A. SANDOZ

Cemagref

Unité Mixte de Recherche
« Structures et Systèmes Spatiaux »
Cemagref-Engref

TOUR DU VALAT

Aix en Provence,
Année universitaire 2002-2003

Université de Provence (Aix-Marseille I)
U.F.R. des sciences géographiques et de l'aménagement

CONTRIBUTION A L'ÉLABORATION D'INDICATEURS SPATIAUX POUR LE SUIVI DES HABITATS NATURELS PAR UTILISATION D'INDICES DE STRUCTURE DU PAYSAGE : Application à la Grande Camargue

Nicolas MILHÉ

DEA « Structures et dynamiques spatiales »

Sous la direction de : Jean-Pierre Chéry, Valérie Prosper-Laget et Alain Sandoz

Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon

CN 2000+

CONTRIBUTION A L'ELABORATION D'INDICATEURS SPATIAUX POUR LE SUIVI DES HABITATS NATURELS PAR UTILISATION D'INDICES DE STRUCTURE DU PAYSAGE :

Application à la Grande Camargue

Nicolas MILHE

DEA « Structures et dynamiques spatiales »

Sous la direction de : Jean-Pierre Chéry, Valérie Prosper-Laget et Alain Sandoz

Maison de la Télédétection en Languedoc-Roussillon

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de mon mémoire.

Je tiens particulièrement à remercier les deux personnes qui m'ont permis d'effectuer ce stage au sein des deux laboratoires de recherche :

- Jean-Pierre Chéry, maître de conférences ENGREF au sein de l'UMR 3S pour les nombreux conseils qu'il m'a apporté tout au long du stage et pour nos longues discussions sur l'approche du géographe face à des problématiques environnementales ;
- Alain Sandoz, chargé de recherche en géomatique à la Tour du Valat, pour son soutien sans faille tout au long de mon travail ainsi que pour sa grande disponibilité pour répondre à mes questions.

Je remercie également l'ensemble du personnel de la Maison de la Télédétection et de la Tour du Valat qui ont toujours répondu présent lorsque j'avais des problèmes dans mon travail. Je pense notamment à Michel Deshayes, chef du projet EON 2000+ en Camargue, Jean-Stéphane Bailly, ingénieur ENGREF, pour toutes les discussions que nous avons eues ainsi que Bruno Roux, stagiaire à la MTD, pour les traitements effectués sur les images du drône et les bons moments passés ensemble.

Enfin, je remercie tous les stagiaires et doctorants de la Maison de la Télédétection pour leur bonne humeur.

RESUME

L'objectif du projet européen EON 2000+ (Earth Observation for Natura 2000+) est d'analyser l'évolution des sites Natura 2000 via la mise en œuvre d'indicateurs environnementaux issus de la télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques.

A l'interface de l'écologie et de la géographie, cette étude propose d'analyser l'espace naturel à l'aide d'une démarche et d'outils issus de l'écologie du paysage. Nous montrons ainsi l'intérêt de cette approche pour la mise en place d'indicateurs spatiaux d'état pour le suivi des habitats naturels en Camargue.
Nous nous interrogeons ainsi sur les critères qui permettent de définir si une mesure de la structure du paysage peut être considérée comme indicateur. En outre, nous proposons une série d'indicateurs dont nous avons tenté de tester la pertinence en les confrontant à différents scénarii d'évolution du milieu.

Enfin, nous concluons sur la nécessité d'approfondir cette démarche exploratoire, notamment à l'aide des retours terrain des gestionnaires concernant les indicateurs proposés qui semblent répondre à certaines de leurs attentes.

Mots clés :

Indicateurs spatiaux, écologie du paysage, analyse spatiale, Camargue, suivi, habitats naturels, Base de données.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Représentation du niveau classe 3
Figure 2 : Impact des limites du paysage sur..... 4
Figure 3 : Exemple de mosaïque du paysage 5
Figure 4 : Tableau des besoins et données associées (source : Projet EON 2000+) 10
Figure 5 : Localisation des sites d'étude (Réserve Naturelle de Camargue et Tour du Valat) 14
Figure 6 : Localisation de la zone d'étude sur la RNC..... 15
Figure 7 : MNA des Cerisières..... 16
Figure 9 : Localisation de la zone test et du MNA sur les Cerisières..... 17
Figure 10: Zone de référence..... 19
Figure 12 : Tableau récapitulatif de l'évolution des habitats en fonction des scenarii 22
Figure 17 : Carte toponymique de la Tour du Valat (d'après Pineau & Sinassamy, 1996) et localisation de la zone d'étude (encadré rouge)..... 30
Figure 18 : Répartition des habitats en fonction des altitudes..... 31

SOMMAIRE

INTRODUCTION 1
I. PRESENTATION DU VOCABULAIRE ET DES CONCEPTS EMPLOYES 2
I.1. Une approche paysagère du milieu : entre géographie et écologie 2
I.1.1. L'apport de l'écologie du paysage pour le suivi des habitats « naturels » 2
I.1.2. Une analyse du paysage à trois niveaux 2
I.1.2.1. Le niveau tâche : 2
I.1.2.2. Le niveau Classe : 3
I.1.2.2. Le paysage : 5
I.2. Les notions d'habitats et d'indicateurs, objets de notre étude 6
I.2.1. Qu'est ce qu'un habitat ? 6
I.2.1.1. Bien s'accorder sur la définition 6
I.2.1.2. La dimension spatiale de l'habitat 6
I.2.2. Les indicateurs 6
I.2.2.1. Définition d'un indicateur 6
I.2.2.2. Les différents types d'indicateurs 7
I.2.2.3. Caractéristiques d'un bon indicateur 7
II. LES INDICATEURS SPATIAUX ET LE SUIVI DES HABITATS NATURA 2000 EN CAMARGUE 9
II.1. Natura 2000 et le projet européen EON 2000+ 9
II.2. Répondre à des besoins exprimés par les gestionnaires 9
II.2.1. Les gestionnaires 9
II.2.2. Les besoins en outils de surveillance 9
II.3. Les indicateurs spatiaux 11
II.3.1. Exemples d'indicateurs proposés dans le cadre du projet EON 2000+ en Camargue : travaux d'E. Salles et O. Léonard au sein de l'UMR 3S 11
II.3.1.1. Le travail d'E. Salles 11
II.3.1.2. Les indicateurs proposés par O. Léonard 12
II.3.1.3. Positionnement par rapport aux précédents travaux 12
II.4. L'outil de calcul : le logiciel Fragstat 13
III. PROPOSITION D'INDICATEURS ET ANALYSE 14
III.1.Démarche et bases de données 14
III.1.1. Cartographie des habitats de la Réserve Naturelle de Camargue (voir en annexe) 14
III.1.2. Les données sur la Tour du Valat 15
III.1.2.1.. La cartographie de la végétation (voir en annexes) 15
III.1.2.2. Modèle Numérique d'Altitude (MNA) 16
III.1.2.3. Photo aérienne infrarouge prise d'un « drône » 16
III.2. Evaluation de la pertinence d'indices sur la RNC par « simulation » 17
III.2.1. Démarche employée pour évaluer la structure du paysage 17
III.2.2. Présentation des résultats 20
III.2.2.1. La superficie des classes d'habitat 20
III.2.2.2. Part des surfaces des habitats dans le paysage 22
III.2.2.3. Le « Patch density » (PD) 23
III.2.2.4. ' Largest Patch Index" (LPI) et mesure de la fragmentation 24
III.2.2.5. Le Landscape Shape Index (LSI) 25
III.3. L'altitude peut-elle être considérée comme un indicateur ? Exemple de la Tour du Valat 29
III.3.1. La démarche 29
III.3.2. Présentation de la zone d'étude 29
III.3.3. Les résultats obtenus et questionnements 31
IV. BILAN 33
IV.1. Des indicateurs spatiaux pertinents ? 33
IV.1.1. Indicateurs testés sur la RNC 33
IV.1.2. Analyse de la répartition 33
IV.1.3. Des indicateurs à ne pas négliger 33
IV.2. Démarche et outils « expérimentaux » 34
IV.2.1. La démarche 34
IV.2.2. Expérimentation de nouveaux outils de télédétection 34
CONCLUSION 36

Introduction

Cette étude a été réalisée au sein de l'unité mixte de recherche « structures et systèmes spatiaux » (UMR 3S) du Cemagref-Engref de Montpellier et à la Station Biologique de la Tour du Valat, située en Camargue, et dont les activités de recherche appliquée sont orientées vers la conservation des zones humides méditerranéennes. Dans le cadre du réseau Natura 2000, ces deux organismes sont actuellement partenaires pour développer des outils et des méthodes pour le suivi des habitats classés. C'est dans ce contexte de mise en place d'outils de suivi de l'état de conservation des habitats naturels que le projet EON 2000+ (Earth Observation for Natura 2000) a vu le jour en juin 2001. Notre étude aura comme objectif principal de répondre à ce besoin d'outils en proposant, notamment, une série d'indicateurs spatiaux (concept que nous définirons par la suite).

Le suivi des habitats naturels et la proposition d'indicateurs spatiaux représentent un modèle d'étude interdisciplinaire entre écologie et géographie. En considérant le paysage comme un espace dont la structure va expliquer en partie les processus écologiques, nous nous plaçons, non plus en tant que simple observateur du paysage, mais en géographe utilisant des concepts issus de l'écologie du paysage.

L'écologie du paysage est relativement récente. L'observation du paysage est un compromis entre géographie et écologie. Cette approche considère que les dynamiques spatiales liées aux évolutions « naturelles » du milieu vont être interprétables par l'analyse des composantes du paysage, dans le cas présent, des « tâches d'habitats ».
Ainsi, à l'aide d'outils d'analyse spatiale, nous développerons un certain nombre d'indicateurs spatiaux qui vont correspondre à des indicateurs de l'état de structure du paysage. Le paysage sera donc au centre de cette étude en étant le témoin de processus écologiques, mais aussi en tant que cadre spatial à l'intérieur duquel vont avoir lieu des dynamiques spatiales. Ce paysage, nous l'aborderons par le biais d'indicateurs, les indicateurs spatiaux.

Nous montrerons comment l'analyse du paysage, et les indicateurs qui en découlent, peut apporter des éléments de réponses aux gestionnaires des espaces concernés.

Après avoir présenté dans une première partie les différents concepts qui seront employés dans cette étude (habitats, indicateurs…), il sera ensuite nécessaire d'énoncer les besoins exprimés par les gestionnaires en terme de surveillance et les avancées sur ce domaine en présentant brièvement les travaux de mes prédécesseurs. Une troisième partie sera consacrée à la proposition d'indicateurs spatiaux mais aussi à la mise en place d'une démarche pour évaluer la pertinence de ces indicateurs. Enfin, dans une dernière partie, nous effectuerons une sorte de bilan où nous nous interrogerons sur la validité des différents indicateurs proposés et une réflexion sera faite quant à cette notion d'indicateur.

I. Présentation du vocabulaire et des concepts employés

I.1. Une approche paysagère du milieu : entre géographie et écologie

I.1.1. L'apport de l'écologie du paysage pour le suivi des habitats « naturels »

L'écologie du paysage a été définie comme l'étude de l'effet des motifs du paysage sur les processus écologiques (Turner, 1989).
Certains spécialistes des géosystèmes « positionnent l'écologie du paysage entre la science du paysage et le paysagisme d'aménagement sur l'échelle de la subjectivité/objectivité ; elle touche à la fois milieux naturalistes, milieux géographiques et stratégies d'aménagement » (*in* P. Delcros).

Cette approche va nous permettre de reconsidérer le paysage comme un ensemble d'éléments qui le compose et dont la répartition et les évolutions spatiales seront le signe de processus écologiques sous jacents. L'écologie du paysage ne se résume pas à un simple inventaire de la répartition spatiale des différentes composantes et de leur dynamique dans le temps. En effet, elle a une vocation plus « riche » puisqu'elle a la prétention de se centrer sur les relations entre les structures du paysage et son fonctionnement écologique.

I.1.2. Une analyse du paysage à trois niveaux

L'écologie du paysage considère le paysage comme une mosaïque d'unités paysagères. Les éléments qui composent cette mosaïque sont de deux ordres : les classes, qui correspondent aux différentes thématiques du paysage (dans notre cas les différents habitats) et les tâches, qui sont les différentes unités (ou individus) inclues dans telle ou telle classe.
Le paysage sera donc étudié à trois niveaux hiérarchiques : le paysage (le plus large), la classe et la tâche (le plus petit élément).

I.1.2.1. Le niveau tâche :

La tâche est considérée comme le niveau élémentaire du paysage et d'une classe. L'étude des tâches dans l'espace correspond au niveau d'étude le plus fin de l'analyse paysagère. Ainsi pour reprendre l'exemple exposé auparavant, nous analyserons chacune des tâches des classes A, B et C qui composent le paysage.
A ce niveau, il sera intéressant d'étudier la forme des tâches, le tracé des limites, les surfaces... De même, cela permet de mettre en évidence une certaine organisation des tâches et leur étude en positionnement relatif pourra être l'expression de processus ou de réalités écologiques tangibles.
Cependant, les mesures les plus « intéressantes » opérées à ce niveau consisteront à étudier les formes des tâches et leurs distances les unes des autres. Les analyses de la répartition spatiale des tâches seront corrélées avec les mesures effectuées sur les classes. De même, ce niveau d'étude étant le plus fin auquel nous pouvons parvenir, il devient rapidement difficile d'étudier chaque tâche indépendamment.
C'est pourquoi, nous privilégions le niveau classe dont le niveau d'analyse permet une analyse fine qui correspond mieux à nos attentes.

I.1.2.2. Le niveau Classe :

Le niveau Classe représente l'ensemble d'une thématique qui compose le paysage (voir figure 1). Dans notre travail, les classes regroupent l'ensemble des types d'habitats.
Ce niveau est intéressant pour analyser l'impact de divers processus sur la répartition des habitats dans l'espace. Il s'apparente à de l'analyse d'occupation du sol, classique en géographie, mais ces variations de répartition vont ici être retraduites en résultat de processus sur l'état de l'écosystème.

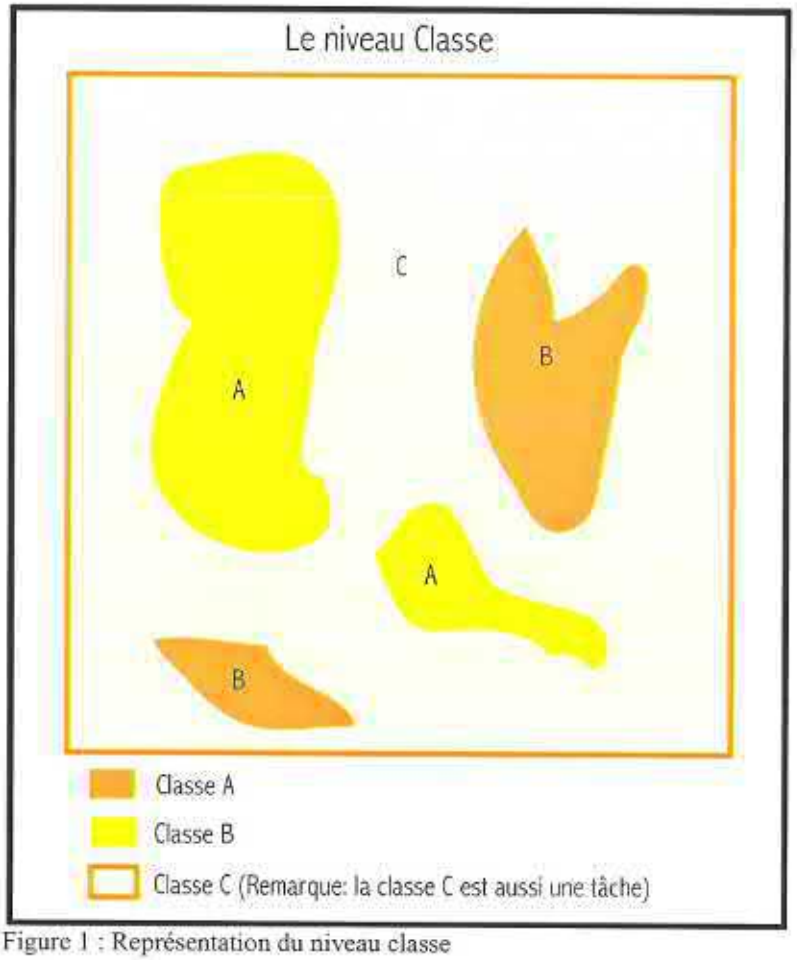


Figure 1 : Représentation du niveau classe

Ce niveau est celui sur lequel nous allons le plus travailler puisqu'il nous permet d'appréhender la répartition spatiale relative des habitats. L'analyse de cette répartition des classes va être déterminante pour la compréhension des processus écologiques. En effet, en fonction de l'organisation spatiale des classes d'habitats, les processus écologiques seront variables. Ainsi, lorsqu'une classe est composée de nombreuses tâches, l'habitat sera « fragile » puisque disséminé. En effet, il est reconnu en écologie qu'à population égale, une espèce est plus « fragile » dispersée que regroupée. Dans ce cas, l'organisation spatiale des classes dans le paysage aura un impact sur les processus écologiques. Cependant, ce cas général ne tient pas compte des stratégies différentes de chaque espèces puisque certaines choisissent, au contraire, de se diviser pour mieux se développer.
L'étude de la répartition spatiale des classes permet aussi d'émettre des hypothèses sur les conditions biotiques (actions s'exerçant entre les êtres vivants à l'intérieur de la biosphère) et abiotiques (qui ne font pas intervenir les êtres vivants) du milieu.

Dans le cadre de la mise en place d'indicateurs spatiaux pour le suivi des habitats naturels, le niveau classe est sans doute le plus intéressant pour les gestionnaires puisqu'il correspond aux différents types d'habitats.

Cependant, dans le cadre de travaux de mise en place d'indicateurs spatiaux à partir de données de télédétection, les mesures effectuées sur les classes seront soumises aux problèmes d'échelles spatiales mais aussi à la taille du paysage sur lequel nous travaillons. Les résultats obtenus par analyse de la répartition des classes dans le paysage vont être fonction de la taille de ce paysage mais aussi des limites que nous lui fixons (administrativement, taille des images utilisées en télédétection ou arbitrairement). Bien qu'il faille poser des limites, cette délimitation du paysage provoque un « effet de bords », d'une part en excluant des classes qui ont probablement des relations avec d'autres inclues dans ces limites, d'autre part elle découpe les limites de certaines classes (voir figure 2).



Figure 2 : Impact des limites du paysage sur

L'exemple illustré de la figure 2 permet de comprendre le rôle des limites dans les résultats obtenus. Ainsi, dans cet exemple, la classe A est tout d'abord sous estimée quant à sa fragmentation puisque la majorité de ses tâches ne sont pas inclues. Ensuite, la tâche de la classe A incluse dans le paysage est transformée puisqu'une partie de ses limites est découpée par celles du paysage.
Sortis de cet exemple, nous retrouverons le même type de problème dans notre travail. Ce constat nous amène à proposer de travailler toujours dans la même « fenêtre » paysagère si nous voulons pouvoir comparer de manière pertinente des mesures de structure du paysage.

I.1.2.2. Le paysage :

L'analyse au niveau du paysage correspond à une étude à petite échelle d'un espace bien délimité. Les mesures effectuées à ce niveau sont d'ordre général. Elles donnent un aperçu de la structure du paysage mais ne permettent pas de définir les relations spatiales entre les différents éléments.



Figure 3 : Exemple de mosaïque du paysage

L'analyse de la structure du paysage consistera principalement à étudier l'évolution de la mosaïque notamment au niveau de sa complexité. Si l'on s'en tient à la définition de la complexité proposée par le dictionnaire du Petit Larousse (édition de 1999), un paysage complexe « contient plusieurs éléments différents et combinés d'une manière qui n'est pas immédiatement claire pour l'esprit, difficile à organiser ». Dans notre cas, nous considérons un paysage comme complexe lorsqu'il est composé d'une multitude d'éléments dont la répartition spatiale est inégale. La complexité du paysage est perçue comme la disposition des différentes classes et tâches qui le compose. Ainsi un paysage sera complexe lorsque la diversité des classes sera élevée et que ces classes seront elles même découpées en de nombreuses tâches de tailles hétérogènes.

Il est important de noter qu'en écologie du paysage, l'échelle spatiale et temporelle choisie pour l'analyse va jouer un rôle important sur les résultats. En effet, si l'on choisit de travailler sur la comparaison de deux ou plusieurs mosaïques (voir figure 3) d'un même paysage, sur un siècle, plusieurs problèmes se poseront.
D'une part, il n'est pas évident de posséder des documents cartographiques suffisamment anciens pour effectuer ce type d'étude. D'autre part, choisir une échelle de temps vaste pour analyser le paysage suppose que l'on accepte d'occulter des processus journaliers ou mensuels à priori tout aussi importants.
Cependant, selon la théorie de la hiérarchie proposée par Burel (1992), « il existe une corrélation entre les échelles de temps et d'espace. Les phénomènes se déroulant sur de grands espaces sont beaucoup plus lents que ceux qui interviennent sur de petits espaces » (d'après Burel, 1992 *in* P. Delcros, 1994).

I.2. Les notions d'habitats et d'indicateurs, objets de notre étude

I.2.1. Qu'est ce qu'un habitat ?

