'homme sur les habitats, nous allons nous pencher maintenant sur deux milieux de Camargue remarquables pour l'avifaune qu'ils hébergent et où l'homme exerce différentes activités économiques : les roselières (marais fermés) et les marais permanents ouverts caractéristiques des domaines privés.

B - L'artificialisation des niveaux d'eau dans les habitats camarguais, l'exemple des roselières et des marais permanents ouverts.

1 - Les roselières : habitats pour l'avifaune entre chasse, exploitation de la sagne et pâturage

Les roselières sont, au sens large, des groupements de grandes hélrophytes⁷ telles graminées, typhacées ou cypéracées qui ont tendance à former des peuplements monospécifiques, à proximité de l'eau. En Camargue deux types d'hélrophytes⁷ constituent des zones de développements importantes : le phragmite et les scirpes . Nous intéresserons donc à ces deux types de communautés végétales.

a - Les phragmitaies

- **Description du milieu**

Les phragmitaies sont des formations dominées par le roseau ou Phragmite (*Phragmites australis*) et sont au sens strict du terme les roselières. Cette espèce de graminée de la famille des Poacées est une plante herbacée à tige dressée, robuste, ligneuse et non ramifiée que l'on

nomme aussi sagne. Le diamètre de la tige dépasse rarement 2 cm et il peut atteindre 4 m de hauteur. Son appareil reproducteur est une inflorescence ramifiée en panicule de 20 à 40 cm dressé puis penché après la floraison qui prend une couleur roussâtre brun violacée et un aspect duveteux à la maturation des graines à l'automne.

Espèce clonale, le phragmite possède un appareil végétatif souterrain fortement ramifié qu'on appelle rhizome. Les rhizomes sont très développés et peuvent représenter un poids sec de matière organique supérieur à celui des tiges et feuilles aériennes. On comprend alors l'efficacité de ce mode de reproduction par multiplication végétative qui permet au roseau de coloniser de grandes étendues. La vitesse d'extension d'une roselière peut par exemple atteindre 5 à 6 mètres par an. Les tiges émergent au printemps en utilisant les réserves des rhizomes. Les tiges aériennes vivent une année. Un suivi des hauteurs de phragmites dans différentes roselières de Camargue montrent qu'elles atteignent leur maximum de croissance à la fin du mois de juin (G. Lefebvre, 2005, communication orale). En août-septembre, les petites tiges des zones denses meurent en raison de la compétition et de l'ombrage, les plus hautes peuvent rester jusqu'en octobre. Ces tiges perdent leurs feuilles au 1^{er} gel et sèchent sur pied en conservant la panicule selon les conditions des vents qui sont susceptibles de les casser. Les feuilles sèches et tiges mortes des grandes émergentes peuvent persister jusqu'à 8 mois. C'est une espèce très productive en terme de biomasse. Sa surface foliaire dans le cas d'une roselière dense est responsable de la monospécificité du milieu du fait de sa grande compétitivité en conditions de développement optimal. Les rhizomes et la matière organique constituent également une épaisse couche qui rehausse la surface du sol ou crée un système de sol flottant. Le phragmite se trouve dans de large gamme de profondeurs sur des terrains secs ou inondés en permanence. Il est résistant à une certaine salinité mais des taux de 5 à 20 g/l peuvent cependant affecter sa croissance et ses conditions écologiques optimale sont à un niveau d'eau situé entre 0.75 et 1.25 mètres (Mesléard et Pérennou, 1996 ; Sinnassamy et Mauchamp, 2001).

- **Usages et gestion des niveaux d'eau**

Les roselières de Camargue sont exploitées aujourd'hui principalement pour la couverture des toits de chaume (Annexe 8) (Mathevet, 2000). Dans le but d'augmenter la production, la monospécificité, et de faciliter l'accès des machines en hiver, les niveaux d'eau de ces roselières sont gérés par l'homme. Ainsi, de mars à juin elles sont inondées afin de favoriser

la croissance du roseau et sont asséchées de décembre à mars pour la coupe et limiter la dégradation des rhizomes par les engins (Poulin et al., 2002). L'apport d'eau douce permettrait également de limiter le stress dû au sel en Camargue, pour jouer sur la « qualité » du roseau préférentiellement fin, court et dense. La gestion de ces niveaux d'eau permet de distinguer les roselières non coupées des roselières coupées. D'une part parce que ces dernières sont asséchées deux fois dans l'année contrairement aux roselières non coupées qui subissent un assèchement estival et d'autre part, parce qu'elles ont une densité de tiges vertes significativement plus importante (Poulin et Lefebvre, 2002). La coupe a en effet pour conséquence d'enlever les tiges sèches et d'augmenter la densité des tiges vertes, si elle est réalisée dans des conditions durables, c'est-à-dire, avec un engin adapté à la portance du sol ou avec une machine à pneus basse pression pas trop chargée et selon un passage lent, et cela avant que la croissance des tiges vertes n'ait débuté soit normalement en mars. La hauteur des tiges vertes peut atteindre, par exemple, 50 cm en début de mois d'avril (G. Lefebvre, 2007, communication orale). La coupe peut également être responsable de la présence de feuilles vertes tard dans la saison (Sinnassamy et Mauchamp, 2001). La salinité, qui est typiquement plus élevée dans les roselières non gérées (coupées), limite la diversité végétale au profit du roseau, se traduisant par une forte monospécificité des phragmitaies, parfois comparable aux roselières exploitées (Poulin et Lefebvre, 2002). Une gestion des niveaux d'eau est également réalisée pour la chasse au gibier d'eau, qui se déroule en automne et en hiver, afin de favoriser le regroupement des populations de canards. Dans cette optique, les roselières sont mises en eau en général de juillet à mars (Poulin et al., 2002) et sont aménagées afin de disposer de zones d'eau libre (clairs de chasse) pour attirer les canards et favoriser le développement d'espèces végétales submergées constituant la base de leur alimentation (Mathevet, 2000). Un marais où la chasse et l'exploitation de la sagne sont réunis, combine les deux types de gestion hydrologique cités ci-dessus. La coupe est alors souvent retardée jusqu'au mois d'avril. Une gestion des niveaux d'eau pour le pâturage aura plutôt tendance à favoriser un assèchement des roselières d'avril jusqu'à septembre/octobre, période pendant laquelle le bétail parcourt généralement les marais (Mathevet, 2004). Le roseau est particulièrement apprécié par les bovins et les chevaux. Le maintien de la roselière et le pâturage sont peu compatibles, mais demeurent possibles si le pâturage est limité à un semestre tous les trois ans (Mesléard et Pérennou, 1996).