I.2.1.1. Bien s'accorder sur la définition

Le terme d'habitat se place au cœur de l'écologie puisque le terme d'écologie vient du grec « oikos » qui signifie « habitat » (E. Salles, 2001).
Les définitions de l'habitat sont nombreuses. Elles sont par exemple différentes en anglais et en français puisque le terme d'habitat est tour à tour défini comme étant le cadre écologique localisable favorable à une espèce pour l'accomplissement d'une fonction puis comme descripteur des conditions nécessaires à la survie des espèces menacées ou rares.
Cependant, dans le cadre de notre travail, la notion d'habitat est distinguée par deux « sous-définitions » à savoir l'habitat naturel et l'habitat d'une espèce.
Ainsi, **l'habitat naturel** a été défini par la Directive Habitat comme : « zones terrestres ou aquatiques se distinguant par leurs caractéristiques géographiques, abiotiques et biotiques, qu'elles soient entièrement naturelles ou semi-naturelles ».
L'habitat d'une espèce a été défini comme : « milieu défini par des facteurs abiotiques et biotiques spécifiques où vit une espèce à l'un des stades de son cycle biologique ».

Dans notre étude, le terme d'habitat aura le sens d'habitat naturel comme défini précédemment. L'habitat est ici considéré comme étant un groupement de végétation ayant des caractéristiques biotiques et abiotiques bien définies et répondant à des réalités écologiques spécifiques.

I.2.1.2. La dimension spatiale de l'habitat

La dimension spatiale de l'habitat semble rester une notion relativement peu appréhendée en écologie (E. Salles, 2001). Cependant, il sera bien nécessaire ici d'intégrer cette dimension puisque nous allons analyser les répartitions spatiales de différents habitats sur un espace géographique bien défini. Un problème se pose toutefois dans le choix des limites attribuées aux différents habitats qui suppose que ces derniers sont facilement identifiables et distincts les uns des autres. Or, en réalité, il n'est pas aisé de poser des limites distinctes qui feront l'unanimité auprès des gestionnaires ou de botanistes (dans le cas où les habitats sont des groupements végétaux). Cependant, cette délimitation est nécessaire si nous voulons travailler au niveau de l'évolution spatiale des habitats dans un espace donné.

I.2.2. Les indicateurs

I.2.2.1. Définition d'un indicateur

Un indicateur est une représentation synthétique d'un processus ou encore une valeur dérivée de paramètres donnant des informations sur un phénomène. La portée de l'indicateur dépasse les propriétés directement associées à la valeur du paramètre (E. Salles, 2001). Il s'agit d'une « valeur élaborée » dont l'élaboration est tributaire d'un protocole d'acquisition et de traitement des données.
Le caractère synthétique de l'indicateur lui permet de devenir un outil pertinent puisqu'il permet de résumer, condenser et simplifier des données d'origine.

L'OCDE (Organisation pour la Coopération et le Développement Economique) accorde deux fonctions principales aux indicateurs :

- une signification synthétique : ils permettent une réduction du nombre de mesures et de paramètres nécessaires pour rendre compte d'une situation avec exactitude, simplifiant ainsi l'approche de phénomènes complexes ;
- Un outil de communication efficace : en simplifiant des phénomènes complexes, ils les rendent compréhensibles pour l'ensemble des acteurs concernés par la problématique ainsi qu'au grand public.

I.2.2.2. Les différents types d'indicateurs

L'OCDE propose trois types d'indicateurs :

- Les **indicateurs d'Etat** qui décrivent une situation environnementale, écologique, physique et socio-économique d'un milieu à un instant « t » et les changements d'état dans le temps ;
- Les **indicateurs de pression** reflètent la pression des activités humaines et/ou les processus naturels qui influent sur le l'évolution du milieu ;
- Les **indicateurs de réponse** qui traduisent l'impact des efforts consentis ou des moyens à mettre en place par la société afin de résoudre un problème environnemental.

Cette distinction en plusieurs indicateurs est connue sous le terme de **modèle P-E-R.** Cependant, ce modèle est basé sur une notion de causalité simple (A cause de B, B cause de C...) alors que le fonctionnement d'un écosystème est interactif et fait appel à de la causalité circulaire (A cause de B, B cause de C et C cause de A...).
Bien que ce modèle reconnaisse les relations entre activités humaines et environnement, il ne tient pas compte des relations complexes qui régissent le fonctionnement des écosystèmes entre eux. De plus, ces indicateurs sont probablement mal adaptés aux besoins des gestionnaires car ils sont indicateurs (P, E ou R) à un moment « *t* » et peuvent changer par la suite. En effet, nous pouvons envisager qu'un indicateur de réponse puisse devenir indicateur d'état par la suite. Ce modèle n'est donc pas adapté au suivi des habitats naturels mais la sémantique P.E.R. utilisée est quant à elle intéressante car elle permet de comprendre facilement l'utilité de tel ou tel indicateur, c'est pourquoi nous la réutiliserons dans nos propositions.

I.2.2.3. Caractéristiques d'un bon indicateur

Un bon indicateur doit (Estreguil C., Maggi M., 2001):

- fournir une image représentative des conditions environnementales, des pressions exercées sur l'environnement et/ou des réponses au niveau politique ;
- être sensible aux changements de l'environnement et aux activités humaines qui en découlent, pouvoir montrer les tendances sur le long terme à des fins de surveillance ;
- couvrir un large secteur ou être largement applicable ;
- être simple et facile d'interprétation ;
- être théoriquement bien fondé techniquement et scientifiquement ;
- fournir une base pour des comparaisons européennes ;

- avoir une valeur seuil ou de référence à laquelle le comparer de sorte que les utilisateurs décisionnaires puissent évaluer la signification des valeurs qui lui sont associées ;
- contenir un ensemble d'indicateurs complémentaires permettant de satisfaire à l'ensemble de ces propriétés ;

D'autre part un bon indicateur doit être pertinent à des échelles spatiales et temporelles différentes.

II. Les indicateurs spatiaux et le suivi des habitats Natura 2000 en Camargue

II.1. Natura 2000 et le projet européen EON 2000+

Le réseau Natura 2000 a pour but de préserver la biodiversité sur le territoire de l'Union européenne. Il doit assurer le maintien ou le rétablissement dans un état de conservation favorable des habitats naturels ou des habitats d'espèces, floristiques et faunistiques, sauvages ayant un intérêt communautaire.[1]
Différents sites ont donc été classés Natura 2000 en Europe pour leur intérêt communautaire en terme de biodiversité. Le projet EON 2000+ (Earth Observation for Natura 2000+) se place dans une volonté d'évaluer l'évolution de ces sites à l'aide des outils d'Observation de la Terre.
Précédemment, le projet EON 2000 ne s'intéressait qu'aux milieux forestiers. Le projet EON 2000+ qui lui a succédé a été monté afin d'évaluer l'opérationnalité du suivi du réseau Natura 2000.
Ce projet EON 2000+ relève du suivi de l'état et de l'évolution des habitats et ce, par la création d'informations nécessaires à la mesure et au contrôle issus de la télédétection et intégrés à des Systèmes d'Information Géographique.
Ainsi, si la question des indicateurs est quelque chose de relativement ancien dans les domaines tels que l'économie (par exemple le Taux de croissance) ou encore la sociologie (appartenance à telle ou telle Catégorie Socio-Professionnelle) et la biologie/écologie (considérer la truite comme un indicateur biologique) la question des indicateurs spatiaux est encore expérimentale et en phase de développement puisqu'ils résultent de l'Agenda 21 signé à Rio en 1992 visant à enrichir l'information et l'évaluation du développement durable.
Plusieurs sites européens correspondant à des milieux différents et plusieurs centres de recherche ont donc été choisis pour l'élaboration et le test de différents indicateurs spatiaux.
En France, les « maîtres d'œuvre » du projet sont le Cemagref de Montpellier et de Grenoble ainsi que l'ATEN (Atelier Technique des Espaces Naturels). Les sites tests retenus sont le Parc National du Mercantour et ses pelouses d'altitude et les zones humides de la Grande Camargue.

II.2. Répondre à des besoins exprimés par les gestionnaires

II.2.1. Les gestionnaires

Les gestionnaires concernés par projet en Camargue sont la Réserve Naturelle de Camargue et la Station biologique de la Tour du Valat. Ces deux organismes, l'un public et l'autre privé, travaillent sur ces questions de mise en place d'outils de suivi des habitats naturels afin de gérer au mieux les espaces qui leur sont confiés mais aussi en vue de transférer leurs connaissances aux autres gestionnaires de zones humides méditerranéennes.

II.2.2. Les besoins en outils de surveillance

La proposition d'indicateurs se doit d'apporter des réponses aux besoins des gestionnaires de ces espaces classés en Natura 2000 et intégrés dans les zones tests du projet EON 2000+.

[1] http://natura2000.environnement.gouv.fr/

Dans le cas de la Camargue, la Réserve Naturelle de Camargue et la Tour du Valat ont exprimé un certain nombre de besoins qui correspondent à des problématiques différentes à savoir :

- une surveillance globale des habitats ;
- surveillance spécifique d'un habitat (les habitats de dunes soumis à des dégradations dues aux vents de tempête et à la montée du niveau de la mer) ;
- surveillance des habitats restaurés suite à un intense pâturage ;
- surveillance de l'érosion autour des étangs et du trait de côte ;
- surveillance de l'impact des déchets issus de la riziculture et de la chasse sur les étangs.

Comme nous pouvons le constater au travers du tableau récapitulatif (voir figure 4), la réponse aux différents besoins nécessite de posséder un certain nombre d'informations (colonne « Informations de base nécessaires »). D'autre part, nous pouvons noter que les types d'indicateurs dont les gestionnaires semblent avoir le plus besoin sont des indicateurs d'état. Cela est du en grande partie à la complexité de mettre en place les indicateurs de pression et d'état proposés par l'OCDE à partir des données existantes. En effet, en l'état actuel des choses, il n'est pas concevable de proposer de tels indicateurs car les données existantes ne le permettent pas. C'est pourquoi, il est normal que les gestionnaires requièrent avant tout des indicateurs d'état car ils sont les moins nécessiteux en base de données et que leurs informations sont simples et fondamentales pour le suivi.

Besoins en surveillance	Thème	Niveau d'analyse	Extension géographique	Echelle de temps	Type P.E.R	Informations de base nécessaires
Surveillance des habitats en général	Cartographie des habitats	Habitat paysage	130 km²	Entre 1 et 5 ans	Etat	Cartographie de la végétation et cartographie d'évolution réalisée par télédétection
Habitats soumis aux dégradations par les vents violents et la montée du niveau des mers	Cartographie des habitats Qualité de l'habitat	Habitat Paysage	1 Km²	2 ans	Etat	Surveillance terrain et cartographie des évolutions effectuées à partir de Très Haute Résolution
Habitat d'anciennes zones de pâturage intense	Cartographie des habitats Qualité de l'habitat	Habitat Paysage	30 Km²	Annuel sur environ 10 ans	Etat	Cartographie de la végétation et données terrain Surveillance terrain et utilisation de la Très Haute Résolution pour étudier les changements
Surveillance de l'érosion	Vulnérabilité Etat	Paysage	Site 130 Km² Grande Camargue (800 km²)	Annuel	Etat	Cartographie des limites des zones en eau issue de la Haute Résolution et Très Haute Résolution

Figure 4 : Tableau des besoins et données associées (source : Projet EON 2000+)

II.3. Les indicateurs spatiaux

Tout comme les indicateurs économiques écologiques ou sociologiques, pour ne citer que ceux là, les indicateurs spatiaux doivent mettre en évidence un phénomène. La différence avec les autres types d'indicateurs réside principalement dans le fait que les indicateurs spatiaux traitent d'objets « à caractères spatiaux ». Ce sont donc tous les processus ayant des « signatures spatiales » (c'est à dire que l'espace sera marqué par ces changements) qui seront étudiés (par exemple le processus de déforestation ou de désertification du milieu). Ainsi, les indicateurs spatiaux vont nous permettre de suivre des évolutions spatiales d'objets géographiques. Dans notre cas, l'étude des évolutions surfaciques des habitats naturels (quantitatif) mais aussi leur manière d'évoluer dans l'espace (qualitatif) sera l'objet de nos propositions d'indicateurs.

Nous proposons de distinguer plusieurs types d'indicateurs spatiaux :

- Linéaires : traduisent des processus de transferts, de flux (populations, analyse de réseaux...) mais aussi de contacts (interfaces entre deux éléments);
- Surfaciques : traduisent des évolutions spatiales dont la mesure principale est la surface.
- Ponctuels : traduisent une répartition d'individus dans un espace et son évolution. L'unité de mesure principale est la population.

Ces trois types d'indicateurs sont évidemment imbriqués puisque les processus linéaires (circulation automobile sur les axes autoroutiers par exemple) vont influer sur les processus surfaciques (occupation des sols) et le ponctuel (fluctuations de la population autour de cet axe).
Dans notre travail, les indicateurs proposés seront du type surfacique. Notre étude s'intégrant dans la continuité d'un projet, il est nécessaire de présenter les précédents travaux qui ont été réalisés sur le même thème en Camargue. Ainsi, nous traiterons tout particulièrement des propositions d'indicateurs faites dans deux travaux d'étudiants afin de mieux comprendre le positionnement de notre étude.

II.3.1. Exemples d'indicateurs proposés dans le cadre du projet EON 2000+ en Camargue : travaux d'E. Salles et O. Léonard au sein de l'UMR 3S

II.3.1.1. Le travail d'E. Salles

Dans son mémoire de fin d'études réalisé en 2001, Elodie Salles s'est placée en tant que précurseur dans la proposition d'indicateurs spatiaux pour la Camargue. En effet, le projet EON 2000+ venant tout juste d'être lancé, il a fallu dans un premier temps effectué un état des lieux sur les référentiels précis qui permettraient de développer un véritable dispositif d'indicateurs en Camargue.
A travers les difficultés liées au peu d'informations organisées disponibles, elle a tout de même pu faire des propositions d'indicateurs qui méritent d'être soulignées.
Elle a tout d'abords distingué trois types d'indicateurs qui correspondent aux attributs essentiels des écosystèmes définis par Noss (1990):

- Indicateurs de structure ;
- Indicateurs de composition
- Indicateurs de fonctionnement

Les définitions proposées de ces indicateurs sont :

« **Les indicateurs de structure** (S) décrivent l'assemblage physique des éléments du système : modèle de paysage, structure et hétérogénéité des habitats... » ;

« **Les indicateurs de composition** (C) d'un écosystème portent sur les types de paysage, les types d'habitats, les communautés, les espèces, les éléments intra spécifiques;

« **Les indicateurs de fonctionnement** (F) décrivent les processus intervenant dans l'écosystème : régime hydrologique, tendances d'utilisation des terres, interactions entre espèces... ».

A partir de cette distinction, les indicateurs proposés seront rattachés à l'une de ces catégories (S, C ou F) en fonction des informations qu'ils apportent.

Elle a donc proposé une série d'indicateurs que nous n'exposerons pas ici mais dont les applications sont nombreuses mais essentiellement destinées au suivi hydraulique de marais en Camargue.

Ainsi, certains indicateurs semblent intéressant en vue d'étudier les évolutions de la végétation. Je prendrai comme exemple l'indicateur appelé « Connex Habitat » qui répond à la question : A combien de marais un marais est-il connecté ? Au niveau écologique, cet indicateur peut être intéressant pour étudier les potentiels de diffusion spatiale de différentes espèces (végétales ou animales) et donc d'évaluer l'état de l'habitat d'une ou plusieurs espèces.

Cependant, pouvons nous considérer comme indicateur une donnée qui montre les possibilités de propagation d'un habitat dans un réseau ? En effet, les liens de connexions hydrauliques entre les marais sont un facteur de propagation éventuelle mais cela ne signifie pas que si la connexion est possible, la diffusion des espèces est effective. Cela revient à considérer *« la probabilité que »* comme un indicateur potentiel. Or pour cela, il est nécessaire de maîtriser ce qu'il se passera dans le cas où « la probabilité de » deviendra réalité sinon cet indicateur ne pourra pas être interprété efficacement. Cela pose le problème de la nécessité de modéliser le fonctionnement de ces milieux.

Nous retrouverons par la suite le même questionnement concernant l'indicateur altitude.

II.3.1.2. Les indicateurs proposés par O. Léonard

Suite au travail d'E. Salles, Olivier Léonard a, quant à lui cherché à produire des indicateurs spatiaux à partir de l'analyse d'images par morphologie mathématique. Ce travail très expérimental a permis d'évaluer la pertinence d'une technique pour la production d'indicateurs spatiaux.

En travaillant en partie sur des espaces fictifs, de nombreuses propositions d'indicateurs spatiaux ont été faites en travaillant généralement sur les herbiers de zostères présents dans l'étang du Vaccarès. A travers la technique employée, il a surtout travaillé au niveau des tâches (élément structurant). Son travail se place plutôt dans un cadre expérimental qu'appliqué.

II.3.1.3. Positionnement par rapport aux précédents travaux

Les deux travaux présentés précédemment et les différentes propositions qui ont été faites reposent sur de l'analyse du paysage en se positionnant entre écologie et géographie.

Notre travail se place dans une même manière d'appréhender le paysage et issue de l'écologie du paysage. Cependant, si des indicateurs spatiaux ont été proposés, leurs mises en place reposent généralement soit sur des expérimentations sur des espaces théoriques soit sur des

applications possibles. En ce qui nous concerne, nous travaillerons sur des espaces où il existe une information géographique assez fiable. Ensuite, les différents indicateurs que nous proposeront seront issus de calculs d'indices plus ou moins reconnus au niveau des écologues du paysage. Devient indicateur spatial tout indice (nombre exprimant un rapport entre deux grandeurs) qui apporte une information synthétique pertinente d'une organisation spatiale.
Pour cela, il existe un logiciel mis en place pour effectuer un grand nombre de mesures sur la structure d'un paysage.

II.4. L'outil de calcul : le logiciel Fragstat

Pour effectuer cette analyse statistique du paysage, nous utiliserons le logiciel Fragstat. Ce logiciel très performant permet d'effectuer un grand nombre d'opérations pour mesurer le paysage. A l'origine, Fragstat 2.0 a été mis sur le domaine public en 1995 en accord avec le Rapport Technique Général du Service des Forêts américain. Depuis, ce logiciel a été largement utilisé par de nombreux professionnels et une nouvelle version a vu le jour (V. 3.0).
Le logiciel permet d'effectuer un certain nombre de mesures au niveau du paysage (Landscape), Classe (Class) et tâche (Patch) en fonction des processus à analyser (diversité, contagion, évolution des limites, surface...).

Les différents indices proposés par Fragstat se déclinent en plusieurs familles de mesures :

- surfaces/densité/limites
- des formes
- autours de noyaux
- Isolation/proximité
- Contrastes
- Contagion/diffusion
- Sous-ensembles
- Connectivité
- Diversité

Le nombre important de mesures proposées par Fragstat nécessite de bien comprendre les différents indices que nous allons calculer. En effet, de nombreux indices étant redondants, il est possible d'effectuer une multitude de mesures qui apporteront toujours la même information.
L'utilisation de Fragstat nécessite un travail de préparation des données en amont. D'une part, les mosaïques de paysage que nous allons analyser doivent être « propres » dans le sens où il ne doit pas y avoir de superposition de tâches, qui influeraient sur les résultats obtenus. D'autre part, il faut transformer les fichiers vecteur en fichiers raster pour pouvoir travailler sous Fragstat.

III. Proposition d'indicateurs et analyse

III.1.Démarche et bases de données

La proposition d'indicateurs spatiaux nécessite de posséder un certain nombre d'informations spatialisées (cartographie, données localisables...). Le choix d'élargir notre recherche à la Réserve Naturelle de Camargue et de ne pas travailler uniquement sur le domaine de la Tour du Valat s'est fait en fonction des données que nous avions en notre possession. En effet, comme nous le verrons par la suite, il nous était difficile de produire des indicateurs spatiaux fiables à partir des seules données de la Tour du Valat. C'est pourquoi, afin de tester des indices de manière fiable, nous appliquerons l'approche paysagère présentée en première partie sur la RNC et nous analyserons la répartition de la végétation en fonction des altitudes sur les Cerisières. La localisation des deux sites d'étude est représentée par la figure 5 qui suit.