- **Avifaune caractéristique**

Contrairement au caractère monospécifique de la flore des phragmitaies, l'avifaune (et la faune de façon générale) est particulièrement riche et diversifiée dans ce milieu. Elles constituent notamment un habitat privilégié pour un grand nombre d'espèces considérées comme vulnérables. Ces espèces appartiennent pour la plupart à la famille des hérons et des passereaux. Le mode d'occupation et d'utilisation de la roselière diffère selon les espèces et des études ont mis en évidence certaines caractéristiques des phragmitaies liées à la présence de ces oiseaux dans cet habitat.

En Camargue, le héron pourpré (*Ardea purpurea*), migrateur trans-saharien, niche en colonies exclusivement dans les phragmitaies inondées et non exploitées (Barbraud et al., 2002). Il construit son nid au printemps (avril-mai) bien avant que le roseau de l'année ait terminé sa croissance. Il utilise les tiges sèches des années précédentes qu'il casse à une hauteur d'un mètre au-dessus du sol pour en faire un nid de 50 cm de diamètre environ et de plus de 20 cm d'épaisseur qui pourra accueillir un couple, les œufs puis les poussins ; quelques tiges vertes ont également été observées en fin de saison de reproduction qui laisse penser qu'elles servent également à consolider le nid (Barbraud et al., 2002). Des marques installées sur les nids de l'année précédente, montrent que les hérons pourprés peuvent utiliser les nids au moins deux années de suite (Davranche, non publié). Un certain niveau d'eau est nécessaire jusqu'à l'envol des poussins c'est-à-dire jusqu'à la deuxième quinzaine de juillet (Y.Kayser, 2004, communication orale) afin de réduire les risques de prédation des œufs et des poussins par les animaux terrestres (renard, putois, sanglier) (Barbraud et al., 2002). Un suivi par survol aérien des effectifs des colonies réalisé depuis 1980 montre une fluctuation de ces effectifs qui n'a pas été observé pour les autres populations d'Europe (Barbraud et Hafner, 2001 ; Isenmann, 2004). Depuis 1994, une décroissance quasiment annuelle et régulière est devenue inquiétante (Isenmann, 2004). L'explication de ces variations d'effectifs est difficile et peut découler de mauvaises conditions d'accueil tant sur les sites de nidification (Barbraud et Mathevet 2000) que sur les sites d'hivernage (Barbraud et Hafner, 2001).

Le butor étoile (*Botaurus stellaris*) ou « Grand butor » est une autre espèce vulnérable de la famille des Ardeidés inféodée à la roselière. Ses effectifs ont subi une diminution dans la moitié des pays européens entre 1970 et 1990 et la stabilisation observée depuis n'a pas encore compensé ce déclin. La Camargue constitue l'un des habitats principaux de ce héron

en France où il fréquente les roselières caractérisées par une couverture homogène mais éparse de tiges vertes et de tiges sèches accompagnées d'autres espèces végétales dans les marais d'eau claire peu profonds (Poulin et al 2005). En France, le butor étoilé est un migrateur partiel c'est-à-dire qu'il ne quittera ses zones de reproduction que si les gels hivernaux sont fréquents (Collectif, 2006). Le territoire de reproduction est sélectionné par le mâle qui attire les femelles par le chant. Il est ainsi polygame et ce sont les femelles qui s'occupent des jeunes. Le nid, posé au sol, prend la forme d'une plate-forme constituée en majorité de roseaux secs et d'autres espèces végétales trouvées aux alentours, son épaisseur étant tributaire du niveau d'eau. Le nid, qui mesure entre 23 et 50 cm de diamètre et 10 à 25 cm d'épaisseur, n'est pas détectable lors des survols aériens. Contrairement au héron pourpré, l'exploitation de la sagne n'est pas incompatible avec la reproduction du Butor étoilé (Isenmann, 2004 ; Poulin et al., 2005 ; Collectif, 2006).

Dans l'ordre des passereaux, certaines espèces dépendantes des roselières sont également particulièrement exigeantes sur la sélection de leur habitat. Ainsi la rousserolle turdoïde (*Acrocephalus arundinaceus*), espèce vulnérable en France, affectionne les roselières où les tiges ont un large diamètre or le « gros » roseau se retrouve en eau très douce où les fluctuations de niveaux sont importantes, ce qui peut expliquer la faible abondance de l'espèce en Camargue suite à la présence de sel et sa prédilection pour les roselières linéaires le long des canaux d'irrigation. La panure à moustache (*Panurus biarmicus*) se trouve dans les roselières où le roseau sec est particulièrement dense et fin, ce qui résulte souvent d'inondations permanentes ou d'une salinité relativement élevée. Son régime alimentaire est constitué en grande partie de larves aquatiques et elle préfère donc les roselières légèrement inondées au printemps. La lusciniole à moustaches (*Acrocephalus melanopogon*), vulnérable en Europe, est particulièrement abondante dans les massifs de phragmitaies abritant d'autres espèces émergentes comme le marisque, la massette, le scirpe et les carex. Elle est également attirée par les panicules des phragmites où se cachent de petites araignées qui constituent son régime alimentaire. Enfin, la rousserolle effarvate (*Acrocephalus surpaceus* L.) qui est l'une des espèces les plus abondantes, s'accommode très bien des roselières qui n'offrent pas de conditions favorables aux autres espèces (Poulin et al., 2002, Poulin et Lefebvre, 2002), avec une prédilection pour les roselières où le roseau vert montre une croissance précoce.

b - Les scirpaies

- **Description du milieu**

Nous entendons ici par scirpaies l'ensemble des groupements végétaux à scirpe (Annexe 8). On parle donc du petit scirpe ou scirpe maritime (*Bolboschoenus maritimus*) et des grands scirpes regroupant le scirpe littoral (*Schoenoplectus littoralis*) et le scirpe lacustre (*Schoenoplectus lacustris*). Les scirpaies, et notamment les développements de scirpe maritime, sont caractéristiques des marais temporaires alimentés par les eaux de pluie et soumis à une alternance de phases exondées et inondées, (Grillas, 1992 ; Molina, 1996 ; Medail et al., 1998). Si la biologie de reproduction du scirpe maritime a fait l'objet d'une thèse en Camargue (Charpentier 1998), les aspects associés à la phénologie³, à la structure et à la gestion des grands scirpes demeurent peu quantifiés. Nous nous sommes donc appuyés sur des données issues de communications orales d'experts de la Tour du Valat (F. Mesléard, P. Grillas, N. Yavercovski) et d'observations personnelles sur le terrain.