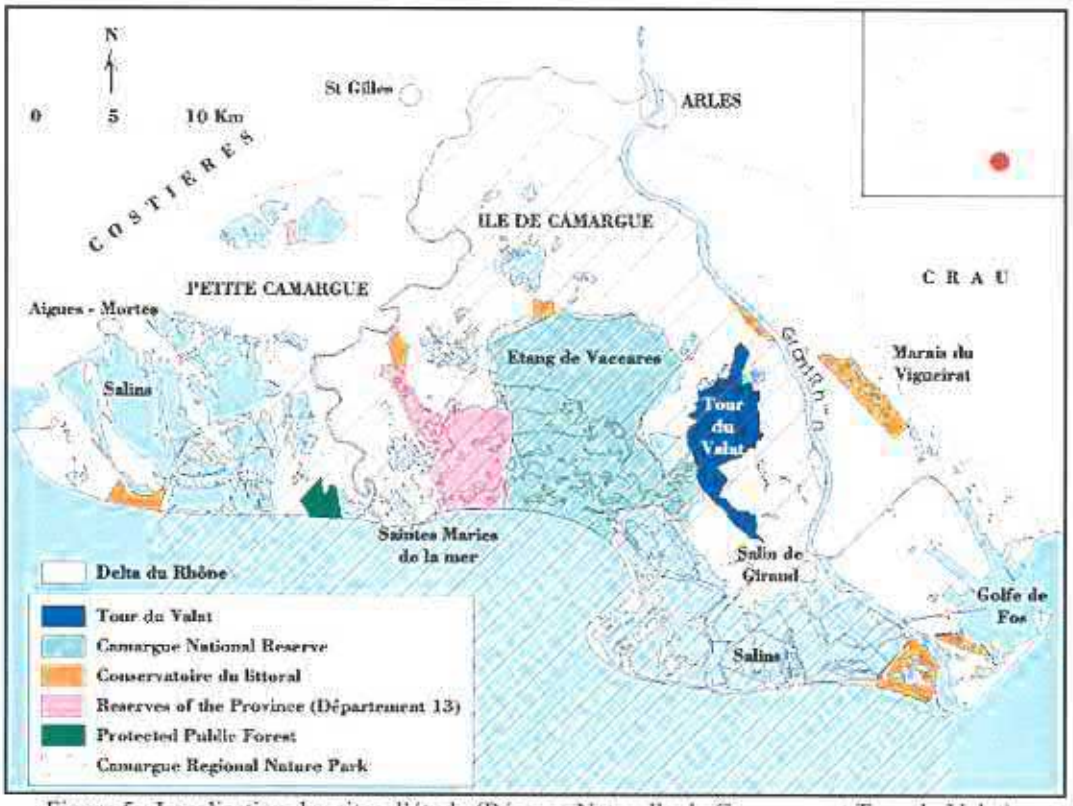


Figure 5 : Localisation des sites d'étude (Réserve Naturelle de Camargue et Tour du Valat)

III.1.1. Cartographie des habitats de la Réserve Naturelle de Camargue (voir en annexe)

Parmi les différents documents géographiques que nous possédons pour la proposition d'indicateurs spatiaux, la cartographie des habitats naturels de la Réserve Naturelle de Camargue réalisée en 2000 par les agents de la Réserve va nous être d'une grande utilité.
En effet, il est « rare » en Camargue de posséder une cartographie des habitats aussi précise qui soit intégrée dans une base de données SIG. En effet, contrairement à d'autres sites test pour le projet EON 2000+, la Camargue souffre d'un manque de référentiels précis. La production de cartes des habitats n'a pas été jusqu'ici une priorité pour les scientifiques travaillant sur ces milieux, ce qui explique en partie le retard pris.

Ainsi, afin de faciliter le test de différents indices sur cette zone, nous avons décidé de ne pas travailler sur l'ensemble de la Réserve mais simplement sur une zone plus réduite (voir figure 6). Cette zone que nous appellerons « zone de référence » par la suite a été déterminée de manière tout à fait subjective mais qui ne soit ni une zone trop hétérogène ni trop homogène. En effet, pour des raisons techniques et de temps, il était préférable de tester les différents indices sur une zone de taille réduite. Etant donné que nous devions transformer l'ensemble des polygones (vecteur) en lignes et colonnes (raster) pour les besoins du logiciel sur lequel nous avons effectué les calculs, cette opération, appliquée à l'ensemble de la Réserve rendrait l'information très lourde à gérer. De plus, les ordinateurs supporteraient mal le lancement de calculs d'analyse du paysage sur l'ensemble de la Réserve.

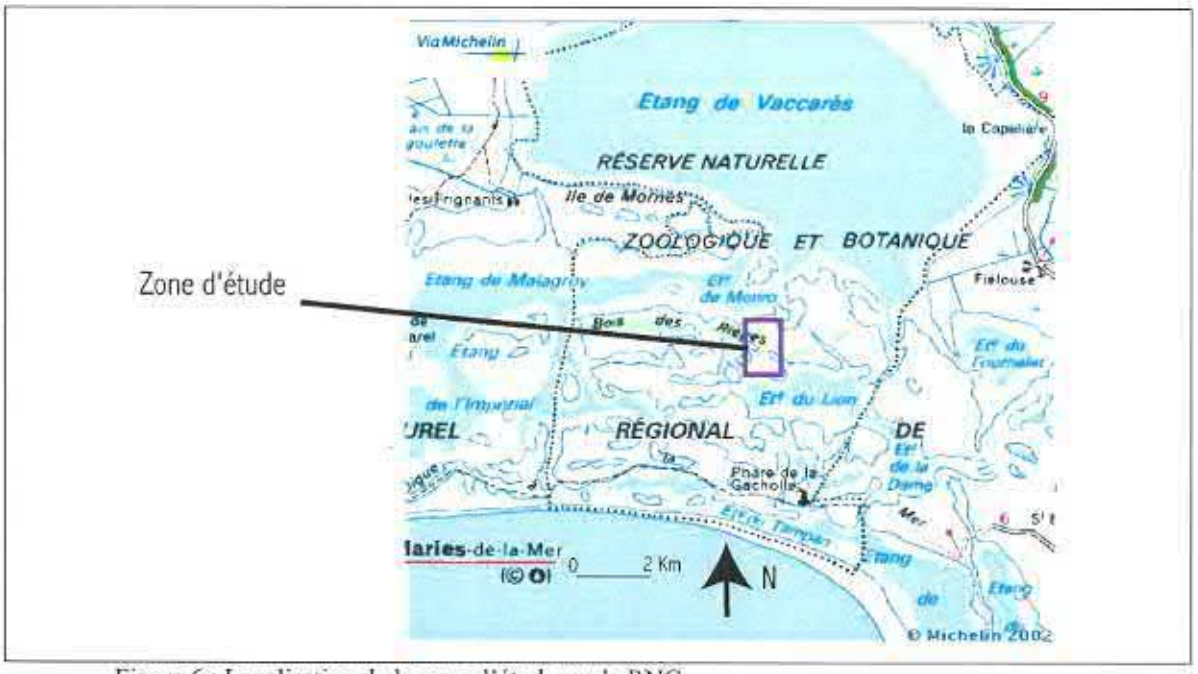


Figure 6 : Localisation de la zone d'étude sur la RNC

La zone que nous avons déterminée a une surface de 25,75 hectares, ce qui est relativement restreint par rapport à la RNC qui couvre 13117 hectares.

III.1.2. Les données sur la Tour du Valat

III.1.2.1.. La cartographie de la végétation (voir en annexes)

Les données permettant de travailler de manière fiable sur les habitats naturels sont assez rares sur la Tour du Valat. Cependant, il existe une cartographie de la végétation réalisée en 1996 par E. Billet. Cette carte nous pose problème puisque d'une part elle ne traite que de végétation dominante et non d'habitat naturel et d'autre part la manière dont elle a été réalisée nous fait émettre des doutes quant à sa fiabilité. En effet, elle a été réalisée par photo-interprétation d'une photographie aérienne de 1992 avec validation terrain en 1996 avec une inégalité de temps passé en fonction des zones du domaine de la Tour du Valat. C'est pourquoi cette carte nous servira de base pour la validation de notre photo-interprétation mais nous ne pouvons travailler uniquement à partir de ce document.

III.1.2.2. Modèle Numérique d'Altitude (MNA)

Le MNA est une représentation numérique du relief. Il est composé d'un maillage de points géoréférencés en X et Y et dont la valeur Z représente les altitudes. Ce MNA (voir figure 7) a été réalisé à l'aide d'un GPS bi-fréquence par P. Buckwell lors d'un stage en hydrologie à la Station biologique de la Tour du Valat. Ce MNA est composé de 15 955 points bien réparties couvrant l'ensemble de la zone de test.
La qualité de ce MNA va nous permettre de travailler de manière précise sur l'analyse de la répartition de la végétation en fonction des altitudes.
Dans un logiciel de SIG, il nous sera possible de combiner le MNA avec les autres couches d'informations (voir aussi figure 9).

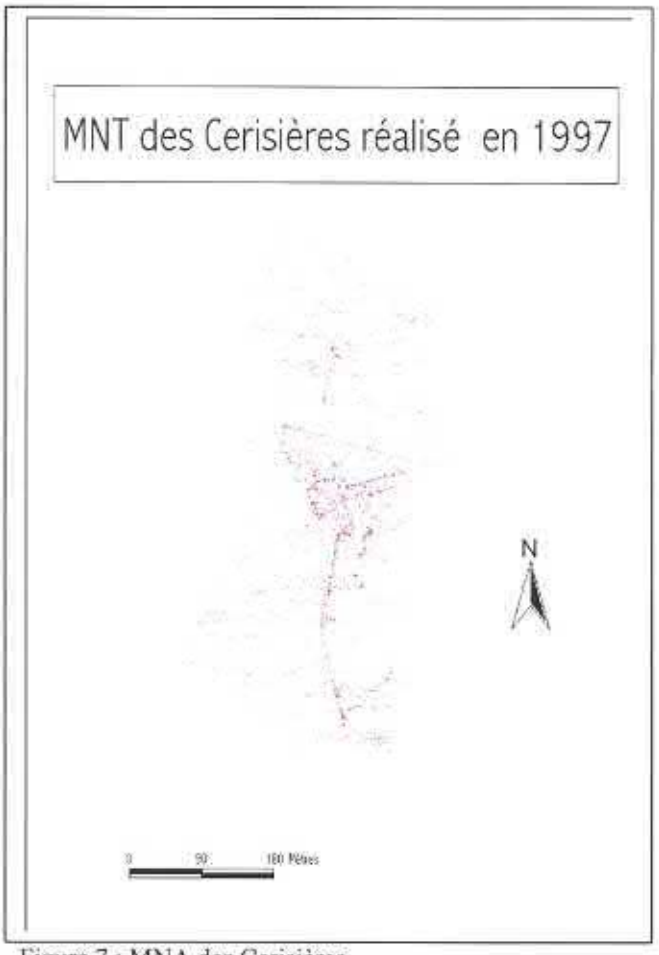


Figure 7 : MNA des Cerisières

III.1.2.3. Photo aérienne infrarouge prise d'un « drône »

Afin de travailler à partir d'images les plus récentes possibles, nous avons produit nos images de télédétection. Ainsi, avec des personnes travaillant pour l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) de Montpellier en vue de développer un drône (objet volant de petite taille avec des appareils de mesure et de photographie embarqués), nous avons pu acquérir des photos aériennes récentes en infrarouge et en RVB (visible).
L'avantage de cette technique réside dans le fait que nous avons ainsi la chance de travailler avec une image récente et de très haute résolution (entre 5 et 10 cm).
La photo sur laquelle nous allons travailler a été prise par B. Roux (voir figure 8), stagiaire à la Maison de la Télédétection, qui a lui-même effectué la mosaïque finale.



Figure 8 : Les Cerisières, photo infrarouge, B. Roux, 2003

Certes ce travail n'est encore qu'expérimental mais il permet tout de même de posséder une image, orthorectifiée et géoréférencés, de qualité suffisante pour notre étude.
Cependant, des problèmes de déformation apparaissent à certains endroits de la photo et nous n'étudierons pas les espaces concernés par ces défauts.

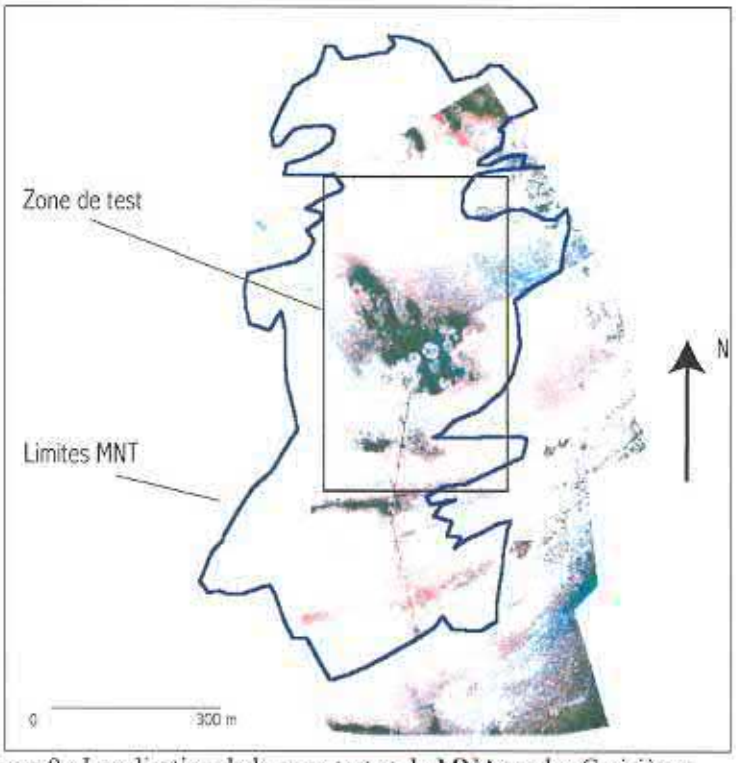


Figure 9 : Localisation de la zone test et du MNA sur les Cerisières

III.2. Evaluation de la pertinence d'indices sur la RNC par « simulation »

III.2.1. Démarche employée pour évaluer la structure du paysage

« L'un des atouts majeurs de l'écologie du paysage est la possibilité de quantifier la structure d'un paysage »[2]. Selon P. Delcros (1994), il existe deux manières de produire des indices de structure :

- par les mathématiques
- de manière intuitive et empirique

Il existe de nombreuses mesures pour évaluer la structure d'un paysage comme les indices de diversité, d'hétérogénéité, de la complexité des formes…
Les différents indices que nous présenterons par la suite répondent tour à tour à ces questions d'évaluation de la structure paysagère. Certains sont simples dans leur mise en œuvre et dans leur interprétation et d'autres, plus complexes nécessiteront une certaine « maîtrise ». Cependant, afin de répondre à des besoins d'indicateurs spatiaux, les indices que nous allons proposer devront être compréhensibles pour tous.

Le choix des indices à calculer s'est fait en fonction des besoins exprimés par les gestionnaires mais aussi en fonction de leur pertinence. Parmi les nombreux calculs de mesure du paysage,

[2] P. Delcros *in* « Ecologie du paysage et dynamique végétale post-culturale », p 54, 1994

nous n'en avons retenu que certains qui sont soit reconnus et déjà utilisés dans des travaux du même type ou bien qu'ils offrent un attrait particulier du point de vue de leur fonctionnement. Afin d'évaluer la pertinence de ces mesures pour le suivi des habitats naturels, nous avons décidé de « simuler » l'état du paysage suite à différentes évolutions.

Ainsi, nous avons délibérément changé le contour des différentes tâches en fonction de différents scenarii très basiques mais qui pourraient correspondre à une réalité terrain, ce qui a joué grandement dans le choix d'une zone de petite taille car il aurait été beaucoup trop long de modifier les limites de milliers de polygones.

Trois scenarii ont été mis en place :

- Hausse de la salinité ;
- Baisse de la salinité ;
- Augmentation de la durée de submersion.

Les mosaïques que nous avons mises en place en fonction de ces « scenarii » vont ensuite être confrontées à celle de référence (voir figure 10).

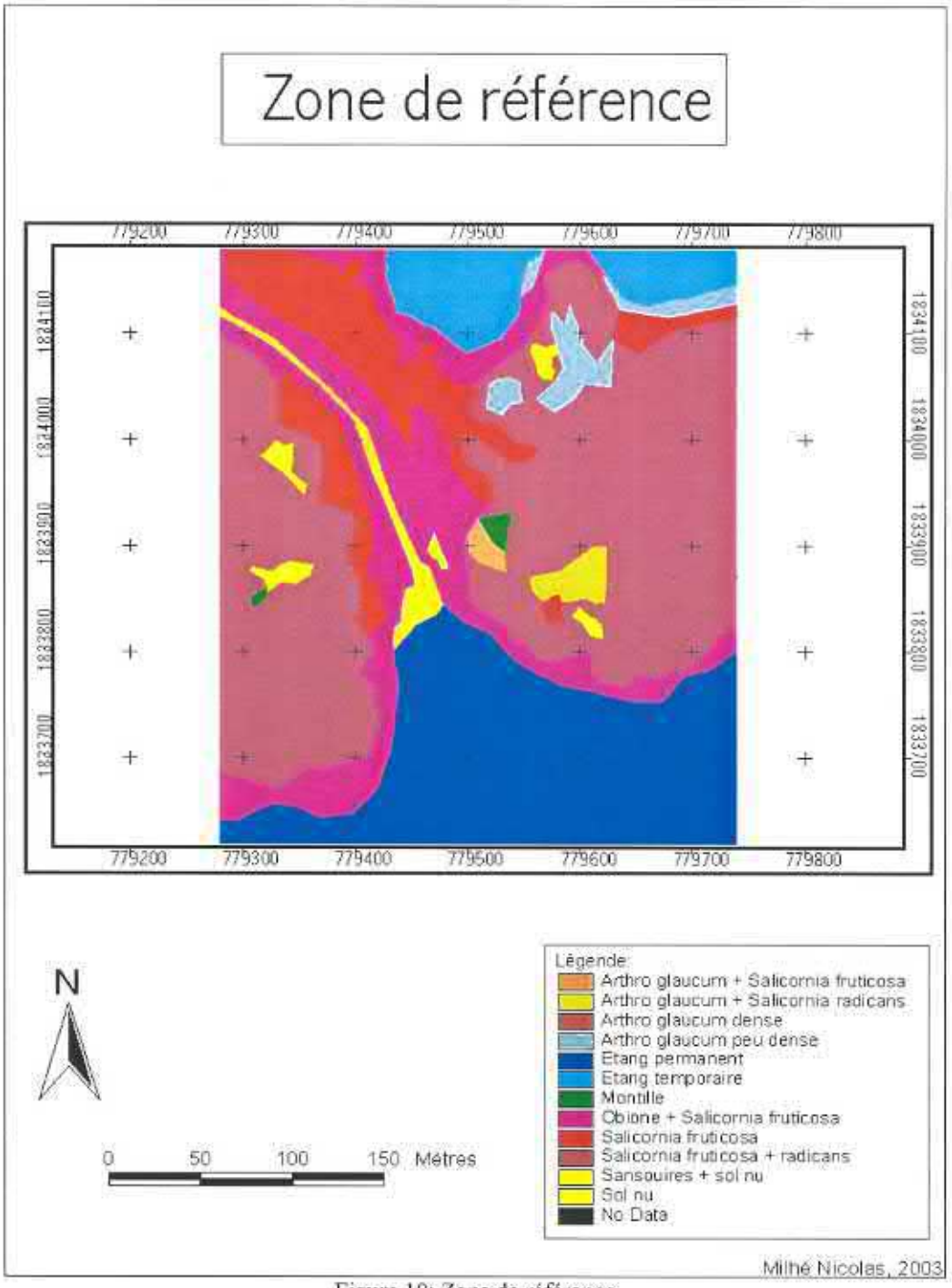


Figure 10: Zone de référence

Remarque : *La cartographie de la zone de référence est issue de la cartographie des habitats de la RNC. Les polygones (vecteur) ont été transformés pour les besoins du calcul sous le logiciel Fragstat (que nous présenterons par la suite) en fichier Grid (raster) dont la taille du pixel a été fixée à 50 cm (soit 1122 lignes et 918 colonnes). Sous le logiciel Mapinfo, nous avons par ailleurs effectué des transformations sur les limites des tâches d'habitats susceptibles d'évoluer en fonction des différents scenarii.*

Les modifications apportées reposent sur des connaissances d'expert, en l'occurrence Yves Chérain de la RNC, et notamment sur le comportement des espèces végétales face à tel ou tel facteur abiotique (salinité ou durée de submersion).

Nous avons donc considéré que :

- Dans le cas d'une hausse de la salinité, l'espèce végétale *Arthrocnemum glaucum* aura tendance à augmenter par rapport aux autres espèces. Par contre elle diminuera en faveur des tâches de sol nu si elle est à proximité de ce type de tâche.
- En cas de baisse de la salinité, nous avons fait accroître les tâches de *Salicornia fruticosa* sur les autres espèces et les zones de mélange entre *Salicornia fruticosa* et *Arthrocnemum glaucum* ont elles aussi été augmentées. Par contre, nous avons considéré que les zones de sol nu diminuaient ou disparaissaient au profit des espèces végétales.
- Dans le cas d'une augmentation des durées de submersion, la zone centrale considérée comme « Sansouire + sol nu » et qui correspond à un chenal reliant les étangs temporaires au Nord et les étangs permanents au sud a été « transformée » en sol nu puisque nous avons estimé qu'en cas d'une augmentation de la durée de submersion, cette zone serait en eau plus régulièrement, ne permettant pas la végétalisation. Les zones de sol nu et de mélange entre *Salicornia fruticosa* et *Salicornia radicans* ont été augmentées.

Remarque : *Les habitats Montille, Etangs temporaires et permanents n'ont pas été modifiés. Il se peut toutefois que les limites aient été modifiées lors de la transformation du fait d'un voisinage direct avec des zones modifiées. C'est pourquoi, ces habitats auront des valeurs identiques à celles de la carte de référence.*

III.2.2. Présentation des résultats

III.2.2.1. La superficie des classes d'habitat

Nous avons donc calculé la superficie des différents habitats présents sur la zone d'étude pour les différents scénarii. La comparaison de ces résultats (voir figure 11) nous permet de mettre en évidence un certain nombre d'éléments qui traduisent bien les différentes modifications que nous avons apportées à la mosaïque.