Les trois espèces de scirpe appartiennent à la famille des Cypéracées et sont caractérisées par une multiplication végétative importante et une reproduction par graine (Mesléard et Pérennou, 1996). Ces espèces végétales ont la particularité de développer, comme la plupart des cypéracées, des tiges de section triangulaire. La forme étant plus marquée chez le scirpe maritime et littoral que chez le scirpe lacustre. Les mesures que nous avons effectuées en Camargue montrent une hauteur maximale de 1.75 m pour le scirpe littoral., 0.95 m pour le scirpe lacustre et 0.90 m pour le scirpe maritime. On parle cependant de 1 à 2 mètres de hauteur en général pour les grands scirpes. Les premières tiges de scirpe émergent en février, et en fin mars de nouveaux rhizomes peuvent déjà donner naissance à de nouvelles tiges aériennes. Le développement de nouvelles tiges peut se faire jusqu'en septembre, notamment lorsque le marais est remis en eau pour la chasse. Le pic de croissance se situe vers la fin du mois de mai (scirpe maritime) ou fin juin (grands scirpes) selon les espèces. L'inflorescence est formée par des épillets ovoïdes aux écailles brun roux et aristées et donne des petits fruits bruns noirâtres. La sénescence progressive des parties aériennes commence à partir de la mi-juin (scirpe maritime) ou de la première quinzaine d'août (grands scirpes). Ainsi, au début du mois de septembre, la totalité de la végétation épigée est morte et forme une nécromasse de couleur rouille caractéristique, plus ou moins dense selon les espèces. Cette nécromasse est ensuite éliminée progressivement par le vent, les vagues ou le piétinement. Le scirpe maritime

croît en bordure des marais de 10 à 40 cm de profondeur en fin de printemps, le niveau d'eau optimal étant d'une vingtaine de centimètres. Dans les eaux plus profondes, le scirpe maritime est remplacé par les grands scirpes qui peuvent tolérer jusqu'à 5 mètres d'eau. Le scirpe maritime nécessite un assèchement estival, printanier et éventuellement de fin d'hiver mais selon une durée ne dépassant pas 4 à 6 mois, même si le sol reste humide dans les premiers centimètres de profondeur. Sans cet assèchement, il sera remplacé à terme par d'autres grandes émergentes comme le roseau et la massette (*Typha spp.*). Les scirpes tolèrent la salinité jusqu'à 20g/l et le scirpe maritime mieux que les autres espèces (Mesléard et Pérennou, 1996 ; Trangosi, 1996). Des espèces végétales submergées peuvent se développer en grande quantité dans les scirpaies de Camargue où l'on trouve notamment des herbiers de characées (*Chara spp.*) et de potamots (*Potamogeton spp.*)

- **Usages et gestion des niveaux d'eau**

Le scirpe a un intérêt particulier pour le pâturage des chevaux et des taureaux camarguais spécialement au printemps et en début d'été. Après le roseau, il est l'une des espèces végétales les plus appréciée des bovins. Bien qu'une inondation en période estivale tend à éliminer le scirpe maritime au profit d'espèces plus grandes, cette inondation permet également de le maintenir à court terme jusqu'en septembre pour le pâturage. (Mesléard et Pérennou, 1996)

- **Avifaune caractéristique**

Les scirpaies attirent principalement des populations de canards pour les graines de scirpes et les oogones (organe reproducteur femelle) des characées telles que les sarcelles d'hiver (*Anas crecca*), le canard souchet (*Anas clypeata*), le canard pilet (*Anas acuta*), et la sarcelle d'été (Tamisier et Dehorter, 1999). Les oies cendrées raffolent également des tubercules tout en ayant une préférence pour le scirpe maritime (Mesléard et Pérennou, 1996 ; Desnouhes, 2004). Les bécassines des marais utilisent les scirpaies comme sites de gagnage et de remise (Cf. I-B-2-c) . Les hérons y chassent les poissons (héron cendré), les amphibiens (héron crabier), et les invertébrés (aigrette garzette et Héron garde-bœuf) (Trangosi, 1996). Même si les scirpaies offrent un couvert végétal moindre que les phragmitaies, elles peuvent également être utilisées par le butor étoilé en période de nidification (Collectif 2006).

c - Surface de recouvrement en Camargue

En Camargue, les roselières peuvent couvrir des superficies de plusieurs centaines d'hectares notamment autour des étangs du Scamandre et du Charnier en Petite Camargue Gardoise. On les trouve également en surfaces plus petites autour de nombreux étangs (Isenmann, 2004). L'inventaire, réalisé par l'observatoire national des roselières (état des lieux en 2005, toutes espèces confondues), estime leur superficie totale à 12 400 ha en Camargue et, Mathevet et Sandoz (1999) parlent de 8 000 ha pour la surface recouverte par les phragmitaies et de 2000 ha pour la superficie de roselières exploitées. Ainsi la roselière n'est pas un milieu en voie de disparition mais les grands massifs sont dans certains cas en danger de morcellement.

2 - Les marais ouverts permanents des domaines privés

a - Description du milieu

Les domaines privés comportent en général plusieurs baisses¹ ou parcelles, dont la superficie est très variable (0.02 ha à 250 ha sur un échantillon de 42 plans d'eau) (Defos du Rau, non publié). Ce sont souvent des ensembles de marais dits « ouverts » qui ne sont pas recouverts d'une végétation émergente abondante ou semi-recouvrante. Ces marais ouverts sont généralement utilisés pour la chasse et ont tendance à être en eau en quasi permanence (Tamisier et Grillas, 1994, Mathevet, 2000 ; Defos du Rau, 2000, cette étude). L'eau y est plus ou moins libre selon le développement d'espèces végétales submergées. Les marais issus d'une dépression (ou baisses¹) présentent souvent une ceinture de roseaux, de massette ou de scirpe ou, si la salinité est un peu plus élevée, des développements de joncs et/ou salicornes. Ceux délimités par une digue seront en général bordés par des espèces plus terrestres telles que le tamaris (Annexe 8). La profondeur idéale pour l'accès des chasseurs est en général de 50 cm à 1 mètre, ils peuvent cependant présenter des dépressions importantes de plusieurs mètres (gestionnaire de marais de chasse, communication orale) et ont souvent un sol très vaseux du fait de la quasi-permanence de l'eau. La texture est majoritairement argileuse (Defos du Rau, non publié) avec une tendance argilo-sableuse dans les zones les plus au sud du delta. Ils ont la particularité de présenter un taux de salinité (jusqu'à 13g/l) bien inférieur aux milieux naturels camarguais car ils sont alimentés en général par de l'eau venant du Rhône (Grillas, 1992 ; Tamisier et Grillas, 1994 ; Defos du Rau, 2000 ; Mathevet, 2000). Pour

cette raison, ils présentent souvent un très fort recouvrement d'herbiers aquatiques ou plus communément appelés « la gratte » regroupant en majorité, selon un degré croissant de salinité, du myriophylle (*Myriophyllum spicatum*), potamot (*Potamogeton pectinatus*, *P. pusillus*) ou ruppia (*Ruppia maritima*) (Tamisier et Grillas, 1994 ; Defos du Rau, 2000 ; Davranche, non publié). Quelques characées ont également été observées lorsque les marais avaient subi un assèchement, mais elles sont généralement vite remplacées par les espèces citées ci-dessus plus compétitives dans ces milieux (Grillas, 1990). La densité d'herbiers peut être, par exemple, occasionnellement responsable de la noyade de jeunes anatidés. En période estivale des algues filamenteuses, que les gestionnaires de marais de chasse appellent communément « mousses », peuvent également se développer en grande quantité, donnant à la surface du marais un aspect mousseux vert, puis roussâtre plus tard dans la saison (Davranche, non publié). Ce dépôt d'algue sera évacué avec les premières pluies à l'automne. L'eau est en général très peu turbide car la densité d'espèces submergées limite les mouvements d'eau et la mise en suspension des particules sédimentaires. Certains marais sont gérés avec un écoulement lent et superficiel de l'eau ce qui participe également à la clarté de l'eau, effet recherché pour l'attraction des canards.