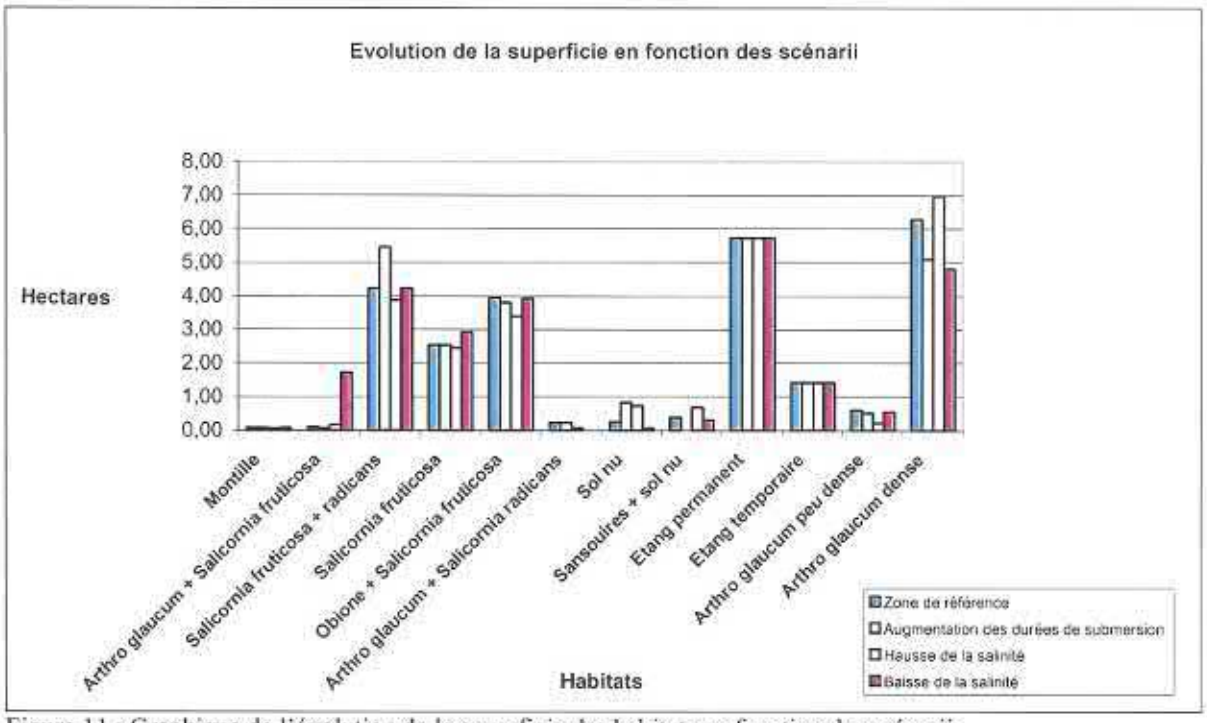


Figure 11 : Graphique de l'évolution de la superficie des habitats en fonction des scénarii

Ainsi, cette mesure basique permet d'avoir rapidement un aperçu de l'évolution du paysage et des différents habitats. Nous pouvons considérer ce calcul comme étant un indicateur spatial d'état, comparable dans le temps en fonction de la périodicité d'acquisition des données.
A titre d'exemple de représentation, nous avons représenté les différents résultats dans un tableau (voir figure 12) qui pourra être réutilisé comme fiche d'inventaire pour l'ensemble des indicateurs.
Autre mesure simple et qui suit le calcul de la superficie des classes d'habitat, le calcul du pourcentage d'occupation du paysage par les différents habitats va nous permettre de mettre en évidence la part respective des différents habitats dans la mosaïque du paysage.

Surfaces			
Evolution **Scenarii**	**Augmentation**	**Stable**	**Diminution**
Augmentation de la durée de submersion	- Salicornia fruticosa + radicans - Sol nu	- Arthrocnenum glaucum + Salinornia radicans - Etang permanent - Etang temporaire - Salicornia fruticosa - **Montille**	- Arthrocnenum glaucum + Salicornia fruticosa - Obione + Salicornia fruticosa - Sansouires + sol nu - Arthrocnenum glaucum dense - Arthrocnenum glaucum peu dense
Diminution de la salinité	-Arthrocnenum glaucum + Salicornia fruticosa - Salicornia fruticosa	- Montille - Obione + Salicornia fruticosa - Etang permanent - Etang temporaire - Salicornia fruticosa + radicans	- Arthrocnenum glaucum + Salicornia radicans - Sol nu - Sansouires + sol nu - Arthrocnenum glaucum peu dense - Arthrocnenum glaucum dense
Augmentation de la salinité	- Arthrocnenum glaucum + Salicornia fruticosa - Sol nu - Sansouires + sol nu - Arthrocnenum glaucum dense	- Montille - Etang permanent - Etang temporaire	- Salicornia fruticosa + radicans - Salicornia fruticosa - Obione + Salicornia fruticosa - Arthrocnenum glaucum + Salicornia radicans - Arthrocnenum glaucum peu dense

Figure 12 : Tableau récapitulatif de l'évolution des habitats en fonction des scenarii

III.2.2.2. Part des surfaces des habitats dans le paysage

Cet indice va permettre, tout comme une étude de l'occupation des sols classique, de mesurer la part des habitats au sein du paysage de manière surfacique. Elle a comme avantage d'être une mesure simple et fiable dont la comparaison dans le temps pourra être très pertinente. Cependant, étant donné que cela permet de mesurer la part des habitats dans un paysage donné, il est nécessaire pour la comparaison de travailler toujours exactement sur le même paysage, ce qui avec les SIG est quelque chose de facilement réalisable.
Dans notre cas, les résultats (voir figure 13) obtenus correspondent aux modifications que nous avons apportées en fonction des différents scenarii.
Cependant, étant donné que les modifications que nous avons apportées sur la mosaïque de la zone de référence ont touché la surface des différentes classes d'habitats, il est normal que les

deux calculs présentés « réagissent » bien puisqu'ils sont directement liés à la surface des éléments et du paysage dans son ensemble.

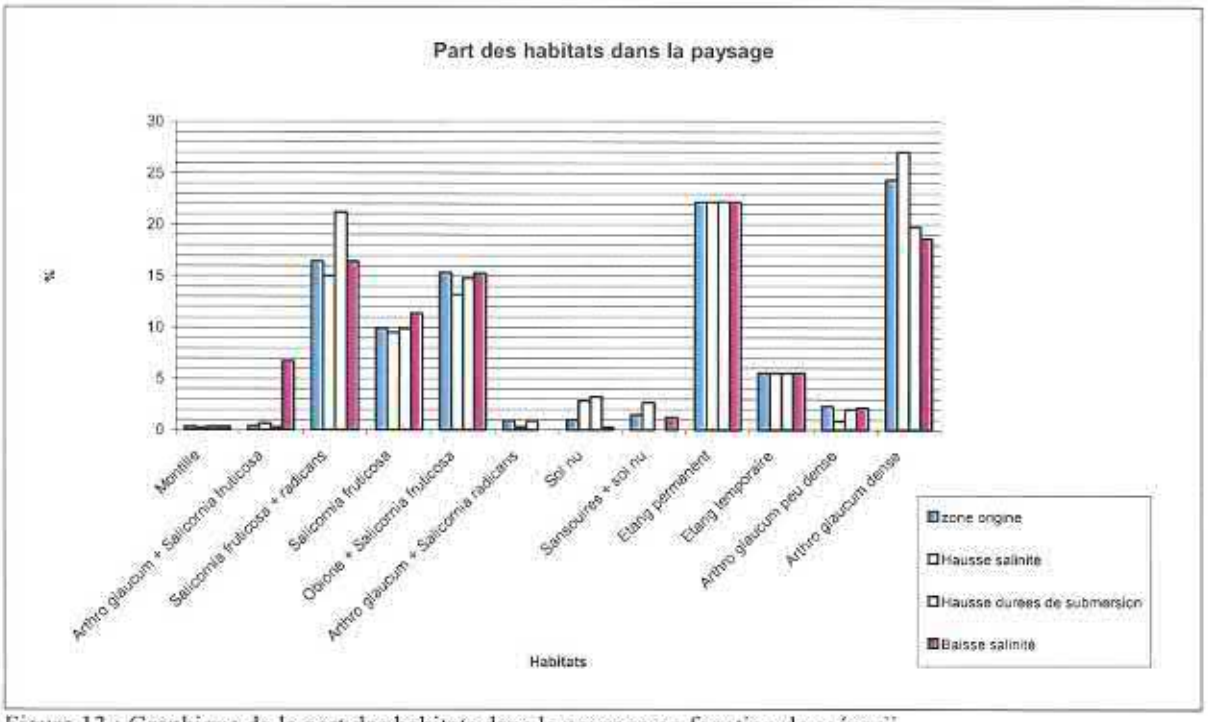


Figure 13 : Graphique de la part des habitats dans le paysage en fonction de scénarii

III.2.2.3. Le « Patch density » (PD)

La mesure de la densité des tâches est un indicateur reconnu puisqu'il a déjà été proposé et retenu par les différents chercheurs travaillant sur le projet EON 2000+ pour le Parc National du Mercantour mais aussi pour l'ensemble des sites Natura 2000 pour évaluer l'état de fragmentation du paysage.

La formule est :

$$PD = \frac{N}{A}(10000)(100)$$

Où :

N= nombre total de tâches dans le paysage
A= superficie totale du paysage en m²

Remarque : *L'équation de cet indice est issue du manuel des mesures du logiciel Fragstat et dans un but pédagogique elle a été décomposée en (10000)(100) alors que nous aurions pu directement mettre 1 000 000.*

Il est un bon complément aux autres indicateurs proposés précédemment puisqu'il va permettre d'apprécier la fragmentation ou l'uniformité du paysage. Ainsi, le résultat obtenu est le nombre de tâches d'un type d'habitat par rapport à la surface totale du site. **L'unité de mesure de cet indice est un nombre de tâches pour 100 hectares.**

Dans notre étude, les indices obtenus sont quasiment identiques (voir figure 14) sauf pour certaines classes d'habitats qui correspondent aux modifications apportées lors des différents scenarii (par exemple la classe sol nu qui a été la plus modifiée).
Cet indice peut être un bon indicateur dans le cas de l'étude de zones très complexes ou hétérogènes.

.

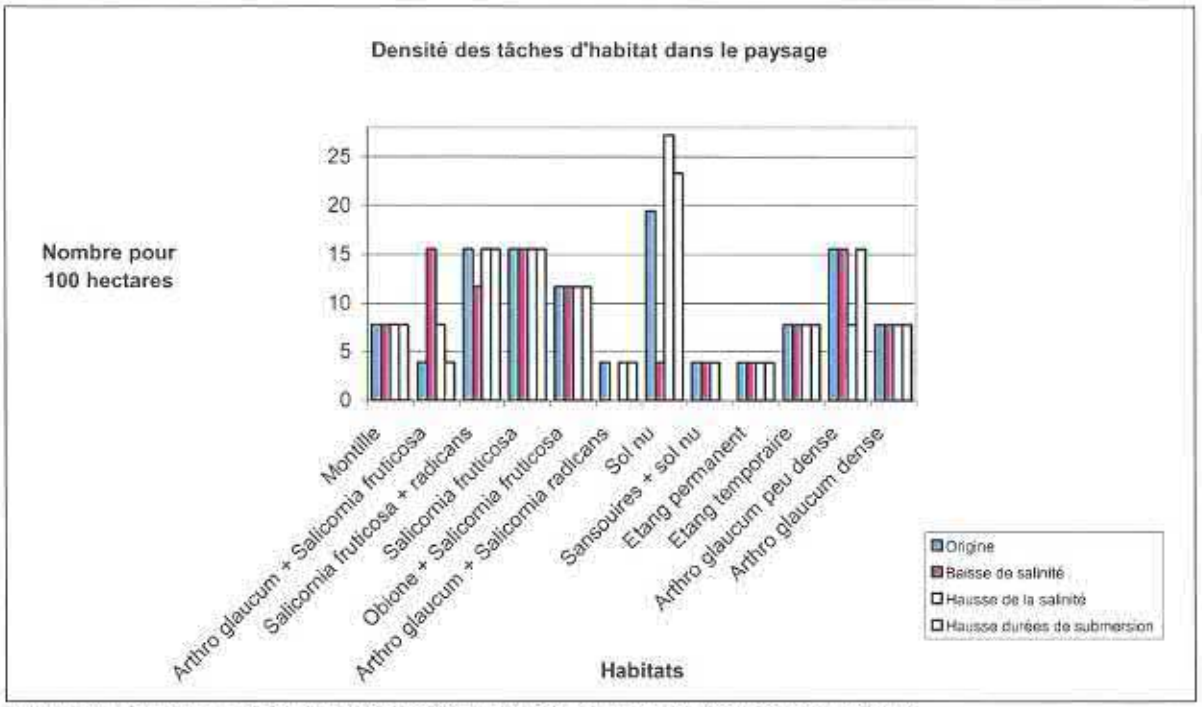


Figure 14 : Evolution de la densité des tâches dans le paysage en fonction des scénarii

Remarque : *Cette mesure est complémentaire du MPS (Mean Patch Size) qui permet d'évaluer la taille moyenne des tâches (périmètre).*

III.2.2.4. ' Largest Patch Index" (LPI) et mesure de la fragmentation

Cet indice semble encore être relativement peu utilisé dans l'étude des paysages. Cependant, il offre la possibilité d'appréhender l'évolution de la mosaïque du paysage dans son organisation spatiale puisqu'il mesure la part de la tâche la plus vaste de chaque habitat dans le paysage.

La formule de cet indice est :

$$LPI = \frac{\max_{j=1}^{n}(a_{ij})}{A}(100)$$

Où :

a_{ij} = surface en m² de la tâche ij (tâche la plus vaste de chaque classe)
A = surface totale du paysage (m²)

Cet indice se calcule au **niveau classe** et il permet **de mesurer la dominance** d'une classe dans le paysage par rapport aux autres. Au niveau de l'évolution spatiale des différents habitats présents, cet indice sera d'une très grande utilité.

En effet, associé au nombre de tâches, il permet d'évaluer le degré de fragmentation ou au contraire d'agrégation des tâches des différents habitats dans la mosaïque du paysage. Or, en écologie, il est reconnu que les habitats fragmentés seront plus vulnérables que des habitats compacts. Ainsi, à travers l'analyse de la structure intrinsèque des habitats, c'est une analyse de l'état de vulnérabilité qui est réalisée.

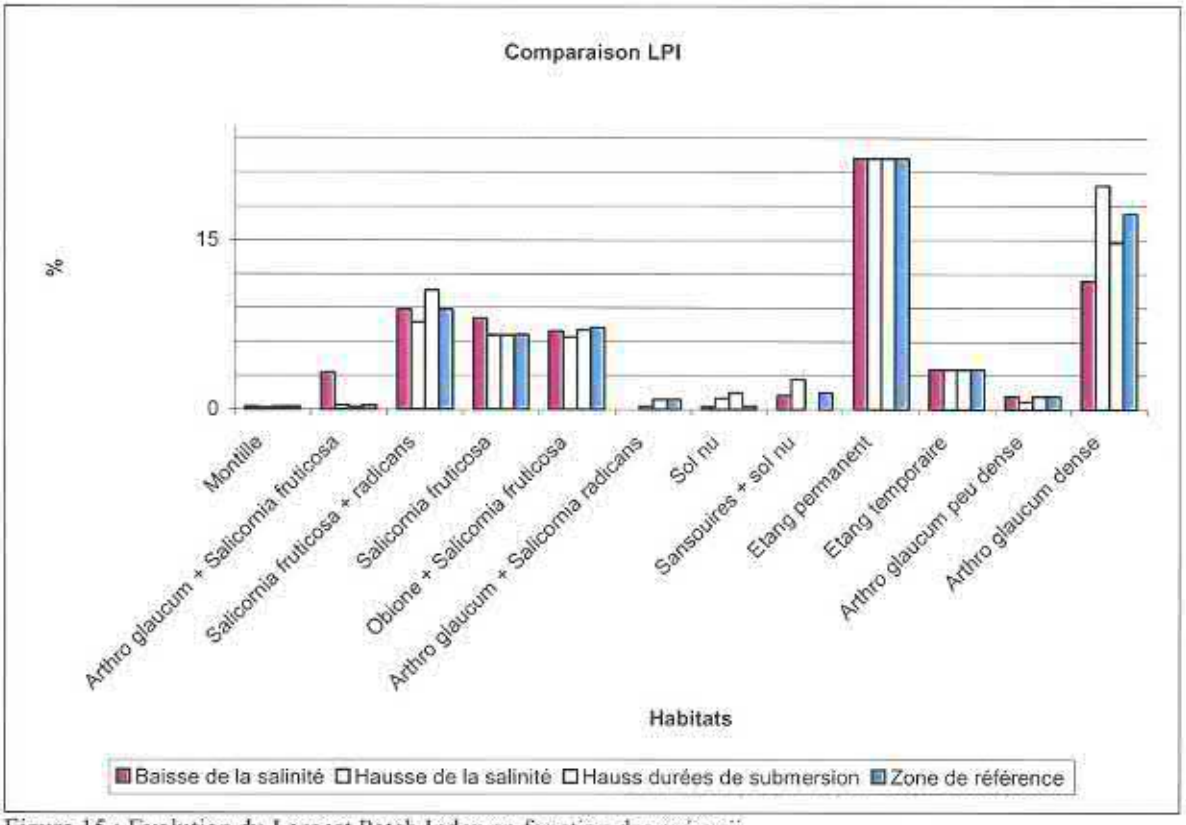


Figure 15 : Evolution du Largest Patch Index en fonction des scénarii

Le LPI est tributaire de la superficie des différents habitats, c'est pourquoi les niveaux les plus élevés correspondent aux habitats les plus vastes (comme les étangs permanents ou l'*Arthrocnenum glaucum*). Cependant, cet indice va nous permettre d'évaluer l'agrégation (s'il augmente) ou la fragmentation (s'il diminue) des classes d'habitats. D'autre part, son niveau d'étude se situe entre le niveau Classe et le niveau Tâche

III.2.2.5. Le Landscape Shape Index (LSI)

Ce dernier indice que nous avons calculé afin d'évaluer sa pertinence n'a semble t il été que très peu utilisé par les écologues mais l'a été en géographie notamment sur l'étude de limites de couronnes autours des centres urbains. C'est donc dans une perspective expérimentale que nous allons l'employé en estimant tout de même qu'il peut apporter de nombreuses informations utiles au suivi des habitats naturels. En effet, le LSI mesure la longueur totale des limites des différentes classes qui composent le paysage. A la manière de l'indice fractal qui est la mesure de forme la plus connue, il permet de mettre en évidence les transformations morphologiques des habitats (aux niveau tâches et classes).

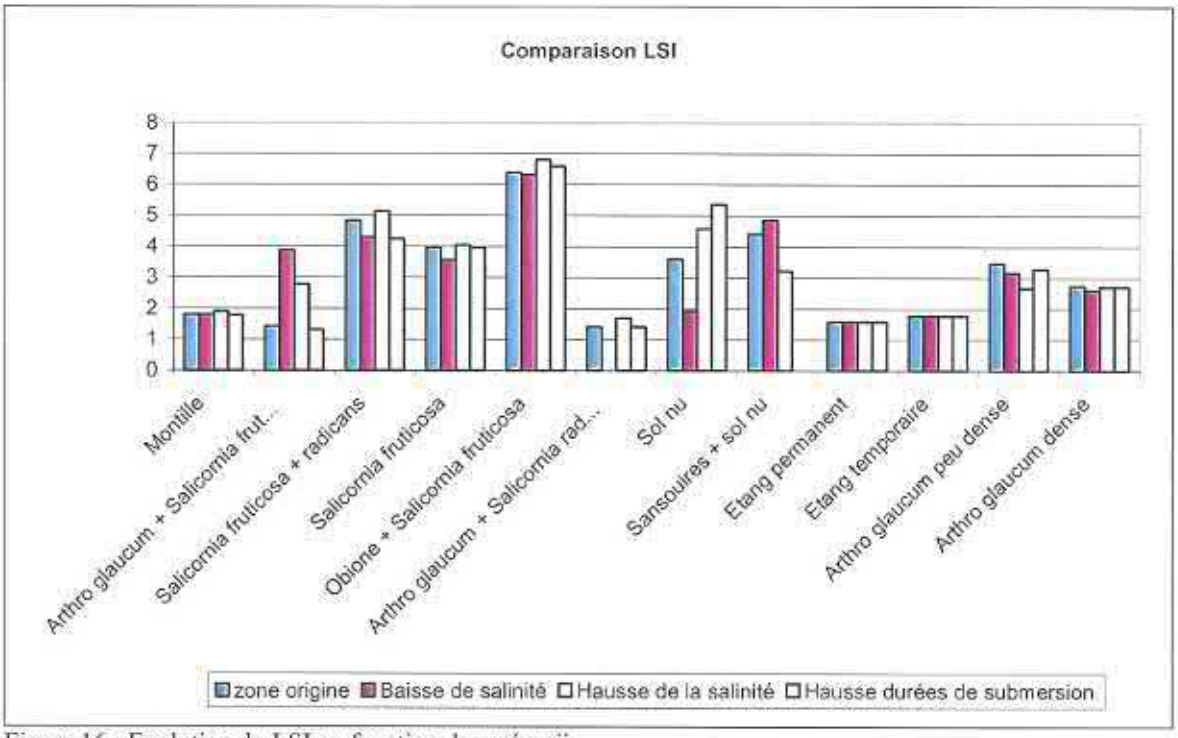


Figure 16 : Evolution du LSI en fonction des scénarii

C'est pourquoi, il peut être intéressant d'utiliser ce type d'indice notamment pour évaluer l'état de vulnérabilité des différents habitats.
Sa formule est :

$$LSI = \frac{.25\sum_{k=1}^{m} e_{ik}^{*}}{\sqrt{A}}$$

où :

e^{*}_{ik} = longueur totale en m des limites dans le paysage entre les tâches de classe i et k qui inclue l'entière limite du paysage et tous les segments présents dans le fond (background).
A = surface totale du paysage en m².