b - Gestion des niveaux d'eau

Ces marais sont en général gérés et aménagés dans le but d'attirer les populations d'anatidés (Tamisier et Grillas, 1994 ; Defos du Rau, 2000 ; Mathevet et Mesléard, 2002). Defos du Ros a, par exemple, définit quatre stratégies de gestion : la première consiste à maintenir l'eau en permanence sans assèchement estival naturel, la seconde intègre des assecs annuels par rotation des différentes baisses¹ ou parcelles, la troisième est basée sur le choix d'une ou deux vidanges par décennie, enfin la quatrième est observée sur les grandes propriétés où une part du fonctionnement naturel est préservé. Certains gestionnaires réalisent une alternance de l'assèchement des plans d'eau tous les deux ou trois ans. Le suivi des marais gérés pour la chasse par Tamisier et Grillas (1994) a montré que 81 % de ces marais étaient en eau au mois d'août de 1981 à 1991. Des interviews de propriétaires et gestionnaires de domaines de chasse camarguais révèlent que 80 % d'entre eux n'effectuent pas d'assèchement estival systématique (Mathevet, 2000). Un suivi de la mise en eau de 40 marais sélectionnés par tirage aléatoire sur une vingtaine de domaines de chasse, réalisé par survols aériens mensuels (résultats présentés de 2003 à 2005), montre que l'assèchement total en période estivale

n'atteint pas les 20 % sur les trois premières années de suivi (Figure 5). On observe cependant une baisse¹ des niveaux du printemps à l'automne pour 25 à 30 % des marais. (Davranche, Lepley, Mouronval, Mondain-Monval, non publié). La tendance générale demeure donc à une mise en eau quasi-permanente.

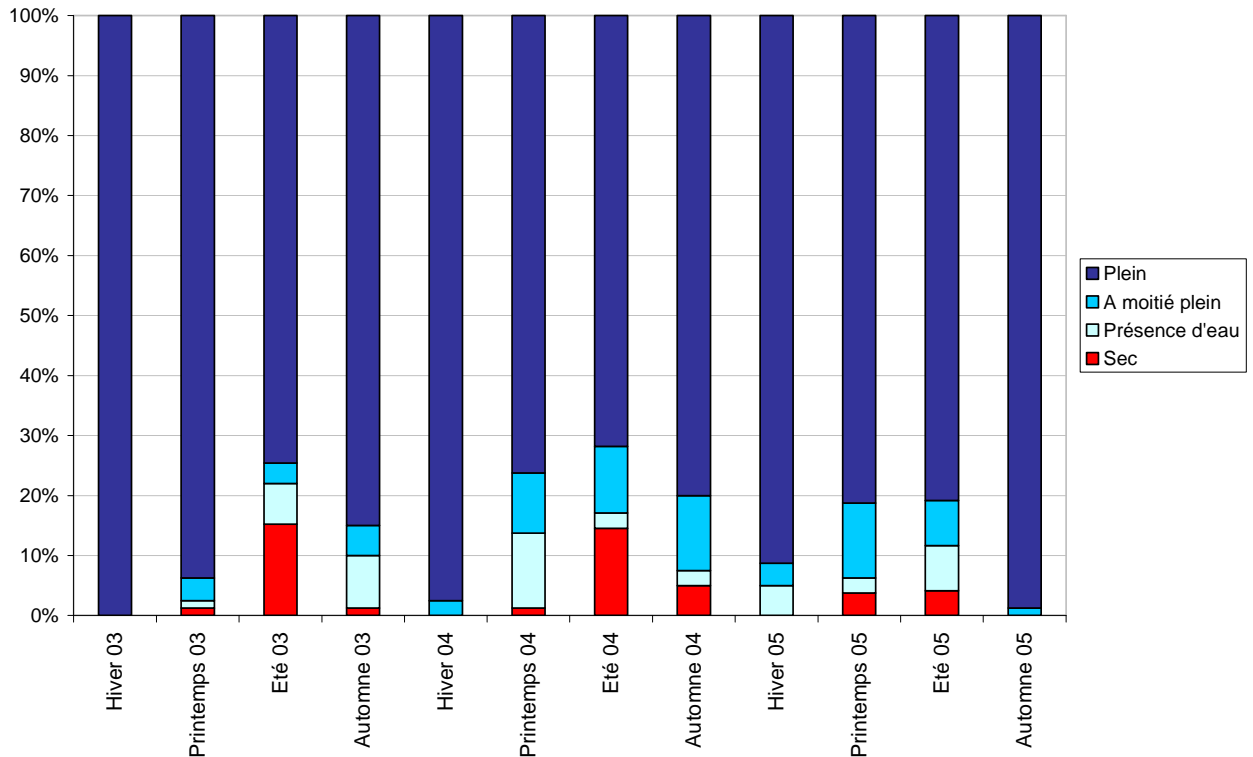


Figure 5 : Suivi de la mise en eau d'une vingtaine de marais ouverts pour la chasse de 2003 à 2005. Résultats présentés en pourcentage du nombre de marais selon le niveau d'eau.

c - Avifaune caractéristique

La gestion des niveaux d'eau étant effectuée à leur attention pour l'hiver, ce sont évidemment les populations d'anatidés qui sont les plus abondantes dans ces marais. Les foulques macroules (*Fulica atra*) de la famille des rallidés y sont également nombreuses. Dix espèces d'anatidés présentent un effectif important. Ce sont le canard colvert (*Anas platyrhynchos*), les sarcelles d'été (*Anas quequedula*) et d'hiver (*Anas crecca*), le canard pilet (*Anas acuta*), le canard chipeau (*Anas strepera*), le canard siffleur (*Anas penelope*), le canard souchet (*Anas clypeata*), le fuligule milouin (*Aythya ferina*) et la nette rousse (*Netta rufina*) (Isenmann, 2004). Ces espèces peuvent être regroupées en granivores (colvert, sarcelle, pilet), herbivores