L'intérêt de cet indice réside dans le fait qu'il est directement interprétable de par sa standardisation (rapporté à la surface du paysage). Cependant, cet indice pose certains problèmes en vue d'être proposé comme indicateur spatial. En effet, les variations de résultats du LSI peuvent être interprétées de plusieurs manières. Dans le cas d'une augmentation, s'agit-il d'une augmentation de la surface de l'habitat, d'une complexification des limites de cet habitat ou d'une fragmentation ?

Il est donc nécessaire de le coupler avec d'autres indices pour tirer des conclusions. Ainsi, le LSI doit être combiné avec l'évolution des surfaces pour vérifier que les variations constatées sont ou ne sont pas liées à des variations de surfaces. D'autre part, les variations de cet indice peuvent être dues à une évolution de la structure d'une classe d'habitats. En effet, dans le cas d'une multiplication des tâches d'un habitat, la valeur du LSI va augmenter à cause de la longueur des limites... On le voit, il n'est pas simple d'utiliser cet indice en tant qu'indicateur et il aurait été probablement plus judicieux de calculer les variations de la dimension fractale moyenne des différents habitats.

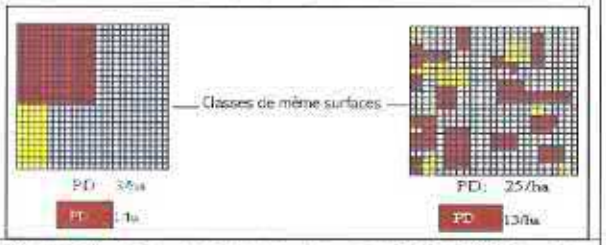
Conclusion partielle :

Les différents indices que nous avons testés sur cette zone peuvent ils être considérés comme des indicateurs spatiaux capables de répondre aux besoins des gestionnaires ? Cette question doit être posée puisque nous ne pouvons nous contenter de proposer un panel d'indices qui ne seraient pas adaptés et/ou efficaces quant au suivi des habitats naturels à partir de données d'observation de la Terre. C'est pourquoi, bien que nous ayons reçu un à priori favorable pour les différents indicateurs proposés, ils doivent dorénavant être utilisés par les gestionnaires.

Ainsi, il s'avère que les indices les plus simples (surfaces des habitats, part des surfaces des habitats dans le paysage) sont aussi les plus fiables pour analyser les évolutions spatiales et peuvent tout à fait être considérés comme indicateurs spatiaux. Cependant, si l'indicateur « surfaces » nous donne une information quantitative sur l'évolution de tel ou tel habitat, il ne nous renseigne pas sur la manière dont cet habitat évolue. C'est pourquoi, les indices LSI, LPI et Patch Density sont de bon compléments puisqu'ils permettent de mesurer si l'augmentation surfacique d'un habitat est liée à l'augmentation d'une seule tâche (LPI) ou bien au morcellement d'une tâche associée à l'apparition de nouvelles tâches du même type.
Cependant, les indices LPI et LSI nécessitent d'être couplés à d'autres indicateurs afin de donner une information relativement fiable.

Or un indicateur peut-il être un ensemble d'indices qui, combinés, donnent un certain nombre d'informations ? Il semble que la définition d'un indicateur proposée par l'OCDE ne permette pas de considérer ces indices comme étant de « bons » indicateurs du fait de leur grande complexité et de leur incapacité à synthétiser des informations de manière simple et stable.
Pourtant ces indices, bien que devant être associés à d'autres, offrent une réelle information pour les gestionnaires. En effet, le LPI, associé au Nombre de tâches va permettre d'évaluer l'état de fragmentation des habitats. Par contre le LSI devra être couplé à la surface, au nombre de tâches d'habitats et à la longueur totale des limites des habitats afin de déterminer si les variations observées sont dues à une évolution de surface, de formes ou de la diversité...
Nous comprenons mieux à présent pourquoi les écologues ont très peu utilisé cet indice dans leurs travaux liés au suivi des habitats naturels.

Enfin, cette analyse effectuée à partir de fichiers raster mériterai d'être approfondie notamment afin de tester l'impact des résolutions et des échelles de travail sur les résultats obtenus.

Exigences Zone géographique	Thème	Niveau	Type Pression Etat Réponse	Indicateur proposé	Commentaires
Paysage	Observation des habitats	Classe	E	• surfaces • Pourcentage du paysage	Indicateurs surfaciques simples à mettre en œuvre.
Paysage	Structure du paysage Qualité de l'habitat	Classe/ tâche	E	**Patch Density (PD)** $PD = \frac{N}{A}(10000)(100)$ N= nombre total de tâches dans le paysage A= superficie totale du paysage en m² Le nombre de tâches pour 100 hectares donne une information sur le degré de fragmentation du paysage.	Nombre de tâches pour 100 hectares. Donne une information sur le degré de fragmentation du paysage 
Surveillance spécifique des habitats	Qualité de l'habitat	Classe/ tâche	E	**Largest Patch Index (LPI)** $\frac{\max_{j=1}^{n}(a_{ij})}{A}(100)$ a_{ij} = surface en m² de la tâche ij A = surface totale du paysage (m²)	Permet de mesurer la vulnérabilité des habitats. Analyse de l'importance de la tâche la plus importante (en surface) de chaque habitat par rapport à la surface totale du paysage. Valeur en pourcentage. Peut être combiné avec le Nombre de tâches et/ou les surfaces.
Surveillance spécifique des habitats	Qualité de l'habitat	Paysage/ classe	E	**Landscape Shape Index (LSI)** $\frac{.25\sum_{k=1}^{m} e^{*}_{ik}}{\sqrt{A}}$ e^{*}_{ik}= longueur totale en m des limites dans le paysage entre les tâches de classe i et k qui inclue l'entière limite du paysage et tous les segments présents dans le fond (background). A= surface totale du paysage en m².	Le LSI doit être associé à : - Surface - Nombre de tâches Permet d'étudier les évolutions de la complexité des limites des habitats (érosion ou dilatation)

III.3. L'altitude peut-elle être considérée comme un indicateur ? Exemple de la Tour du Valat

A partir du MNA et de la cartographie de la végétation dominante que nous avons réalisée par photo-interprétation, nous avons cherché à analyser la répartition de la végétation en fonction des couches d'altitudes. En effet, sur de zones deltaïques comme la Camargue, nous pouvons aisément estimer que le micro relief joue un grand rôle dans la répartition de la végétation et ce pour plusieurs raisons. D'une part les zones de faible altitude auront tendance à être submergé par les eaux de surface et sous l'influence des remontées de nappe. D'autre part, les zones plus basses seront généralement plus salées que sur les zones surélevées. Toutes ces considérations sont une réalité en Camargue dans sa partie lagunaire ou palustre (comme l'est notre zone d'étude) mais ne peuvent être reprises dans la partie Nord de la Camargue ou sur d'autres zones côtières de faible altitude.

III.3.1. La démarche

A partir de la base de données que nous possédons et des possibilités d'analyse que nous offrent les logiciels de SIG, nous avons calculé la répartition de la végétation en fonction des altitudes.
Ainsi, à l'aide de la cartographie de la végétation et du MNA, nous avons défini 9 classes d'altitudes au sein desquelles nous avons analysé la part de chaque classe d'habitats.

III.3.2. Présentation de la zone d'étude

La réserve de la Tour du Valat, située en plein cœur de la Grande Camargue couvre une superficie d'environ 1000 hectares entièrement classée en zone naturelle protégée (le domaine de la Tour du Valat couvre 3531 hectares).
Elle regroupe un grand nombre d'unités écologiques dont les principales sont :

- les marais temporaires
- les marais permanents
- les Sansouires

Le domaine de la Tour du Valat est essentiellement composé de sédiments d'origine fluviatile déposés par un ancien bras du Rhône, le Rhône d'Ulmet, qui a dessiné l'ensemble du paysage de la Tour du Valat.
La zone sur laquelle nous travaillerons, les Cerisières, est composée d'un ensemble de mares temporaires endoréïques (les eaux ne gagnent pas la mer) d'un grand intérêt écologique lié notamment à la succession de plusieurs habitats au cour de l'année.

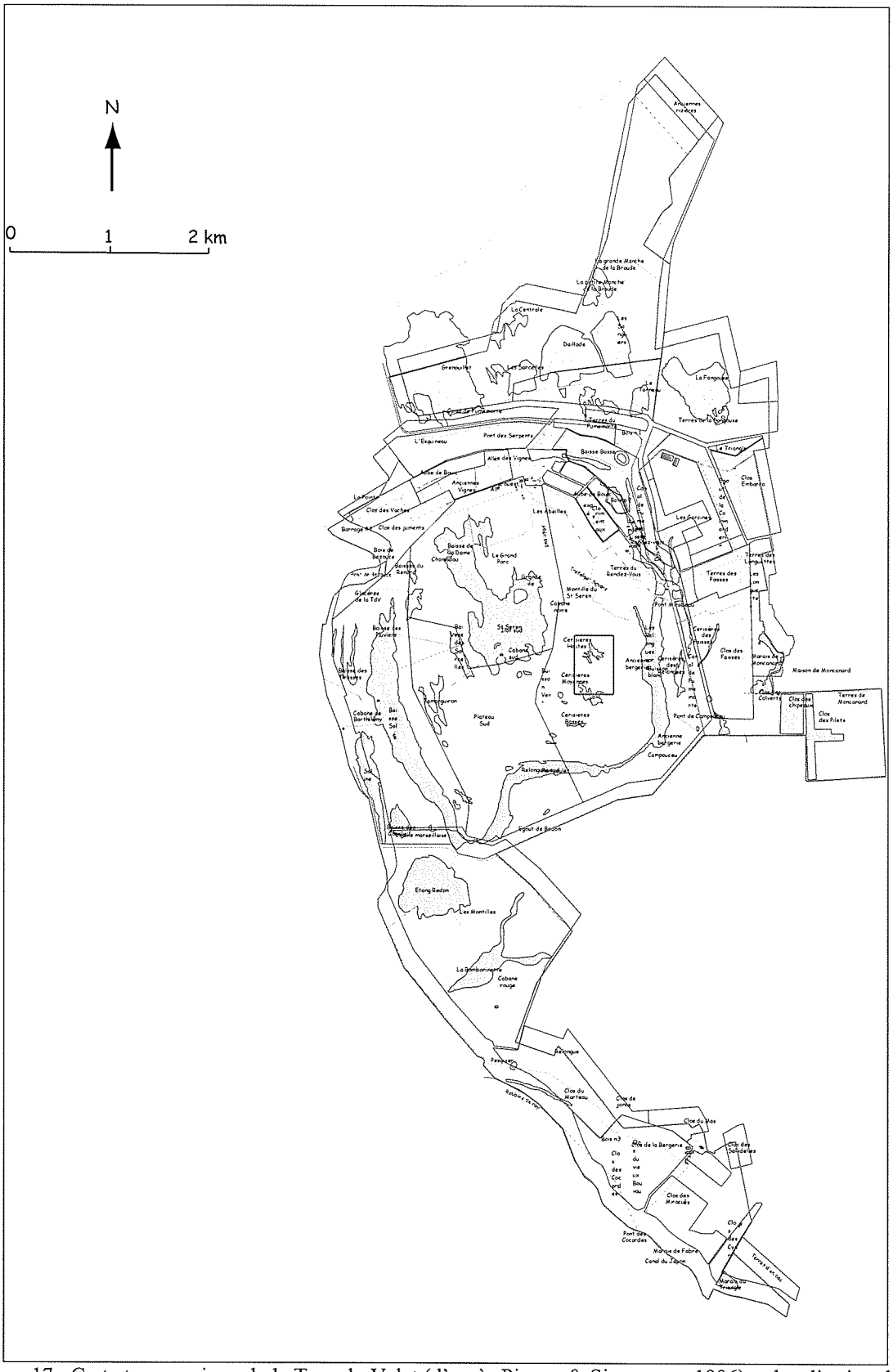


Figure 17 : Carte toponymique de la Tour du Valat (d'après Pineau & Sinassamy, 1996) et localisation de la zone d'étude (encadré rouge)

III.3.3. Les résultats obtenus et questionnements

Les résultats que nous avons obtenus sont très encourageants. En effet, il semble que la végétation soit répartie en fonction des couches d'altitudes.
Ainsi, la *Salicornia fruticosa* est à 77,75% située entre 30 et 40 cm d'altitude et 58% de la classe *Arthrocnemum glaucum* + *Salicornia fruticosa* se trouve dans la même tranche.
L'association Salicornia fruticosa et radicans se retrouve à la même altitude mais surtout à des altitudes inférieures (20/30cm). Cependant, concernant cette classe, il est probable que la *Salicornia fruticosa* soit très peu représentée par rapport à la radicans qui supporte bien des périodes de submersion prolongées. Or les différents niveaux à laquelle se retrouve cette association sont des espaces où l'eau prend une place représentative.

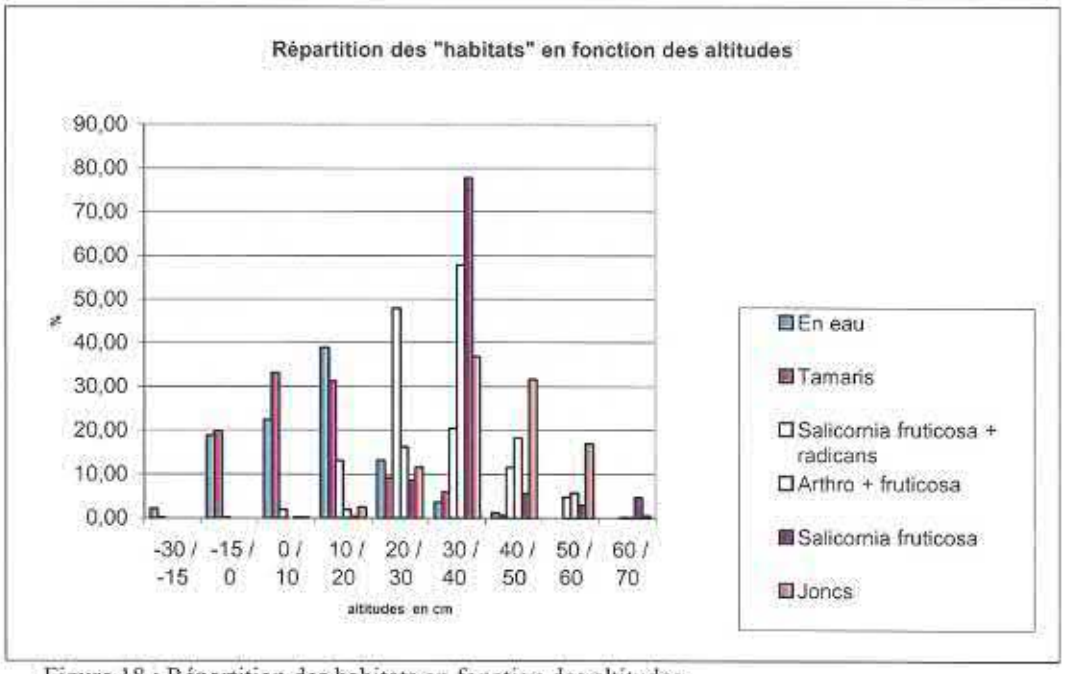


Figure 18 : Répartition des habitats en fonction des altitudes

De manière générale, on constate pour chaque type de végétation des pics dans leur répartition en fonction des couches d'altitude.
Cependant, la zone sur laquelle nous avons travaillé est caractéristique des mares temporaires. Ainsi, le zonage que nous avons effectué à partir de la photo-interprétation d'une image du drône ne tient pas compte de la succession de plusieurs habitats au cour de l'année. La photo ayant été prise alors que la mare était en eau, l'ensemble de la végétation n'a pas été prise en considération. Les zones en eau à cette période de l'année laissent place à une végétation spécifique lors des phases sèches (*Scirpus maritimus* notamment).

Pouvons nous considérer l'altitude comme un indicateur ? La question mérite d'être posée à la vue de ces résultats. En effet, on peut estimer que dans le cas de la Camargue, les altitudes vont influencer la répartition de la végétation. Le relief étant à l'interface de plusieurs processus, il permet de tirer certaines conclusions. Ainsi, les butes sont généralement des anciennes levées de berges ou des vestiges du cordon dunaire et les dépôts sédimentaires leur confèrent des potentialités différentes du milieu environnant qui vont se traduire par des processus écologiques particuliers.
D'autre part, comme nous l'avons déjà souligné, les zones dépressionnaires vont généralement être marquées par une grande influence des eaux de surface mais aussi des remontées de sel

par capillarité lors des phases plus sèches. Ces milieux seront eux aussi marqués par la présence d'une végétation adaptée.

Cependant, considérer l'altitude, qui est certainement un facteur de la répartition de la végétation comme un indicateur revient à modéliser l'espace en estimant qu'à telle altitude nous trouverons tel ou tel type de végétation. La variable altitude ne peut être considérée comme indicateur prise indépendamment car cette variable n'est pas synthétique et ne peut être comparée au fil des années. En effet, si l'on travaille sur des zones stables comme les Cerisières, effectuer un suivi des altitudes serait totalement inutile. Par contre, si nous travaillions sur les étangs inférieurs de la Grande Camargue où les dynamiques sédimentaires sont par endroit bien marquées, le suivi de cette variable serait très intéressant et pourrait être considérée comme indicateur de pression puisqu'en cas d'érosion due à une montée du niveau des eaux, les habitats de bordure seront menacés. Ainsi, la combinaison d'un MNA avec les niveaux d'eau pourra être considérée comme indicateur de submersion puisque les durées de submersion dépendent en grande partie des altitudes et que la répartition de la végétation est liée à ces durées de submersion.

IV. Bilan

IV.1. Des indicateurs spatiaux pertinents ?

IV.1.1. Indicateurs testés sur la RNC

Les quelques indices que nous avons testés sur la RNC peuvent en partie être considérés comme pertinents et être utilisés comme indicateurs spatiaux. Cependant, de nombreux indices très connus et reconnus n'ont pas été calculés pour de nombreuses raisons.
Tout d'abord, il existe une multitude d'indices qui peuvent éventuellement être considérés comme indicateurs spatiaux. D'autre part, il était intéressant de tester des indices simples mais aussi d'autres mesures plus expérimentales et encore assez peu utilisées afin de déterminer leur potentialité.
Ensuite, les différents indicateurs proposés doivent à présent être validés par les différents utilisateurs qui pourront notamment apporter des précisions sur les échelles temporelles et spatiales d'application.
Néanmoins, les indicateurs proposés dans ce travail étant tous issus de l'exploitation de la cartographie des habitats et que celle-ci est effectuée tous les 5 ans, l'échelle de temps de ces mesures sera identique.
Pourtant, il serait intéressant d'effectuer des mesures plus régulières sur les zones ayant une dynamique spatiale assez prononcée (zones anciennement pâturées, soumises à l'augmentation des durées de submersion...). En effet, dans notre travail, nous n'avons pas développer d'indicateurs de Pression et de Réponse par manque de donnés suffisamment étalées dans le temps mais aussi par manque de méthode. Or ces indicateurs sont probablement les plus importants étant donné qu'ils intègrent les activités humaines, les politiques de gestion et leurs impacts et les évolutions « naturelles » du milieu. Ce sont de véritables outils de gestion et non pas de simples inventaires. Certes les indicateurs d'état sont une bonne information mais ils ne tiennent pas compte de tous ces paramètres, ils ne sont que l'analyse spatiale d'un paysage à un moment donné. Cependant, la comparaison de ces états va tout de même permettre d'évaluer des tendances générales de la dynamique de ces milieux.

IV.1.2. Analyse de la répartition

L'analyse de la répartition de la végétation en fonction des altitudes effectuée sur une partie de la Réserve de la Tour du Valat s'est avérée intéressante mais cette seule mesure ne peut en aucun cas être utilisée pour le suivi des habitats naturels. En effet, dès lors qu'une cartographie des habitats aura été réalisée (ce qui ne serait tarder), il sera nécessaire de travailler de la même manière que nous l'avons fait sur la RNC. Cependant, étant donné la taille parfois réduite de certains habitats, la question de l'échelle spatiale pour la cartographie sera déterminante ensuite sur les résultats obtenus par l'analyse du paysage.