(chipeau, siffleur, nette rousse, milouin, foulque) et zoophages (souchet) (Tamisier et Dehorter, 1999) (Annexe 7). La gestion hydrologique des marais de chasse a pour objectif de favoriser le développement des herbiers aquatiques qui offrent les ressources (plantes, graines, invertébrés) nécessaires à l'alimentation des canards. Ces oiseaux occupent les marais selon deux modes. La journée, ils sont grégaires et se regroupent parfois par milliers sur des zones tranquilles appelés remises diurnes. En début et fin d'hiver, ces marais sont généralement caractérisés par un dérangement minimal et une ressource alimentaire abondante telle que peuvent l'être les plans d'eau des grandes propriétés de chasse. La nuit les canards se dispersent sur l'ensemble des zones disponibles dites « de gagnage » dans le but de s'alimenter (Mathevet, 2000 ; Isenmann, 2004). Ainsi, la chasse s'effectue essentiellement le soir, à la passée, au moment où les canards quittent le lieu de repos (remise), pour le lieu d'alimentation nocturne (gagnage), ou le matin quand les canards rentrent sur leur lieu de repos.

C - La télédétection¹³ au service d'un monitoring nécessaire des zones humides camarguaises

1 - Un constat de perte de biodiversité camarguaise due à l'intervention accrue de l'homme

Plusieurs études font état des conséquences directes ou indirectes d'une artificialisation accrue des habitats de Camargue sur la biodiversité floristique et avifaunistique (Picon, 1988 ; Tamisier et Grillas, 1994 ; Aznar et al., 2000 ; Barbraud et Mathevet, 2000 ; Chauvelon et Mathevet, 2000 ; Mathevet et al., 2002 ; Isenmann, 2004 ; Schmidt et al., 2005). Les phénomènes observés dans les roselières et marais de domaines privés sont ainsi le reflet des aménagements hydrauliques liés aux activités économiques camarguaises.

Dans les roselières, l'intensification de l'exploitation de la sagne modifie, d'une part, la structure et la composition floristique de cet habitat (Poulin et al., 2002) et affecte, d'autre part, la nidification et l'abondance de son avifaune caractéristique et vulnérable (Barbraud et Mathevet, 2000 ; Poulin et Lefebvre, 2002 ; Poulin et al., 2002). Le développement de la chasse y apporte une gestion à l'opposé des variations naturelles qui tend également à diminuer les ressources alimentaires de certaines espèces d'oiseaux en limitant, par exemple,

la superficie de la zone d'alimentation par la création de clairs de chasse (Poulin et al., 2002). Les roselières subissent alors une double pression cumulant les effets de l'exploitation de la sagne à ceux des aménagements liés à la chasse. A cela peut s'ajouter la pression de pâturage contre laquelle des mesures agri-environnementales ont été mises en œuvre, mais dont l'effet ne semble pas correspondre totalement à celui souhaité initialement (Mathevet, 2004 ; Arques et al., 2007)

Les marais des propriétés privées tendent, quant à eux, vers une banalisation du milieu avec notamment une plus forte proportion d'herbiers aquatiques monospécifiques (Tamisier et Grillas, 1994 ; Defos du Rau, 2000). Cette perte de diversité floristique est soupçonnée d'avoir un impact sur la diversité avifaunistique de ces marais (Defos du Rau, 2000). Depuis quelques années, on assiste à une augmentation des activités cynégétiques liées aux oiseaux d'eau. La chasse, très rentable économiquement parlant, et en augmentation, occupe au moins 35 000 ha de l'espace camarguais (Defos du Rau, 2000 ; Mathevet, 2004). Les réseaux d'irrigation et de drainage initialement réalisés pour l'agriculture servent aujourd'hui à alimenter des marais que l'on a fractionné par des digues et des canaux afin de mieux contrôler leur mise en eau. Les vidanges des marais peuvent être l'occasion de réaliser des travaux d'abrasement de la salicorne, de nivellement des sols et de destruction des rhizomes et racines, ou d'aplatissement au sol des émergentes pour conserver l'ouverture du marais (Isenmann, 2004). La majorité des domaines de chasse privés sont équipés de pompes pour assurer la mise en eau des marais avant la période de chasse et maintenir la permanence en été. On assiste donc à une augmentation des superficies de marais en eau douce permanente, certaines zones de végétation terrestre étant même endiguées pour devenir des « marais à canards » (Isenmann, 2004). Or, la gestion hydraulique favorisant les eaux douces a également pour conséquence le développement d'espèces exotiques envahissantes comme la jussie (*Ludwigia sp*) (Aznar et al., 2000 ; Beck et Thibault, 2004). Son étendue devient inquiétante et déplaît fortement aux gestionnaires de domaines de chasse car elle est capable de recouvrir un marais entier en une saison et n'est pas très appréciée des anatidés et rallidés.

Petit à petit, ce constat de banalisation des habitats camarguais devient une source de questionnements et d'attentes en matière de conseils et recommandations de la part des gestionnaires de domaines publics ou privés. Il amène également les scientifiques à envisager des méthodes pluridisciplinaires pour identifier les pratiques de gestions hydrauliques et les jeux des acteurs sociaux, afin de comprendre leurs conséquences sur le milieu biophysique (Chauvelon et Mathevet, 2002 ; Isenmann, 2004 ; Mathevet, 2004).

2 - La géomatique au service du monitoring des zones humides

L'augmentation de la résolution et des capacités des nouveaux capteurs permet aujourd'hui d'aborder la biodiversité et la conservation des habitats selon des aspects de plus en plus diversifiés. La télédétection¹³ offre la possibilité de considérer les espèces ou les communautés d'espèces végétales et apporte une information sur la diversité de celles-ci par la prise en compte de paramètres environnementaux comme la production primaire liée à la richesse spécifique, la distribution spatiale, ou encore la structure et la topographie (Turner et al., 2003). La télédétection¹³ est ainsi un bon outil pour l'obtention de données reflétant les interactions entre l'homme et son environnement pour comprendre la relation entre l'occupation du sol et l'utilisation du milieu.

Selon la précision de l'échantillonnage et des données issues des images satellitales, la classification de l'occupation du sol peut permettre d'identifier des habitats très spécifiques (Kerr et Ostrovsky, 2003). Dès 1974, la télédétection¹³ par photographie aérienne a été utilisée pour la cartographie des zones humides (Cowardin et Myers, 1974), mais pour leur conservation et leur gestion, la télédétection¹³ satellitale présente de nombreux avantages, notamment pour de grandes superficies (Ozesmi et Bauer, 2002). Elle apporte une information utile à la détection des changements de la végétation caractéristique de ces milieux (Arzandeh et Wang, 2003).