IV.1.3. Des indicateurs à ne pas négliger

Comme nous l'avons déjà signalé, il existe une multitude d'indices, considérés comme indicateurs qui n'ont pas été testé ici mais dont nous ne pouvons pas ignorer l'existence. Cependant, nous n'allons pas exposer l'ensemble des indices qui pourraient être considérés comme indicateurs mais nous devons présenter l'indice de Shannon, indice reconnu en écologie du paysage qui permet de mesurer le diversité ou l'hétérogénéité du paysage.

Tout d'abord, nous pourrions citer l'indice de Shannon, qui est une mesure de la diversité ou de l'hétérogénéité du paysage.
Nous n'avons pas présenté cet indice auparavant car les résultats que nous avons obtenus sont difficilement interprétables du fait de leurs faibles variations. Cependant, cet indice permet de connaître l'état de la mosaïque végétale et par comparaison, il mesure l'évolution de la mosaïque et de la biodiversité associée.
L'équation de l'indice de Shannon (SHDI : SHannon Diversity Index) est :

$$SHDI = -\sum_{i=1}^{m}(Pi * LnPi)$$

où :

m= le nombre de type de tâches
Pi= la proportion de domaine recouverte par ce type de tâche

Cet indicateur est déjà largement utilisé en écologie du paysage pour le suivi des habitats naturels et mériterai d'être appliqué en Camargue.

IV.2. Démarche et outils « expérimentaux »

IV.2.1. La démarche

En l'absence de modèles de fonctionnement des habitats en Camargue, la transformation sous validation d'expert des limites des différents habitats semble être une solution intéressante pour la compréhension des processus spatiaux.
Cependant, mettre en place un modèle de simulation qui fonctionne correctement en intégrant l'ensembles des paramètres en Camargue semble pour l'heure assez utopique. Pourtant, le partage de la Camargue en différents grands secteurs biogéographiques (lacustre, lagunaire, alluvial...) permettrai de faciliter probablement la modélisation.
De plus, cette démarche permet de s'affranchir des problèmes d'acquisition des données. Cependant, il est bien évidemment nécessaire que les bases de données soient toujours les mêmes afin de pouvoir comparer efficacement les différents indicateurs spatiaux

IV.2.2. Expérimentation de nouveaux outils de télédétection

Au cour de ce travail, nous avons eu la chance de pouvoir expérimenter l'utilisation d'un drône pour prendre des photos aériennes de très haute résolution. Il semble que ce type d'image pourra par la suite être d'une très grande utilité pour le suivi des habitats naturels prioritaires. En effet, sa maniabilité autorise la prise de photos « à la demande » sur des zones relativement réduites, ce qui dans le cadre du suivi d'habitats successifs (par exemple les Cerisières et toutes les mares temporaires) pourra s'avérer très utile.
D'autre part, la très haute résolution des images prises d'un drône est un autre atout. En effet, en fonction des altitudes de vols, des objectifs utilisés et de la résolution du scanner utilisé, l'image du drône pourra avoir une résolution d'environ 5 cm au maximum. Ainsi, les travaux de photo interprétation seront facilités lorsqu'il s'agira d'étudier des habitats relativement restreints et peu visibles sur les autres types d'images.

Cette très haute résolution est un bon complément aux autres sources de données de télédétection. En effet, nous pouvons très bien imaginer travailler avec des images spot à 20 m de résolution couplées à ce type de données sur les zones qui nécessitent une précision plus grande. Dans le cadre du projet EON 2000+, qui rappelons le a pour objectif de développer des indicateurs spatiaux à partir des données d'observation de la terre, il est probablement intéressant de ne pas négliger ce type de perspectives techniques.

Conclusion

Cette étude a permis de développer et de calibrer un certain nombre d'indicateurs qui devront être validés. Le choix de ces indicateurs, après validation, devrait apparaître comme bien adapté aux problématiques de surveillance des habitats naturels. Cependant, nous devons être conscients qu'un important travail restera à faire pour acquérir les données nécessaires à la mise en place d'indicateurs. De plus, il est souhaitable qu'un protocole soit mis en place afin de définir les modes d'utilisation de tel ou tel indicateur.

La démarche employée et les outils testés ont montré de grandes potentialités. En effet, les outils de mesure de la structure du paysage sont un excellent moyen de valorisation des données spatialisées. Cependant, il est nécessaire de maîtriser les différents indices et notamment leur mode d'utilisation. Ainsi, déterminer les échelles temporelles et spatiales de l'utilisation de tel ou tel indicateur semble aujourd'hui fondamental si nous voulons les rendre effectivement opérationnels. Le renouvellement des cartographies des habitats naturels (tous les cinq ans), doit permettre la mise en place des modèles de fonctionnement de ces écosystèmes afin de simuler leurs évolutions spatiales et donc de faire de la prospective et offrir aux gestionnaires un outil d'anticipation.

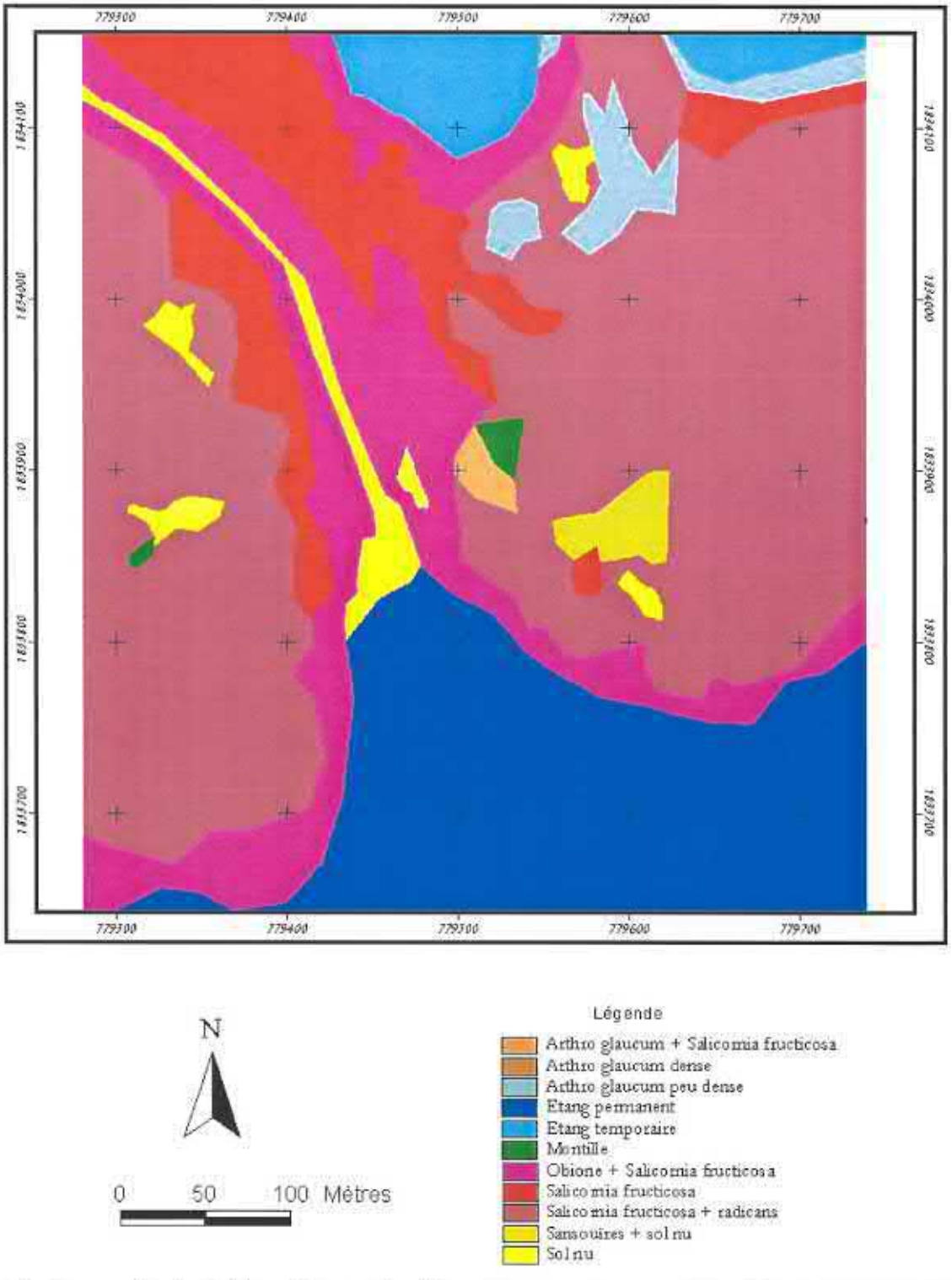
La mise en place d'indicateurs spatiaux pour le suivi des habitats naturels n'est pas simple. Il devient urgent pour le maintien d'une biodiversité importante et notamment les habitats des zones humides méditerranéennes de les rendre au plus vite opérationnels. L'approche de l'écologie du paysage associée aux données de télédétection offre de belles perspectives. Ce travail exploratoire a tenté de montrer la pertinence de certains indicateurs en les testant sur des évolutions spatiales possibles Il est nécessaire dorénavant de proposer de nouveaux indicateurs et attendre l'avis des gestionnaires après utilisation.

Enfin, l'utilisation d'images issues de la télédétection de Très Haute Résolution semble être envisageable pour ce type de suivi. Il sera toutefois nécessaire d'effectuer une étude préalable de l'impact de la résolution et des échelles spatiales sur les résultats obtenus. Par exemple, une même tâche d'habitat n'aura pas le même trait de limite en fonction des résolutions et la structure du paysage sera-t-elle aussi différente...

Toutes ces questions en suspend sont autant d'axes de travail nécessaires pour la mise en œuvre opérationnelle d'un réel outil de suivi issu de l'observation de la Terre et il ne nous reste plus qu'à souhaiter que les indicateurs spatiaux issus de ce projet EON 2000+ pourront par la suite être utilisés dans d'autres milieux que les zones humides de Camargue.

CARTES

Zone de référence



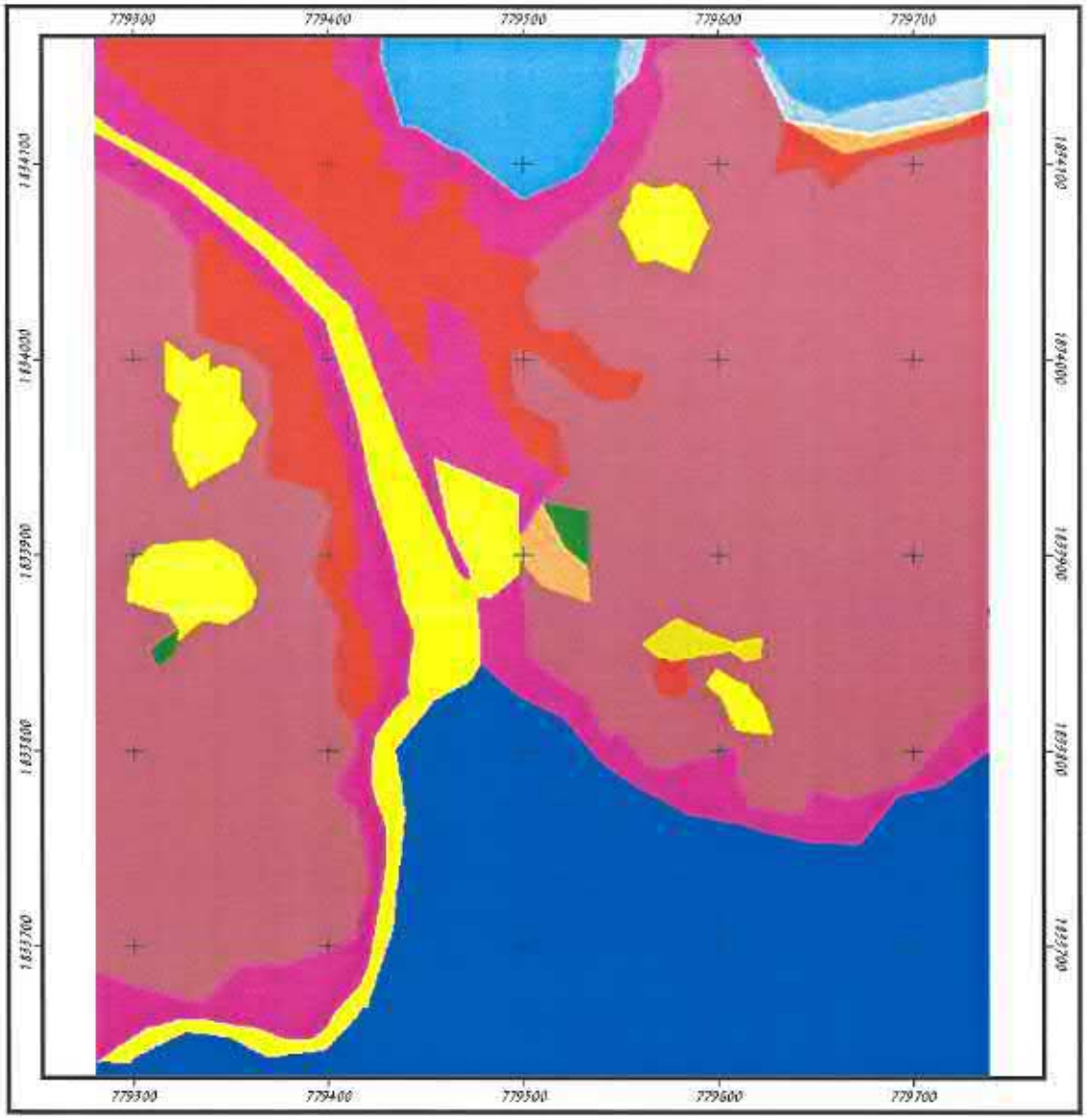
Carte 1 : Cartographie des habitats de la zone de référence

Durées de submersion



Carte2 : Cartographie des habitats pour une augmentation des durées de submersion

Hausse de la salinité



N

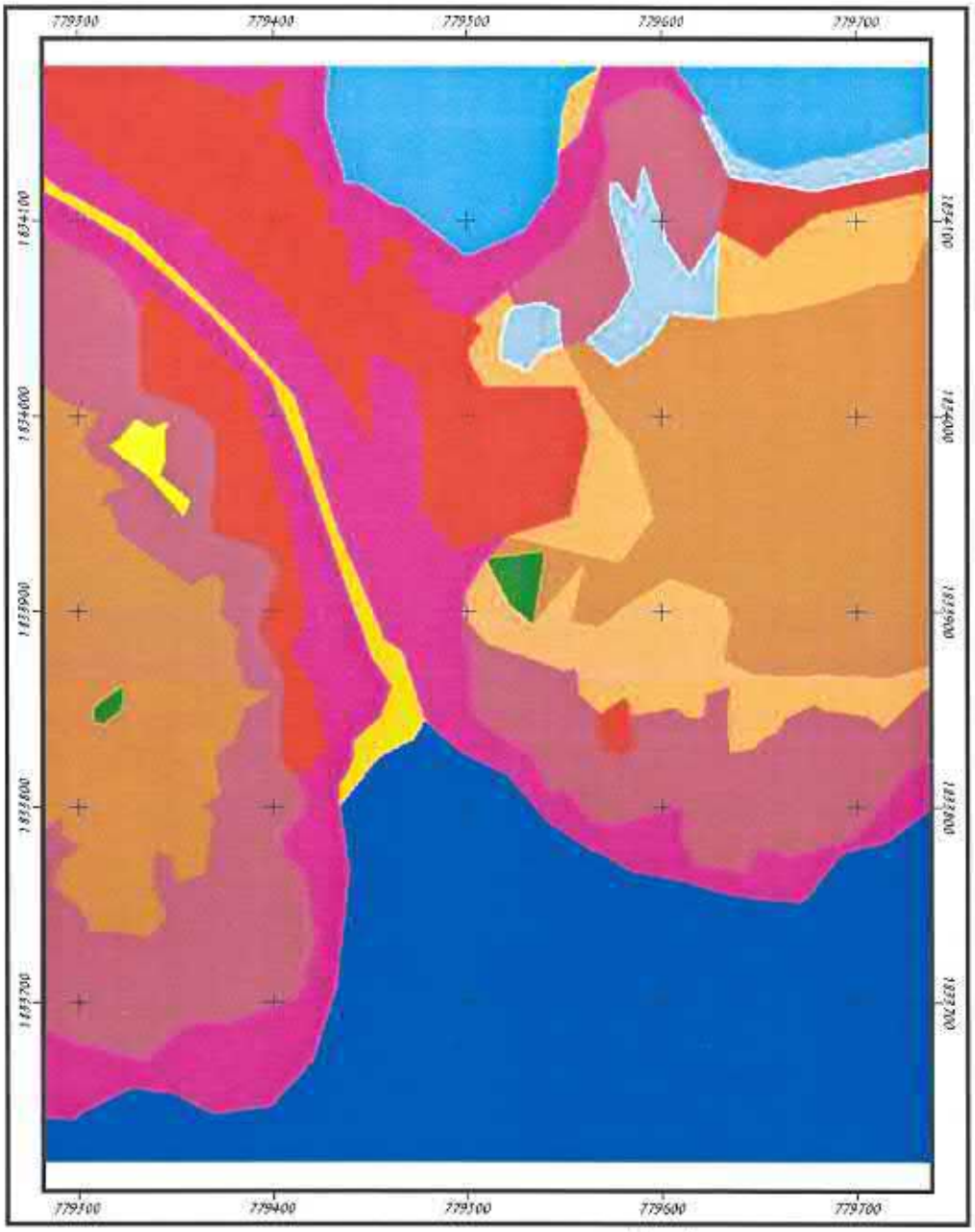
0 50 100 Mètres

Légende

- Arthro glaucum + Salicornia fructicosa
- Arthro glaucum dense
- Arthro glaucum peu dense
- Etang permanent
- Etang temporaire
- Montille
- Obione + Salicornia fructicosa
- Salicornia fructicosa
- Salicornia fructicosa + radicans
- Sansouires + sol nu
- Sol nu

Carte 3 : Cartographie des habitats en cas de hausse de la salinté

Baisse de la salinité



Carte 4 : Cartographie des habitats en cas de baisse de la salinité

Références bibliographiques

BAUDRY J. & BUREL F. – Ecologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. Tec et Doc, Paris, 1999, 359p.

DELCROS P. - Ecologie du paysage et dynamique végétale post-culturale. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, « Etudes » du Cemagref, série Gestion des territoires n°13, Grenoble 1994, 269 p.

ESTREGUIL C. & al. – Landscape typology and indicators for Nature Conservation. Contribution to the monitoring of Natura 2000 and the European Spatial Development Perspective (ESDP). EUR report reference number ?, 2001, in press.

FROHN E.C. – Remote sensing for landscape ecology. New metrics indicators for monitoring, modelling and assessment of ecosystems. Boca Raton, 1998, 99 p.

GROSSMANN A., Conseillère scientifique du Conservatoire Régional de la Flore, de la Faune et des Espaces Naturels en Langudoc- Roussillon (COFREN), Centre National des Etudes Spatiales, Programme SPOT 4 – MIR. 56 p.

LEONARD O. – Elaboration d'indicateurs spatiaux de suivi des espaces naturels. Expérimentation sur le territoire de la Réserve Nationale de Camargue. DEA « Structures et dynamiques spatiales ». Université de Nice Sophia Antipolis, 2002, 80 p.

Mc GARRIGAL K. & MARKS B. J. – Fragstats: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. USDA Forest Service General Technical Report. PNW- 351, 1995, 27 p.
Consultable sur inernet àl'URL:
http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/documents/fragstats_documents.html

MILHE N. – Essai de misc en place d'une méthodologie adaptée au suivi d'une zone humide méditerranéenne, exemple de la réserve de la Tour du Valat. Mémoire de maîtrise de

géographie. Université de Provence (Aix-Marseille I). UFR des sciences géographiques et de l'aménagement. Station biologique de la Tour du Valat. 2002, 54 p.

NOSS R.F. – Indicators for monitoring biodiversity : a hierarchical approach. Biological conservation, 4, 1990, p. 355-364

PINEAU O. & SINASSAMY J.M. – « Plan de gestion de la Tour du Valat, 1996-2000. Camargue, France. Section A, « Approche descriptive et analytique.

ROBIN M. – La télédétection. Fac Géographie, Nathan Université, 1995, 318 p.

SALLES E. – Définition d'indicateurs spatiaux pour le suivi de l'état de conservation des habitats naturels. Application à la Grande Camargue. Mémoire de fin d'étude de l'Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg. 2001, 98 p.

SEJALON S. – Contribution à la définition d'une méthode pour l'évaluation de l'évaluation des sites Natura 2000. Application au Parc National du Mercantour. Mémoire de fin d'étude pour le diplôme d'ingénieur de l'ENSHAP, 2002, 39 p. + annexes.

TOMAS-VIVES P. – Suivi des zones humides méditerranéennes. Guide méthodologique. Wetlands International, ICN, CEC-Medwet, 1996, 187 p.

TURNER G. , GARDNER R. , O'NEILL R. – Landscape ecology: in theory and practice. Pattern and process. Springer-Verlag New York, Inc., 2001, 332 p.

ZEV NAVEH & LIEBERMAN A. S. – Landscape ecology. Theory and application. Student Edition, Stringer-Verlag, 1990, 356 p.