Tous les types de zones humides ont été identifiés à l'aide de l'imagerie satellitale. Landsat MSS, TM et SPOT sont les satellites les plus utilisés (Ozesmi et Bauer, 2002). Les capteurs actifs tels RADARSAT permettent d'obtenir une donnée en situation nuageuse et, couplés aux satellites multispectraux, ils améliorent la classification des zones humides (Smith, 1997, Töyrä et al., 2002). Cependant ces données sont coûteuses et leur acquisition plus contraignante que les nouveaux capteurs passifs tels SPOT pour lesquels l'augmentation de la périodicité des passages et la possibilité d'une visée de part et d'autre du nadir, permettent aujourd'hui d'envisager des suivis réguliers en évitant les jours où le couvert nuageux est gênant (Jensen et al., 1993b). La présence de vent et de végétation émergente peut également rendre difficile la discrimination des zones d'eau libre à l'aide de données issues de capteurs actifs (Smith, 1997 ; Sandoz et al., 2003). La répétitivité des données satellitales de capteurs passifs permet également d'envisager des suivis sur plusieurs années (Al-Khudairy et al., 2002 ; Gullström et al., 2006).

Bien que LANDSAT peut présenter l'inconvénient d'une résolution de plusieurs mètres (MSS : 80 m, TM : 30 m), du fait de la production de pixels mixtes (Ramsey et Jensen, 1996 ; Smith, 1997 ; Ozesmi et Bauer, 2002), il reste un bon outil d'évaluation des niveaux d'eau sur une zone de végétation homogène. Lorsque le développement est hétérogène, il est suggéré que SPOT, du fait de la finesse de sa résolution (jusqu'à 5 m), pourrait être plus utile (Al-Khudairy et al., 2002).. En lien avec le suivi de la faune caractéristique des zones humides, ces satellites peuvent être le support de l'identification d'habitats potentiels. LANDSAT TM a par exemple été utilisé pour les amphibiens du parc du Yellowstone (Wright, 2004), ou encore LANDSAT TM ou SPOT pour cartographier les surfaces de développement en macrophytes submergés, comme zones de ressources alimentaires sur la voie de migration de certaines espèces d'anatidés (Beekman et al., 1996).

Les herbiers aquatiques, pour leur sensibilité à la qualité de l'eau et leur importance pour ces populations, représentent également, par l'intermédiaire de leur cartographie, un outil de compréhension du statut des zones humides (Ackleson, 1987 ; Dekker et al., 2005 ; Ciraolo et al., 2006). Leur classification est possible avec de bons résultats pour un recouvrement dense et une faible profondeur de submersion à l'aide de capteurs passifs multispectraux (Ackleson, 1987). Cette cartographie est améliorée par l'utilisation de capteurs hyperspectraux dans les eaux peu profondes (Ciraolo et al., 2006). Les problèmes rencontrés lors de la cartographie des macrophytes submergées résident le plus souvent dans la profondeur de submersion, conséquence d'une atténuation de leur réponse spectrale par l'eau ainsi que la mise en mouvements des sédiments (Ackleson, 1987 ; Lieutaud et Puech, 1996 ; Vis et al., 2003). Cependant, des modèles ont été développés afin d'intégrer les données de turbidité et de profondeur (Lieutaud et Puech, 1996 ; Puente, 2004 ; Puech et al., 2005).

Le suivi des espèces émergentes par télédétection¹³ peut également être un outil d'évaluation de la qualité des eaux (Tilley et al., 2003). Plusieurs auteurs ont recommandé un mois ou une saison particulière pour la classification des grandes émergentes. Pour les phragmitaies, la sélection de la date semble plus importante que l'utilisation d'un canal dans le moyen-infra rouge qui représente pourtant un paramètre essentiel dans leur classification (Arzandeh et Wang, 2003). Laba et al. (2005) conseillent d'utiliser le mois d'août pour la différenciation des différentes espèces d'émergentes. Durand (2000 dans IFEN-ONCFS, 2005) conseille d'utiliser une image au printemps pour les roselières mais d'autres parlent plus spécifiquement du mois de décembre pour les phragmitaies (IFEN-ONCFS, 2005). Gao et

Zhang (2006) présentent des spectres différents permettant de différencier les espèces végétales caractéristiques des zones humides au cours du printemps, de l'été et de l'automne. En ce qui concerne le capteur employé, il apparaît que les développements homogènes d'émergentes peuvent être cartographiés à l'aide d'images ayant une résolution jusqu'à plusieurs dizaines de mètres qui offre quand même la possibilité d'une distinction des espèces (Arzandeh et Wang, 2003 ; Pengra, 2005 ; Ramesh et Latchininsky, 2007).

Une résolution fine n'est donc pas forcément nécessaire pour obtenir une bonne cartographie des macrophytes aquatiques mais le mode multitemporel l'améliore considérablement (Ramesh et Latchininsky, 2007). Plusieurs auteurs ont, en effet, recommandé d'utiliser des données multitemporelles (Ozesmi et Bauer, 2002) ainsi qu'un échantillonnage sur le terrain (Shuman et Ambrose, 2003) qui augmente la précision de la classification. La détection des espèces submergées en eaux profondes est également améliorée lorsqu'elle est basée sur le mode multitemporel (Wolter et al., 2005 cités par Xiaojun, 2005). Dès 1974, Cowardin et Myers conseillaient déjà d'utiliser des données en multi-date pour une meilleure classification des zones humides.

Du point de vue de la méthodologie employée pour l'étude des zones humides, les méthodes de classification non supervisée et supervisée par maximum de vraisemblance sont les plus utilisées. Ces classifications traditionnelles posent cependant un problème de reproductibilité, comme par exemple dans des zones fortement anthropisées, en évolution rapide (Maheu-Giroux et De Blois, 2005). De plus, de nouveaux algorithmes sont continuellement développés permettant d'améliorer la précision tout en offrant, pour certains, une vision plus claire des résultats et une possibilité de découverte de nouvelles connaissances en télédétection (Ozesmi et Bauer, 2002 ; Gomez-Chova et al., 2003 ; Berberoglu et al., 2004 ; Baker, 2006).

Du côté des données issues des images, de nouveaux outils tels les indices multispectraux sont de plus en plus mis en œuvre pour l'étude des milieux humides. Les premiers ont été des indices de végétation avec notamment le NDVI (Voir Bannari et al., 1995). Ces indices offrent aujourd'hui la possibilité de suivre les superficies en eau (Gao 1996 ; Mc Feeters 1996 ; Gond, 2004 ; Xu, 2006 ; Ordoyne et Friedl, soumis), le contenu en eau de la végétation ou le stress hydrique, qui sont des paramètres importants pour le suivi des zones humides. Ils peuvent également servir à modéliser des paramètres biophysiques de la végétation de milieux

humides (Bannari et al., 1995 ; Slocum et Perry, 2002 ; Yang et Chen, 2004 ; Beget et Di Bella, 2007) ou bien sont représentatifs de la richesse spécifique (Rocchini et al., 2004).