Sites Internet consultés:

http://europa.eu.int/comm/agriculture/publi/landscape/index.htm

http://agrienv.jrc.it/publications/Ecpubs/agri-ind/

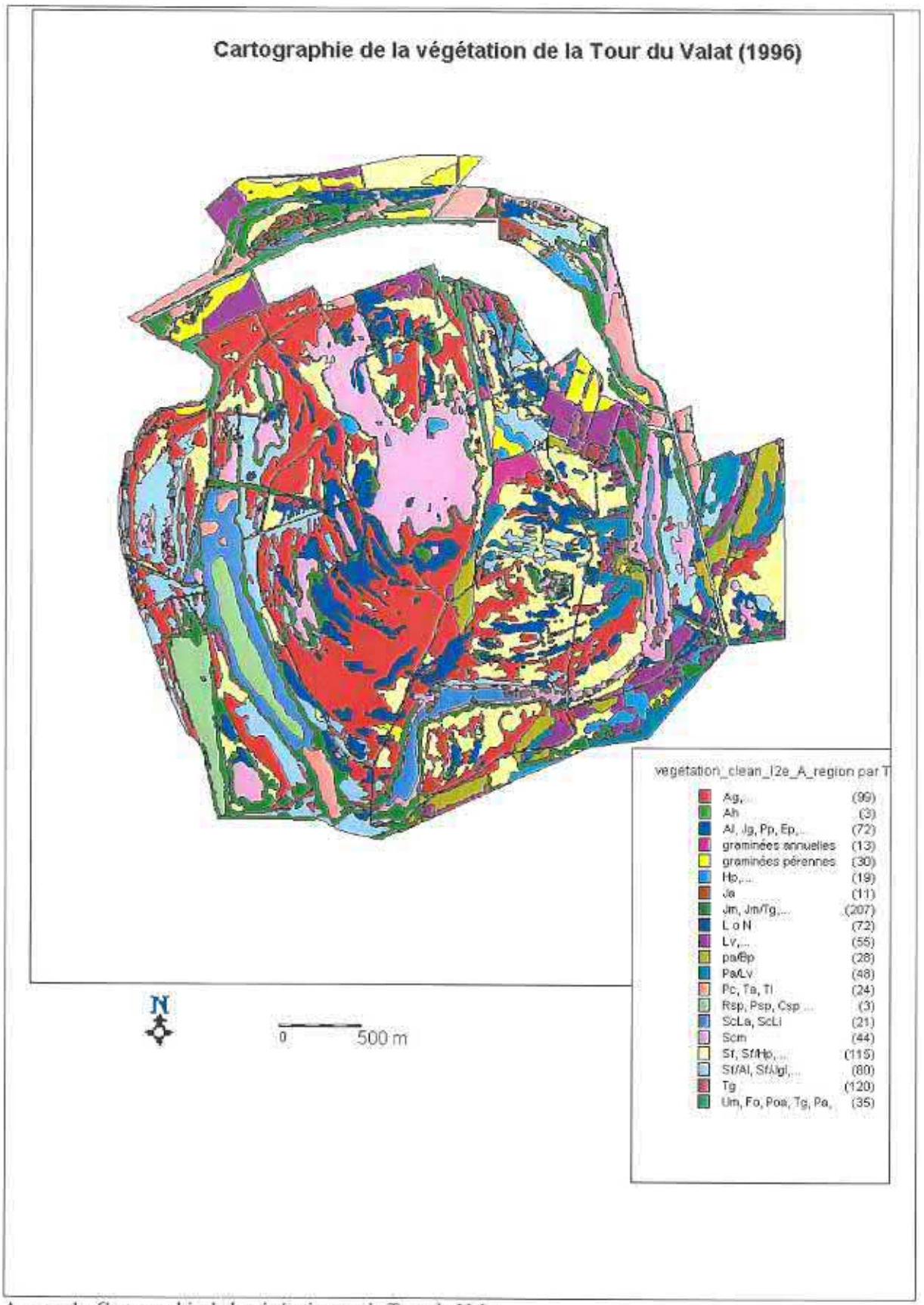
http://www.geo.univ-avignon.fr/Site%20Avignon/pages/labo/Indicateurs.pdf

http://geospace.co.at/EON2000.html

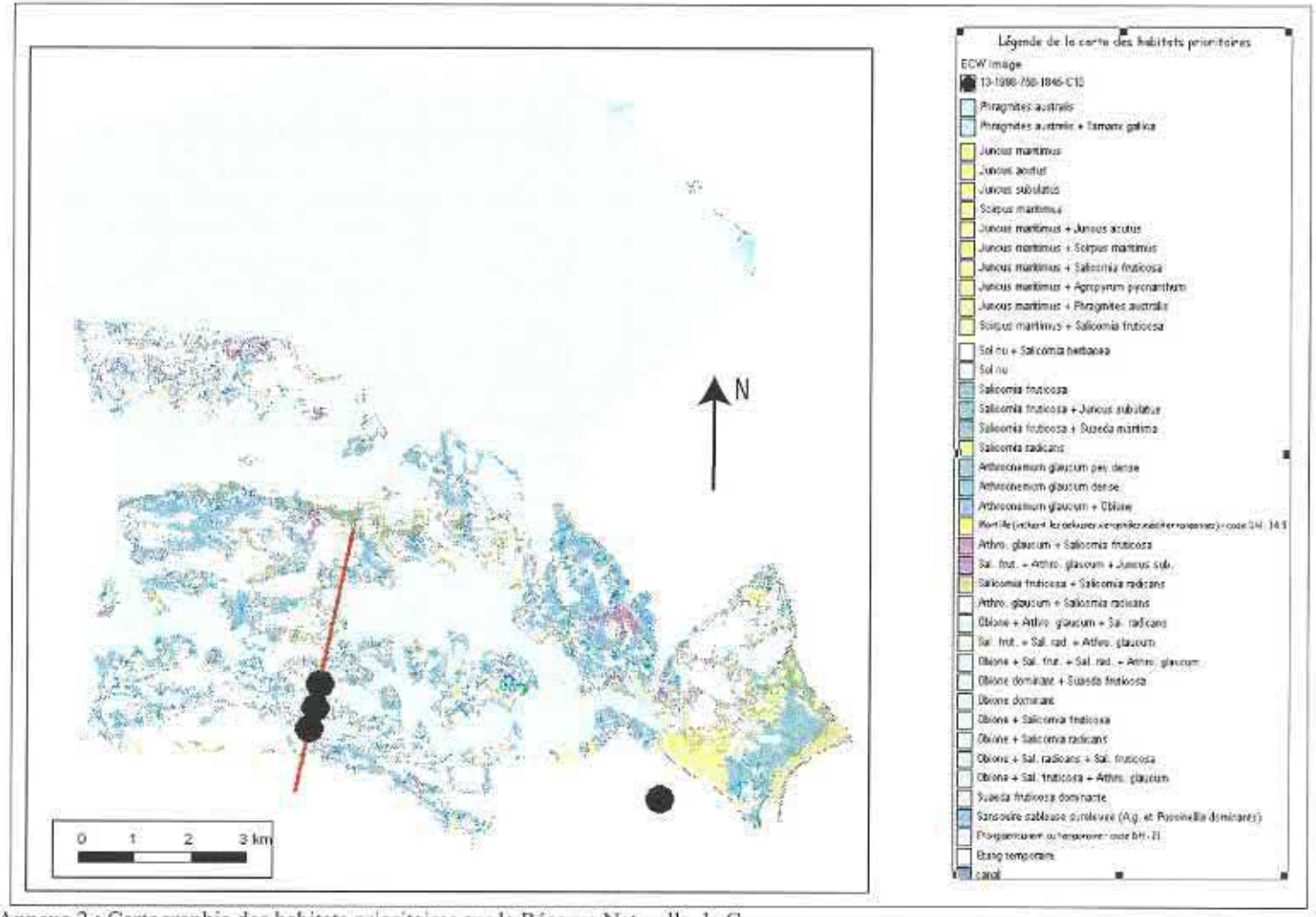
ANNEXES

Table des annexes

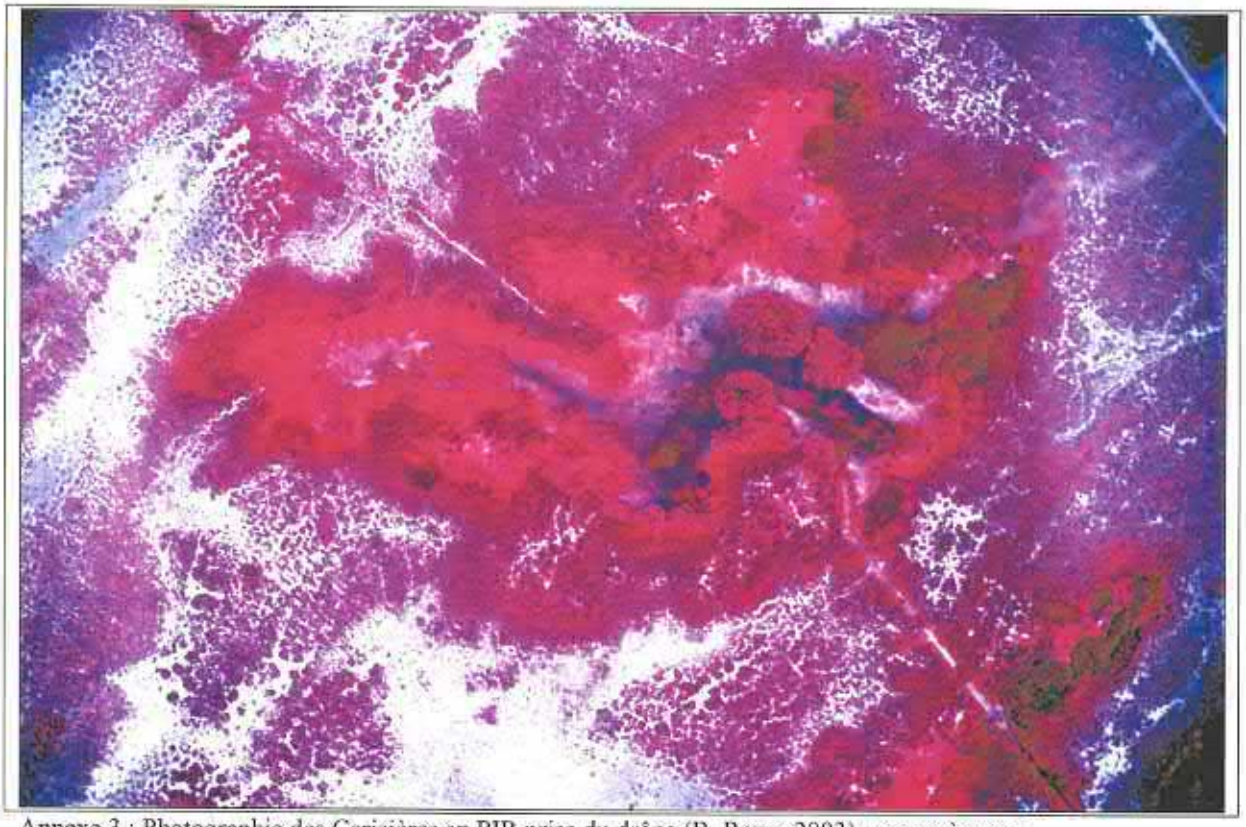
Annexe 1 : Cartographie de la végétation sur la Tour du Valat I
Annexe 2 : Cartographie des habitats prioritaires sur la Réserve Naturelle de Camargue II
Annexe 3 : Photographie des Cerisières en PIR prise du drône (B. Roux, 2003), mare « à sec ». III
Annexe 4 : Photographie des Cerisières en eau prise du drône (B. Roux, 2003) IV
Annexe 5 : Liste des groupements végétaux présents sur la Réserve Naturelle de Camargue . V
Annexe 6 : Cartographie des altitudes sur les Cerisières XIII
Annexe 7 : Fiches d'indicateurs proposés par E. Salles (2001) XIV



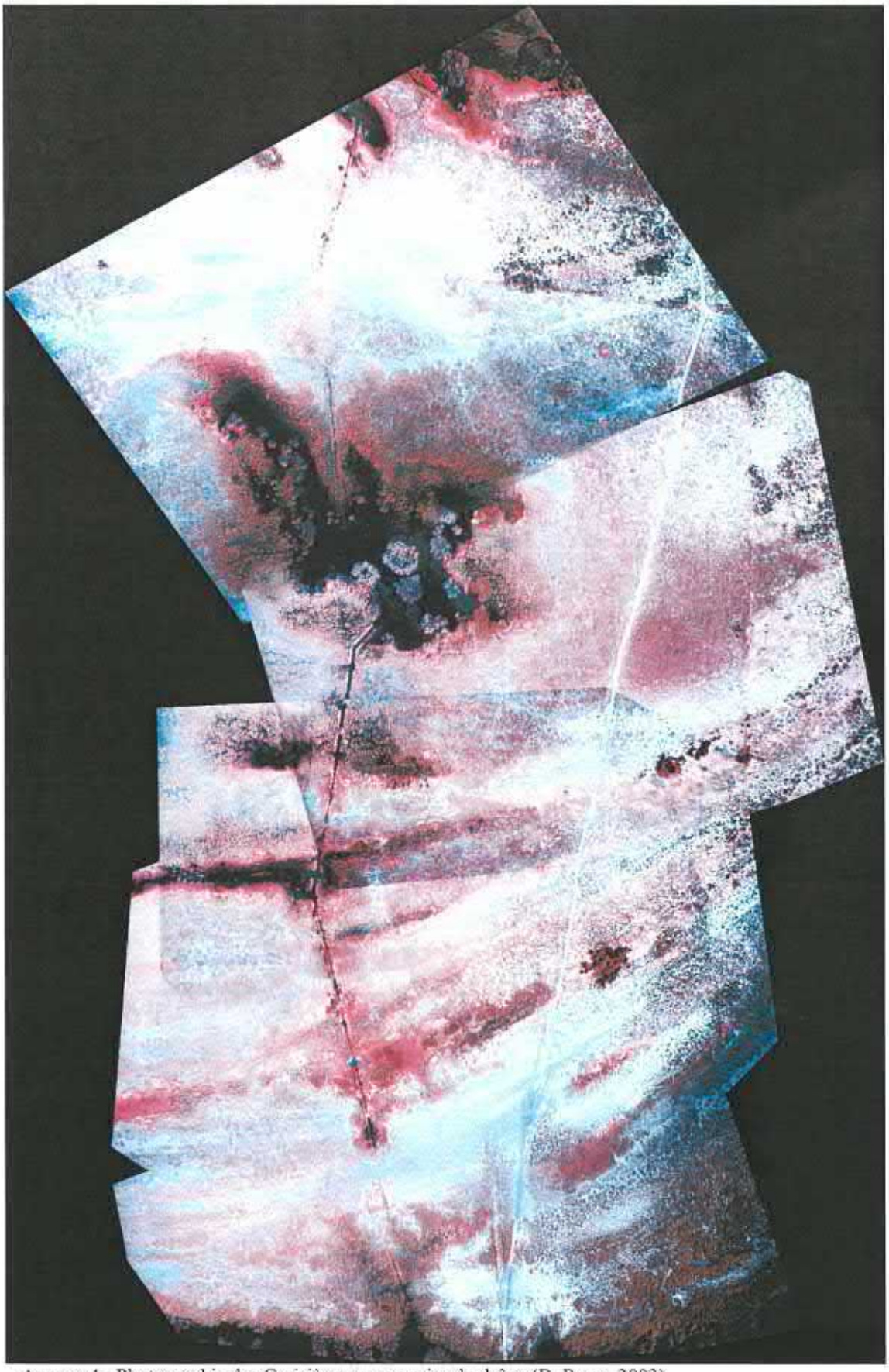
Annexe 1 : Cartographie de la végétation sur la Tour du Valat



Annexe 2 : Cartographie des habitats prioritaires sur la Réserve Naturelle de Camargue



Annexe 3 : Photographie des Cerisières en PIR prise du drône (B. Roux, 2003), mare « à sec ».



Annexe 4 : Photographie des Cerisières en eau prise du drône (B. Roux, 2003)

Annexe 5 : Liste des groupements végétaux présents sur la Réserve Naturelle de Camargue

FORMATIONS VEGETALES	CODE CORINE	CODE DIRECTIVE HABITATS (gras souligné est prioritaire)	CODE NATURA 2000	*SURFACE (ha)*
1)TYPE SANSOUIRE				
Sol nu				*463*
si présence de Suaeda maritima, Bassia hirsuta, Salsola soda	15.56 : Formations annuelles sur laisses (Thero-suaedion)	15.15	1410	
si présence d'Agropyrum elongatum et Inula crithmoides	15.612 : Agropyro-inuletum crithmoidis	15.16	1420	
Sol nu + Salicornia herbacea (cette salicorne annuelle regroupe au moins deux espèces : Salicornia emerici, et Salicornia patula)	15.113 : gazons méditerranéens à salicornes annuelles 15.1131 : gazons à salicorne des "basses" côtes méditerranéennes : Salicornion emerici 15.1133 : gazons méditerranéens des "hautes" côtes méditerranéennes : Salicornion patuli	15.11	1310	*49*
Salicornia fruticosa	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa (= Arthrocnemum fruticosum)	15.16	1420	*641*
Salicornia fruticosa + Juncus subulatus	15.58 : formations à Juncus subulatus	15.15	1410	*57*
Salicornia fruticosa + Suaeda maritima	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa (= Arthrocnemum fruticosum)	15.16	1420	*10*
Salicornia radicans	15.611 : tapis d'Arthrocnemum perenne (= Sarcocornia perenis)	15.16	1420	*83*
Arthrocnemum glaucum peu dense				*459*
si présence de Salicornia herbacea	15.1131 : Arthrocnemo-salicornietum emerici	15.11	1310	
sinon	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	

Arthrocnemum glaucum dense	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	*599*
Arthrocnemum glaucum + Salicornia fruticosa				*174*
	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	
	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa	15.16	1420	
	15.611x 15.613	15.16	1420	
Sal. fruticosa + Arthro. glaucum + Juncus subulatus				*8*
	15.58 : formations à Juncus subulatus	15.16	1420	
	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	
	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa	15.16	1420	
	15.58 X 15.613	15.16	1420	
Salicornia fruticosa + Salicornia radicans				*317*
	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa	15.16	1420	
	15.611 : tapis d'Arthrocnemum perenne	15.16	1420	
	15.611 x 15.612	15.16	1420	
Arthro. glaucum + Salicornia radicans				*227*
	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	
	15.611 : tapis d'Arthrocnemum perenne	15.16	1420	
	15.611 x 15.613	15.16	1420	
Obione + Arthro. glaucum + Sal. radicans				*1,5*
	15.616 : fourrés marins à pourpier marin et Arthro. fruticosi	15.16	1420	
	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	
	15.611 : tapis d'Arthrocnemum perenne	15.16	1420	
	15.611 x 15.613	15.16	1420	
Sal. fruticosa + Sal. radicans + Arthro. glaucum				*117*

	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	
	15.611 : tapis d'Arthrocnemum perenne	15.16	1420	
	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa	15.16	1420	
	15.611 X 15.612 X 15.613			
Obione + Sal. fruticosa + Sal. radicans + Arthro. glaucum				*5*
	15.616 : fourrés marins à pourpier marin et Arthro. fruticosi	15.16	1420	
	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	
	15.611 : tapis d'Arthrocnemum perenne	15.16	1420	
	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa	15.16	1420	
	15.58 x 15.613 X 15.611	15.16	1420	
Obione dominant + Suaeda fruticosa (Obione portulacoides = Halimione portulacoides) (Suaeda fruticosa = Suaeda vera)	15.614 : bosquets d'arbrisseaux à Suaeda vera : Halimiono-suaedetum verae	15.16	1420	*6*
Obione dominant	15.616 : fourrés marins à pourpier marin et Arthro. fruticosi	15.16	1420	*3*
Obione + Salicornia fruticosa				*174*
	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa	15.16	1420	
	15.616 : fourrés marins à pourpier marin et Arthro. fruticosi	15.16	1420	
Obione + Salicornia radicans				*8*
	15.611 : tapis d'Arthrocnemum perenne	15.16	1420	
	15.616 : fourrés marins à pourpier marin et Arthro. fruticosi	15.16	1420	
Obione + Salicornia radicans + Salicornia fruticosa				*23*
	15.611 : tapis d'Arthrocnemum perenne	15.16	1420	

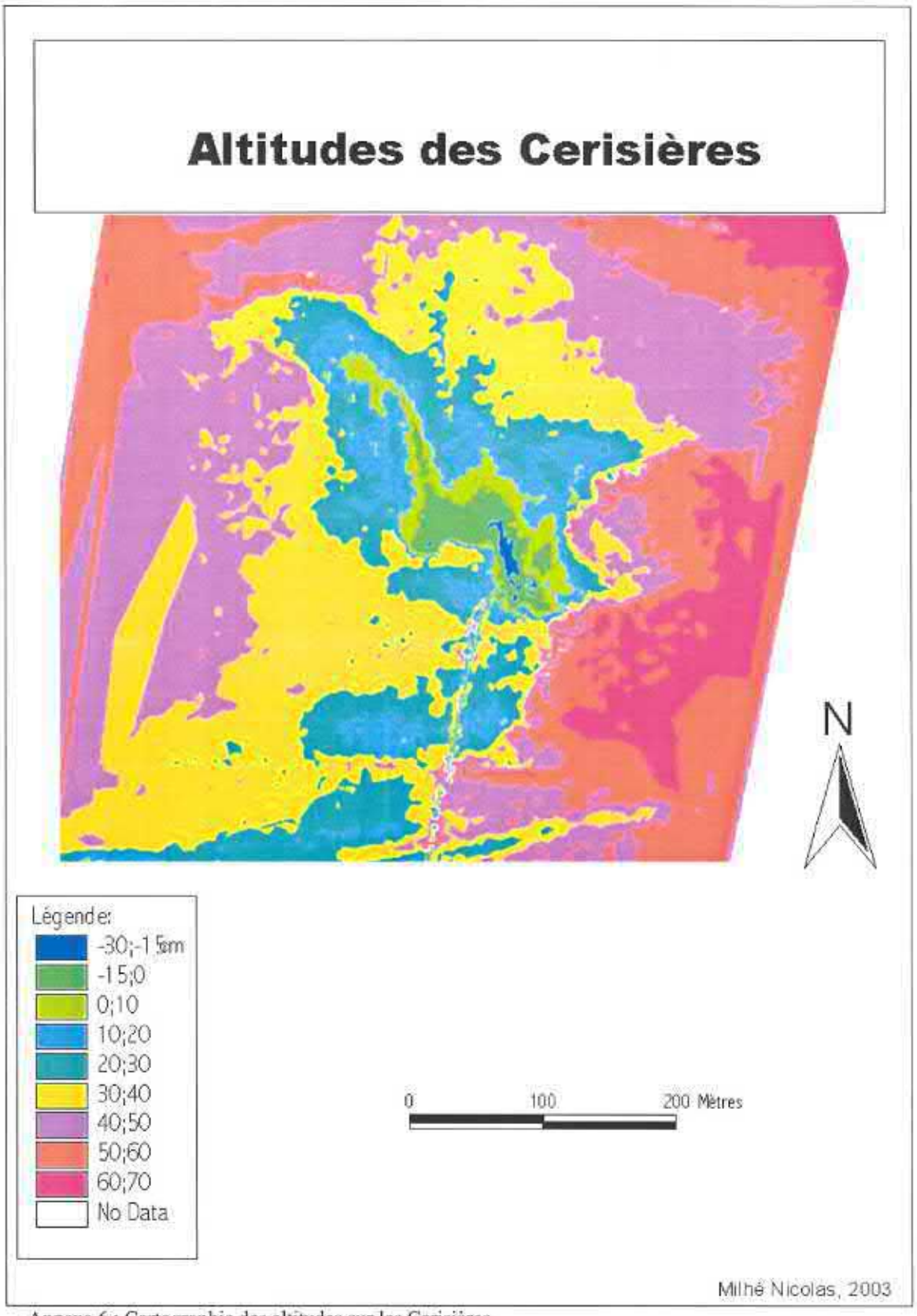
	15.616 : fourrés marins à pourpier marin et Arthro. fruticosi	15.16	1420	
Obione + Salicornia fruticosa + Arthrocnemum glaucum				*38*
	15.613 : bosquets à Arthrocnemum glaucum	15.16	1420	
	15.616 : fourrés marins à pourpier marin et Arthro. fruticosi	15.16	1420	
Suaeda fruticosa dominante	15.614 : bosquets d'arbrisseaux à Suaeda vera	15.16	1420	*8*
Sansouire sableuse surélevée (A.glaucum et Puccinellia dominants)	15.612 : Puccinellio festuciformis-Arthrocnemetum fruticosi	15.16	1420	*18*
2) TYPE JONCHAIES ET JONCHAIES MIXTES				
Juncus maritimus	15.51 : jonchaies à J. maritime ou J. piquant (Juncion maritimi)	15.15	1410	*138*
Juncus acutus	15.53 : Prés méditerranens halopsammophiles (Plantaginion crassifoliae : Junco acuti-Schoenetum nigricantis ou Juncetum acuti)	15.15	1410	*6*
Juncus subulatus	15.58 : formations à Juncus subulatus	15.15	1410	*1*
Scirpus maritimus	53.17 : végétation à scirpes halophiles			*5*
Juncus maritimus + Juncus acutus	15.51 : jonchaies à J. maritime ou J. piquant (Juncion maritimi)	15.15	1410	*1*
Juncus maritimus + Scirpus maritimus				*4*

	15.51 : jonchaies à J. maritime ou J. piquant (Juncion maritimi)	15.15	1410	
	53.17 : Végétation à scirpes halophiles			
	15.51 x 53.37	15.15	1410	
Juncus maritimus + Salicornia fruticosa				*50*
	15.51 : jonchaies à J. maritime ou J. piquant (Juncion maritimi)	15.15	1410	
	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa	15.16	1420	
	15.51 x 15.612	15.15 x 15.16	1410 x 1420	
Juncus maritimus + Agropyrum pycnanthum				*0,2*
	15.51 : jonchaies à J. maritime ou J. piquant (Juncion maritimi)	15.15	1410	
	15.52 : prés salés	15.15	1410	
	15.51 x 15.52	15.15	1410	
Juncus maritimus + Phragmites australis				*1*
	15.51 : jonchaies à J. maritime ou J. piquant (Juncion maritimi)	15.15	1410	
	53.11 : Phragmitaies			
	15.51 x 53.11	15.15	1410	
Scirpus maritimus + Salicornia fruticosa				*18*
	15.612 : formation à Sarcocornia fruticosa	15.16	1420	
	53.17 : Végétation à scirpes halophiles			
	15.612 x 53.17	15.16	1420	
3) TYPE ETANGS, MARAIS				
Eau libre (douce) si prés. de Lemna minor, Lemna polyrhiza, Spirodela trisulca, Azola, Wolffia	22.411 : communautés à Lemna, Azola, Spirodela...	22.13 x 22.41	3150	*4*

si présence de Utricularia vulgaris ou neglecta	22.414 : communautés à Utricularia		3150	
Eau libre (saumâtre)				***8853***
Ruppia maritima, Zanichellia palustris	23-211 Formations immergées des eaux saumâtres ou salées	**21**	1150	
si présence de Zostera noltii	23.212 Formations immergées des eaux saumâtres ou salées	**21**	1150	
Phragmites australis	53.1 : roselières			*45*
4) TYPE BUISSONS, ARBRES, ARBUSTES				
Ulmus campestris	44.612 Ripisylve méditeranéenne à peupliers : faciès à orme (Populetum albae : Ulmetosum)	44.17	92A0	*39*
Populus alba	44.612 Ripisylves méditerranéennes à peupliers	44.17	92A0	*2,5*
Alnus glutinosa	44.612 Ripisylves méditerranéennes à peupliers : faciès à aulne	44.17	92A0	*3*
Juniperus phoenicia	16.272 Dunes à buissons de genévriers	**16.27**	2250	***64***
Montilles (Plusieurs milieux directive Habitat cohabitent en général sur une même montille) si présence de Trifolium maritimum et Agropyrum pycnanthum	15.52 Association à chiendent du littoral et trèfle maritime	15.15	1410	***114***

si présence d'Artemisia campestris subsp. glutinosa ou Helichrysum stoechas ou Teucrium polium ou Scabiosa maritima ou Phelypaea arenaria ou Phleum arenarium	34.5 Thero-Brachypodion : Artemisio-teucrietum	**34.5**	6220	
si prés. de Scirpus romanus, Bromus villosus ou Eryngium maritimum	16.212 : groupement rattaché à l'Ammophilion	16.212	2120	
si présence de Juncus acutus	15.53 Juncetum acuti Mol. Re et Tallon 1969	15.15	1410	
si présence de Juncus maritimus	15.51Junco maritimi-Iridetum spuriae	15.15	1410	
si présence de Limonium virgatum	15.81 Steppes salées à Limonium	**15.18**	1510	
si présence de carex divisa subsp. chaetophylla	15.51 Caricetum divisae	15.15	1410	
Agropyrum pycnanthum				
si présence de Trifolium maritimum	15.52 association à chiendent du littoral et trèfle maritime (= Agropyro-trifolietum maritimi Br. Bl. 1931)	15.15	1410	*0,2*
Dune blanche à Oyat	16.2112 groupement rattaché à l'Ammophilion	16.212	2120	*10*
Autres groupements rattachés à l'Ammophilion				*4*
	16.2112 groupement rattaché à l'Ammophilion	16.212	2120	
si présence de Crucianella maritima	16.223 : Crucianelletum maritimae	16.223	2133	
Dune fixée : Artemisio-teucrietum				***4***
si présence de Crucianella maritima	16.223 : Crucianelletum maritimae	16.223	2133	
si présence d'Helichrysum stoechas	16.223 : Malcomio littorea-Helichrysum stoechadis			
sinon	34.5 Thero-Brachypodion : Pelouses dunaires médit. xériques	**34.5**	6220	
Oyat + Artemisio-teucrietum	34.5 x 16.2122	**34.5** x 16.212	6220 x 2120	***1,5***

Pelouses d'arrière-dune				*10*
si présence de Carex chaetophylla	15.51 : Caricetum divisae	15.15	1410	
si présence de Spartina versicolor	15.21 Groupement à Spartina versicolor	15.12	1320	
si présence de Plantago crassifolia	15.53 Plantaginion crassifoliae	15.15	1410	
si présence de Scirpus romanus	16.2112 groupement rattaché à l'Ammophilion	16.212	2120	
si présence de Limonium virgatum	15.81 Steppes salées à Limonium	**15.18**	1510	
Sables mobiles d'avant-dune				*7*
si présence de Salsola kali ou Cakile maritima	17.2 Laissées de mer à soude kali et cakile	17.2	1210	



Annexe 6 : Cartographie des altitudes sur les Cerisières

Nom ou numéro	« SURFACE VEGETALE SPECIFIQUE » : SVS
Enjeu(x) associé(s)	**DYNAMIQUE DE LA VEGETATION** **Assurer une faible présence de grandes émergentes au sein des taches.**
Question traitée	1. La spécificité du peuplement végétal de la tache d'habitat est-elle assurée ? 1.1.Quelle est la végétation associée à l'habitat ?
Niveau (échelle)	tache
Catégorie F-C-S	composition
Paramètres	- nature des espèces caractéristiques et non caractéristiques - surface totale de la tache - surface totale recouverte par chaque type d'espèces (caractéristiques et non caractéristiques) - nombre d'espèces caractéristiques présentes
Information recherchée : Phénomène révélé par l'indicateur :	abondance ou proportion relative des espèces caractéristiques
Définition de l'indicateur : description et équation	« surface végétale spécifique» : $SVS = \frac{surface_couverte_par_les_espèces_caractéristiques}{surface_totale_de_la_tache} \times 100$
Unité de mesure (%, ha,...)	%
Seuils/typologie	
Echelle et fréquence de mise à jour (Long terme, court terme)	Saison de calcul de l'indicateur : JUIN Fréquence annuelle.
Indicateurs associés	
Source de données : Type d'investigations pour chaque donnée	Estimation des surfaces couverte par les différentes associations végétales : appréhensible par photo-interprétation ou télédétection ?

Remarques : la richesse spécifique est ici considérée comme un paramètre, elle peut constituer un indicateur pour l'habitat Prairies par exemple...

Nom ou numéro	PROXIM
Enjeu(x) associé(s)	**DYNAMIQUE DE LA VEGETATION** **Assurer une faible présence de grandes émergentes au sein des taches**
Question traitée	2.Les caractéristiques de l'organisation spatiale des éléments du paysage (habitats) influent-elles sur la spécificité du peuplement végétal de la tache d'habitat? 2.1 La diversité spécifique surfacique d'une tache d'habitat Marais dépend-elle de la proximité d'autres taches du même habitat ? 2.2. La diversité spécifique surfacique d'une tache d'habitat marais dépend-elle de la présence de taches d'habitat roselières adjacentes ou dans le voisinage ?
Niveau (échelle)	habitat
Catégorie F-C-S	Structure
Paramètres	-nature des éléments voisins -distance de la tache marais à la tache du type roselière la plus proche
Information recherchée : Phénomène révélé par l'indicateur	caractérisation d'un voisinage « favorable » ou « défavorable » au maintien de l'état de conservation des taches marais considérées. intérêt : - *hypothèse* : l'importance de la présence d'espèces non caractéristiques au sein d'une tache marais est d'autant plus grande (importance mesurée par 1/SVS) que cette tache est localisée à proximité immédiate (distance ou seuil à définir) de taches d'habitat roselières. - *processus écologique* auquel cela pourrait correspondre ou faire référence : les taches de marais sont considérées isolées dans une matrice neutre n'intervenant pas sur l'état de ces taches.
Définition de l'indicateur : description	Indice de proximité $$\mathbf{PROXIM} = \sum_{s=1}^{n} \frac{a_s}{h_{sos}^2}$$ Avec : as= surface (m^2) de la tache s dans le voisinage considéré (m) de la tache s_O. hs_0s= distance (m) entre la tache s et la tache s_o , basée sur la distance de frontière à frontière.
Unité de mesure et équation (%, ha,...)	Sans unité
Seuils/typologie	
Echelle et fréquence de mise à jour	Résolution temporelle : Long terme, court terme, dynamique
Indicateurs associés	SVS
Source de données	

Nom ou numéro	SURFACE EN EAU : SE
Enjeu(x) associé(s)	**DYNAMIQUE HYDRAULIQUE** **Assurer un assec annuel**
Question traitée	1. L'assec annuel (estival) des marais est-il assuré ?

Niveau (échelle)	**tache**
Catégorie F-C-S	**composition et fonctionnement**
Paramètres	- Surfaces en eau - Surface totale de la tache
Information recherchée : Phénomène révélé par l'indicateur :	Présence d'eau au sein d'une tache
Définition de l'indicateur : description et équation	Information quantifiable en surface $Se = \frac{surface_en_eau}{surface_totale_de_la_tache} \times 100$
Unité de mesure (%, ha,...)	%
Echelle et fréquence de mise à jour (Long terme, court terme)	court terme, a priori pendant la période estivale (mai à juillet) à adapter selon les marais
Seuils/typologie	Si Se >10% (par ex !) l'assec est non assuré
Indicateurs associés	
Source de données Type d'investigations pour chaque donnée	

Remarques : Estimer la durée de l'assec total de la tache
La **micro-topographie** peut constituer un indicateur des surfaces en eau l'été :au travers des surfaces les plus basses.

Nom ou numéro	CONNEX
Enjeu(x) associé(s)	**PAYSAGE** Caractériser les liens de connexions hydrauliques entre les marais
Question traitée	**I.1. Tous les marais sont-ils reliés ?** Les potentialités de liaisons hydrauliques entre marais sont-elles toutes observées ?
Niveau (échelle)	**habitat Marais**
Catégorie F-C-S	**structure**
Paramètres	- Taches avec Se >0% - nombre de liaisons entre marais - nombre de taches de l'habitat Marais
Information recherchée : Phénomène révélé par l'indicateur :	**Le degré de connexité de l'habitat Marais**
Définition de l'indicateur : description et équation	$\text{CONNEX} = \frac{L}{3*(N-2)} *100$ *L = nombre d'arcs existants entre deux marais* *N = nombre total de taches de l'habitat Marais* $3*(N-2)$ représente le nombre maximal de liaisons possibles entre les N taches
Unité de mesure (%, ha,...)	%
Seuils/typologie	
Echelle et fréquence de mise à jour (Long terme, court terme)	Saison de calcul de l'indicateur : saison hivernale Fréquence
Indicateurs associés	Se à la date de calcul de CONNEX
Type d'investigations nécessaires	L'évaluation du nombre de liaisons existantes entre marais nécessite d'appréhender les structures de base du réseau de surfaces en eau contiguës

Remarques : La représentation de ce paramètre serait à envisager au niveau des taches également.

Nom ou numéro	NODAL
Enjeu(x) associé(s)	**PAYSAGE** Caractériser les liens de connexions hydrauliques entre les marais
Question traitée	1.2. Le réseau de marais connectés est-il complexe ? **1.2.1 A combien de marais un marais est-il connecté ?**
Niveau (échelle)	tache
Catégorie F-C-S	structure
Paramètres	- Taches avec Se >0% contiguës - nombre de liaisons entre marais - nombre de taches de l'habitat Marais
Information recherchée : Phénomène révélé par l'indicateur :	**Le degré de connexion d'un marais** La position « carrefour » d'un marais, la richesse des échanges auxquels le marais contribue
Définition de l'indicateur : description et équation	NODAL = nombre d'interfaces « humides » différents de la tache considérée
Unité de mesure (%, ha,…)	Sans unité
Seuils/typologie	
Echelle et fréquence de mise à jour (Long terme, court terme)	Saison de calcul de l'indicateur : saison hivernale Fréquence
Indicateurs associés	Se
Type d'investigations nécessaires	L'évaluation du nombre de liaisons existantes entre marais nécessite d'appréhender les structures de base du réseau de surfaces en eau contiguës. Ce paramètre est délicat à mettre en œuvre.

Remarques : Rapporté au nombre de taches contiguës d'ordre 1, cet indicateur témoigne du degré de connexité de la tache considérée.

Nom ou numéro	MULTI
Enjeu(x) associé(s)	**PAYSAGE** Caractériser les liens de connexions hydrauliques entre les marais
Question traitée	1.2. Le réseau de marais connectés est-il complexe ? **1.2.2 Quelle est la multiplicité des liens entre plusieurs marais ?**
Niveau (échelle)	**Tache (couple de taches)**
Catégorie F-C-S	**structure**
Paramètres	- Taches avec Se >0% contiguës - nombre de liaisons entre marais - nombre de taches de l'habitat Marais
Information recherchée : Phénomène révélé par l'indicateur :	**Connectivité d'un réseau**
Définition de l'indicateur : description et équation	MULTI = nombre de liens à supprimer pour déconnecter un réseau entre deux taches
Unité de mesure (%, ha,...)	Sans unité
Echelle et fréquence de mise à jour (Long terme, court terme)	Saison de calcul de l'indicateur : saison hivernale Fréquence mensuelle
Seuils/typologie	
Indicateurs associés	Se à la date de calcul
Type d'investigations nécessaires	L'évaluation du nombre de liaisons existantes entre marais nécessite d'appréhender les structures de base du réseau de surfaces en eau contiguës, problème de détection des « chemins » .

Remarque : Il s'agit sans doute du paramètre le plus délicat à mettre en œuvre.

NOM OU NUMERO	CONNEX HABITAT
Enjeu(x) associé(s)	**PAYSAGE** Caractériser les liens de connexions hydrauliques entre les marais
Question traitée	2. Quelle est la diversité des liens entre deux marais ? **2.1 A combien de marais un marais est-il connecté ?**
Niveau (échelle)	habitat
Catégorie F-C-S	composition
Paramètres	- Taches avec Se >0% - nombre de liaisons entre marais - nombre de taches de l'habitat Marais
Information recherchée : Phénomène révélé par l'indicateur :	caractériser la valeur « écologique » de la liaison, la « contribution » relative de taches d'un autre habitat aux « échanges écologiques » dans la connexion
Définition de l'indicateur : description et équation	$\text{CONNEX-HABITAT} = \frac{\sum_{s=1}^{nr} a_{so}}{Sc} * 100$ Avec : N : nombre de taches de du type d'habitat considéré ae_{so} : surface en eau au sein de la tache $_{so}$ de l'habitat considéré a_{so} : surface totale de la tache $_{so}$ $a_{so} = Se * ae_{so}$ Sc : surface totale de la connexion = $\sum Se$ des taches impliquées dans la connexion
Unité de mesure (%, ha,...)	%
Seuils/typologie	
Echelle et fréquence de mise à jour (Long terme, court terme)	Saison de calcul de l'indicateur : saison hivernale Fréquence mensuelle
Indicateurs associés	Se de la tache $_{so}$ de l'habitat considéré
Type d'investigations nécessaires	L'évaluation du nombre de liaisons existantes entre marais nécessite d'appréhender les structures de base du réseau de surfaces en eau contiguës, problème de détection des « chemins »

Remarques : ce paramètre a une signification relativement immédiate s'il est développé pour l'habitat Roselières

RESUME

L'objectif du projet européen EON 2000+ (Earth Observation for Natura 2000+) est d'analyser l'évolution des sites Natura 2000 via la mise en œuvre d'indicateurs environnementaux issus de la télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques.

A l'interface de l'écologie et de la géographie, cette étude propose d'analyser l'espace naturel à l'aide d'une démarche et d'outils issus de l'écologie du paysage. Nous montrons ainsi l'intérêt de cette approche pour la mise en place d'indicateurs spatiaux d'état pour le suivi des habitats naturels en Camargue.
Nous nous interrogeons ainsi sur les critères qui permettent de définir si une mesure de la structure du paysage peut être considérée comme indicateur. En outre, nous proposons une série d'indicateurs dont nous avons tenté d'en tester la pertinence en les confrontant à différents scénarii d'évolution du milieu. Ce travail exploratoire met en évidence non seulement l'intérêt d'utiliser des outils de mesure de la structure du paysage pour la gestion des milieux, mais il offre aussi une série de questionnements sur ce que peut être un indicateur et les problèmes liés à leur mise en place.

Enfin, nous concluons sur la nécessité d'approfondir cette démarche exploratoire, notamment à l'aide des retours terrain des gestionnaires concernant les indicateurs proposés qui semblent répondre à certaines de leurs attentes en matière d'outils de surveillance.

Mots clés :

Indicateurs spatiaux, écologie du paysage, analyse spatiale, Camargue, suivi, habitats naturels, Base de données.