Cependant, le mode multispectral apporté par SPOT (jusqu'à 4 canaux) ou LANDSAT (jusqu'à 7 canaux) ou les satellites hyperspectraux de dernière génération, permet également de tester et de comprendre le lien de chaque bande spectrale avec les caractéristiques de la végétation et de sa phénologie³. Ainsi le proche infrarouge et le visible semblent importants pour différencier les émergentes tels phragmites et scirpes (Ullah et al., 2000). Slocum et Perry (2002) ont également montré, à l'aide de régressions multiples, que la biomasse des phragmitaires peut être suivie par certains canaux du visible et du proche infrarouge. On voit apparaître ici une méthode statistique couramment utilisée en écologie appliquée à des données de télédétection¹³.

Les outils écologiques sont donc maintenant combinés aux méthodes de la géomatique. Un échantillonnage sur le terrain précis couplé aux données de télédétection¹³ peut par exemple améliorer le monitoring des zones humides (Berberoglu et al., 2004). En intégrant les données GPS (Global Positioning System) à la vision synoptique de la télédétection¹³ dans un SIG (Système d'Information Géographique), on peut également améliorer le suivi de ces milieux notamment dans des zones parfois difficiles d'accès sur le terrain. L'utilisation du SIG permet, en compilant un ensemble de données géo-référencées, de comprendre les phénomènes qui interviennent dans les milieux humides, de faciliter la communication des résultats scientifiques aux gestionnaires et politiques, et ainsi d'optimiser leur gestion et conservation (Lehmann et Lachavanne, 1997).

Ainsi, pour le monitoring des zones humides, la géomatique est capable d'offrir, aujourd'hui, des capteurs plus performants présentant une répétitivité d'acquisition et une meilleure résolution tout en conservant une couverture globale de la zone d'étude sur un nombre limité d'images. De nouvelles méthodes apparaissent également permettant d'envisager une meilleure reproductibilité des outils et un lien plus fort avec les suivis écologiques. Les modes multispectral et multitemporel semblent être optimaux pour différencier les espèces végétales caractéristiques des zones humides. Enfin, l'utilisation de logiciels de SIG permet d'envisager une simplification des supports de communication en vue de l'optimisation de la gestion de ces milieux notamment pour la conservation de l'avifaune qui y est rattachée.

3 - Les objectifs de suivi de la gestion des zones humides camarguaises par télédétection¹³ en référence à leur intérêt avifaunistique

En Camargue, l'évolution constante des habitats liée à la salinité, la gestion des niveaux d'eau, la montée du niveau de la mer et les activités économiques demandent des études répétitives et fréquentes. Les objectifs de monitoring des habitats camarguais sont de différents types, étant liés aux activités économiques et à la gestion des niveaux d'eau qui en découle. L'exploitation du roseau et la chasse exercent une pression de plus en plus importante sur les roselières. Une cartographie de leurs superficies est nécessaire pour suivre leur évolution afin de mettre en évidence leur progression, régression ou atterrissement.

L'avifaune pourrait également être menacée par l'évolution de leur structure et biomasse. Or les espèces paludicoles semblent sélectionner leur habitat selon des paramètres hydrologiques et de structure végétale des phragmitaies. Un suivi de la qualité et de l'intérêt avifaunistique des roselières, en relation avec les aménagements pour la chasse, l'exploitation de la sagne et les caractéristiques sélectionnées par les populations d'oiseaux, sur l'ensemble des phragmitaies de Camargue, pourrait permettre d'apporter des outils d'aide à leur conservation. Dans les marais de chasse privé, la tendance à une homogénéisation des milieux est également susceptible d'être responsable d'une perte de biodiversité. D'un côté les gestionnaires pensent attirer les populations d'anatidés par une gestion quasi permanente de l'eau, d'un autre côté, les scientifiques montrent du doigt la diminution de ces populations avec l'augmentation de l'aménagement des marais pour la chasse (Isenmann, 2004). S'il n'y a pas de canards sans eau, il reste que les mises en eau permanentes peuvent entraîner une dégradation des herbiers à moyen et long-terme (Grillas, 1992 ; Tamisier et Grillas, 1994 ; Defos du Rau, 2000).

La question se pose alors : quels outils pourraient permettre de démontrer l'intérêt des assèchements estivaux aux gestionnaires de domaines privés tout en permettant aux scientifiques d'évaluer les conséquences de l'augmentation des activités cynégétiques en Camargue ? Une évaluation de la distribution spatiotemporelle des herbiers de marais privés camarguais, couplée à un suivi de la mise en eau pourrait apporter une solution efficace. Un monitoring à long terme comme il s'avère nécessaire en Camargue, basé sur des méthodologies écologiques, apparaît cependant très coûteux tant au niveau du matériel et du personnel qu'en temps de travail, d'autant que la moitié des marais camarguais sont en domaines privés (Mondain-Monval., communication orale), ce qui limite l'accès et demande

une planification longue. Tout l'intérêt de ce type de monitoring réside donc dans la possibilité d'obtenir une méthode reproductible même en cas d'évolution rapide du milieu et de pouvoir s'affranchir d'un échantillonnage lourd sur le terrain.

Peut-on alors envisager la mise en œuvre de ce type de suivi en Camargue au moyen de la géomatique? Gagnier et al (1988) avaient déjà noté l'intérêt de la télédétection¹³ pour l'analyse du delta camarguais. Plusieurs études montrent qu'il est possible de cartographier les développements homogènes de grandes émergentes à l'aide de données satellitales (Jensen et al., 1993a ; Arzandeh et Wang, 2003 ; IFEN-ONCFS, 2005 ; Maheux-Giroux et De Blois, 2005 ; Pengra, 2005 ; Sivanpillai et Latchinninsky, 2007) et différents paramètres permettent d'envisager une bonne cartographie des herbiers aquatiques des marais de chasse privés. Les marais présentent généralement un recouvrement dense et mono-spécifique, facilement identifiable sur des images satellitales (Ackleson, 1987 ; Ciruolo et al., 2006) ; ils sont de faible profondeur ce qui facilite en général la classification des espèces submergées (Ackleson, 1987) ; la présence d'herbiers et la petite taille des marais limitent la turbidité contrairement aux milieux lagunaires comme le Vaccarès (Puente, 2004) ; et enfin, il semble que les espèces qui se développent dans ces marais soient différenciables par télédétection¹³ (Beekman et al., 1996 ; Pinnel, 2007). Les outils statistiques de l'écologie, couplés à des protocoles d'échantillonnage sur le terrain, peuvent également répondre à des paramètres biophysiques de la végétation et laissent envisager la possibilité de caractériser la structure de groupements homogènes d'émergentes telles que les phragmitaies en relation avec la sélection du milieu par l'avifaune.

Parmi les outils et méthodes disponibles aujourd'hui, que peut-on envisager d'utiliser pour l'étude des zones humides camarguaises ? Les indices multispectraux peuvent être de bons outils pour le monitoring des zones humides de Camargue (Poulin et al., 2007). Cependant on peut leur reprocher une limitation de l'information extraite des images car leur calcul ne prend en compte que quelques canaux. On peut alors les combiner pour augmenter la puissance de détection (Gond, 2004). Cela offre de bons résultats, même si, là encore, on se limite à certains indices sélectionnés arbitrairement. Il ne faut pas oublier également, le rôle majeur, selon plusieurs auteurs (Zhang, 1998 ; Valta-Hulkkonen et al., 2003 ; Schmidt et Skidmore, 2003 ; IFEN-ONCFS, 2005 ; Gao, 2006), des différents canaux tels que le proche infrarouge ou le visible ainsi que les données multitemporelles (Gao, 2006) dans la discrimination d'espèces aussi caractéristiques des marais camarguais. Il serait donc intéressant de pouvoir

évaluer la capacité de la combinaison des indices multi-spectraux aux données issues des différentes bandes spectrales enregistrées sur plusieurs dates. La question se pose alors de savoir quels indices, canaux et dates, et quelles combinaisons d'indices, canaux et dates pourraient être optimaux pour les objectifs de monitoring des habitats de Camargue. En effet, les auteurs parlent de plusieurs dates importantes pour une même espèce (Azandeh et Wang, 2003 ; Laba et al., 2004 ; Durand, 2000 dans IFEN 2005 ; Pengra, 2005 ; Gao, 2006). On peut alors également se demander quelle est, dans la réponse spectrale, la part de l'influence d'une phénologie³ différente selon les régions observées et celle des activités humaines sur le milieu naturel (Caillaud et al., 1991).

Quelles variables issues de la télédétection¹³ seront les plus pertinentes pour les habitats de Camargue? Il apparaît ici la nécessité d'utiliser un outil statistique capable de prendre en compte un grand nombre de variables afin de sélectionner les plus performantes. La question du type de capteur à utiliser s'impose ensuite. Ce satellite doit pouvoir répondre à l'obtention de l'ensemble des données citées ci-dessus soit : des images couvrant la totalité de la Camargue afin de limiter les coûts d'acquisition des images, une périodicité élevée des passages sur la zone afin d'optimiser les données, et une large gamme de longueurs d'onde allant au minimum du visible à l'infrarouge moyen. La résolution des images nécessaires reste également à définir.

Ainsi l'objectif général de cette étude est de mettre au point, au moyen de la géomatique, des outils reproductibles offrant la possibilité, à long terme, de suivre l'évolution spatiotemporelle, tant qualitativement que quantitativement, de communautés végétales dominantes de Camargue et d'évaluer les stratégies de gestion des niveaux d'eau qui sont appliquées dans les marais camarguais, tout en s'affranchissant d'un échantillonnage long, coûteux et difficile sur le terrain. Pour l'élaboration de modèles reproductibles répondant à cet objectif, une identification des variables descriptives pertinentes intégrant les modes multispectral et multitemporel est nécessaire.

II - Méthodologie et données

La méthodologie est basée sur trois aspects : l'échantillonnage, la télédétection¹³ et la modélisation statistique (Figure 6). D'une part, nous avons établi un protocole de relevés et de mesures sur le terrain adapté aux contraintes de notre zone d'étude et au mode d'acquisition des images satellitales. D'autre part, nous avons effectué une série de traitements de ces images à partir desquelles nous avons défini des variables. Cette étape est rendue possible grâce à l'utilisation d'un système d'information géographique. Des traitements statistiques ont ensuite permis de mettre au point des formules combinant les images pour obtenir des informations spatialisées répondant à nos objectifs. Notre méthodologie est développée sur deux années, la première utilisée comme échantillon test⁵ tandis que la seconde a servi de validation à partir d'un échantillonnage indépendant.

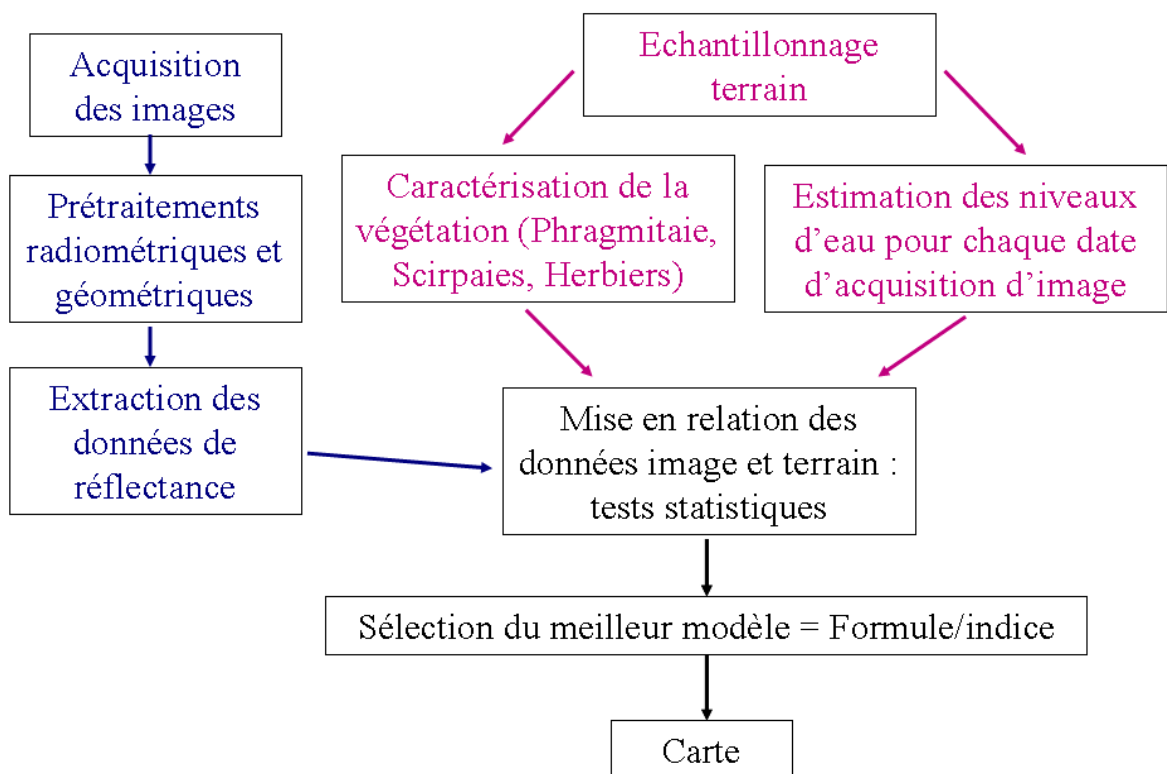


Figure 6 : Schéma de la méthodologie employée