



HAL
open science

La contribution des SIG à la connaissance et à la gestion de l'environnement littoral

Françoise Gourmelon

► **To cite this version:**

Françoise Gourmelon. La contribution des SIG à la connaissance et à la gestion de l'environnement littoral. Sciences de l'Homme et Société. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2003. tel-00321106

HAL Id: tel-00321106

<https://theses.hal.science/tel-00321106>

Submitted on 12 Sep 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

VOLUME 3 : SYNTHÈSE

*La contribution des SIG
à la connaissance et à la gestion
de l'environnement littoral*

Spécialité : géographie

Françoise GOURMELON

Chargée de Recherche au CNRS
Géomer (LETG UMR 6554 CNRS)
Institut Universitaire Européen de la Mer
(Université de Bretagne Occidentale)

présentée le 18 septembre 2003
devant un jury composé de :

Louis **BRIGAND**,
Jean-Pierre **CORLAY**,
Claude **KERGOMARD**,
Yannick **LAGEAT**,
Marc **ROBIN**,

Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale
Professeur à l'Université de Nantes
Professeur à l'École Normale Supérieure
Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale
Professeur à l'Université de Nantes

SOMMAIRE

PREAMBULE.....	1
PREMIERE PARTIE : CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET METHODOLOGIQUE.....	2
1. INTRODUCTION.....	2
2. ENVIRONNEMENT LITTORAL	4
2.1. Un espace considérable	4
2.2. Délimitation	4
2.3. Le recouvrement de compétences	7
3. GESTION INTEGREE DES ZONES COTIERES.....	8
3.1. Au niveau décisionnel	9
3.2. Le contexte scientifique	14
3.2.1. <i>Problématique</i>	14
3.2.2. <i>Dispositif de recherche</i>	16
4. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE	18
4.1. Principales étapes historiques	19
4.2. Définitions et concepts associés.....	20
4.3. Composantes.....	22
4.4. Domaines d'application et fonctions	24
4.5. Information géographique numérique.....	25
4.6.1. <i>Modes de représentation logique de l'information géographique</i>	25
4.6.2. <i>La normalisation</i>	28
4.6. SIG en environnement	31
4.7.1. <i>L'intérêt des chercheurs</i>	32
4.7.2. <i>L'intérêt des gestionnaires</i>	36
4.7. Conditions de mise en œuvre	39
4.8.1. <i>Etapes pré-opérationnelles</i>	39
4.8.2. <i>Mise en œuvre opérationnelle</i>	40
4.8. SIG et gestion intégrée de la zone côtière.....	42
5. CONCLUSION	43
DEUXIEME PARTIE : SIG ET APPROCHE ECOSYSTEMIQUE DE LA MER D'IROISE.....	45
1. MER D'IROISE : PRESENTATION GENERALE DU CONTEXTE.....	45
1.1. Milieu naturel.....	45
1.2. Activités humaines	47
1.3. Protection	47
1.4. Contexte scientifique en mer d'Iroise	50
1.4.1. <i>La problématique</i>	50
1.4.2. <i>Le projet d'Observatoire du Domaine Côtier</i>	51
2. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE	52
2.1. Ressources matérielles, logicielles et humaines.....	52
2.2. Bases d'information géographique	54
3. ANALYSE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'UTILISATION DES SOLS DE L'ILE D'OUESSANT..	60
3.1. Introduction.....	60
3.2. Présentation du site	61
3.3. Analyse des changements d'utilisation des sols de 1844 à 1992	64
3.3.1. <i>Données et méthodes</i>	64
3.3.2. <i>Résultats</i>	66
3.4. Le pâturage ovin au début des années 1990	69
3.4.1. <i>Données et méthodes</i>	69
3.4.2. <i>Résultats</i>	69
3.5. Hypothèses d'entretien des milieux semi-naturels par le pastoralisme	71
3.6. Dynamiques actuelles d'embroussaillage	73
3.6.1. <i>Données et méthodes</i>	73

3.6.2. Résultats.....	74
3.7. Test méthodologique de cartographie à grande échelle de la végétation terrestre	78
3.8 Conclusion	80
4. LES DYNAMIQUES A LONG TERME DE LA VEGETATION DES ILOTS MARINS PROTEGES.....	81
4.1. Présentation du contexte	81
4.2. Données et méthodes	85
4.2.1. Données et production d'informations géoréférencées	85
4.2.2. Analyse spatiale des changements.....	88
4.3. Résultats.....	88
4.3.1. Les dynamiques spatiales sur l'îlot de Béniguet.....	89
4.3.2. Bilan régional de l'état phytocoenotique des îlots marins en réserve	95
4.4. Conclusion	100
5. L'HABITAT DU GRAND DAUPHIN EN MER D'IROISE.....	101
5.1. Présentation du contexte	101
5.2. Paramètres bathymétriques et courantologiques des sites préférentiels	104
5.2.1. Données et production d'informations géoréférencées	104
5.2.2. Méthodes d'analyse	106
5.2.3. Résultats	113
5.3. Vers une approche régionale de l'habitat potentiel du grand dauphin en mer d'Iroise	116
5.3.1. Données et méthodes.....	117
5.3.2. Résultats	117
5.4. Conclusion	121
6. CONCLUSION.....	122

TROISIEME PARTIE : CONSTAT CRITIQUE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE..... 123

1. CONSTAT	123
1.1. Etat des connaissances	123
1.2. Analyse des processus	124
1.3. Aide à la décision.....	125
2. PERSPECTIVES	126
2.1. Perspectives méthodologiques	128
2.1.1. Apport des nouvelles méthodes d'acquisition de données à haute résolution spatiale au suivi à long terme des espaces littoraux.....	128
2.1.2. Apport de la modélisation à la connaissance et à la représentation des processus dynamiques	131
2.2. Perspectives thématiques	132
2.2.1. Notion d'habitat potentiel d'espèces d'intérêt patrimonial pour l'aide au zonage des milieux littoraux protégés	132
2.2.2. Suivi des changements d'occupation des sols et étude des interactions entre les dynamiques naturelles et les dynamiques sociales, pour l'élaboration de scénarios d'évolution des espaces semi-naturels	134
2.2.3. Elaboration d'un modèle fonctionnel sur les îlots marins protégés : étude des relations faune-flore	138

CONCLUSION GENERALE..... 141

BIBLIOGRAPHIE..... 144

Table des illustrations

157

PREAMBULE

Cette synthèse présente une position de recherche sur le rôle des systèmes d'information géographique dans la connaissance et la gestion d'un espace complexe, en l'occurrence la zone côtière.

Après une introduction présentant d'une part la problématique littorale dans son ensemble et le concept de gestion intégrée, et d'autre part les SIG comme méthode adaptée à la démarche pluridisciplinaire inhérente à l'objet d'étude, la démarche suivie en mer d'Iroise est explicitée. En effet, depuis une dizaine d'années, un SIG est mis en œuvre sur le littoral finistérien, justifié par différents projets de gestion et de recherche. Au fil des années, et en collaboration avec les gestionnaires de cet espace aux multiples usages, une plate-forme d'informations géoréférencées s'est progressivement étoffée, permettant la réalisation de diverses applications concernant globalement le fonctionnement et l'évolution écosystémiques. Trois analyses sont présentées : les changements d'occupation des sols d'une île habitée, les dynamiques à long terme de la végétation des îlots marins protégés, l'habitat potentiel du grand dauphin aux abords de l'île de Sein. Les résultats acquis sont analysés et servent de support à l'élaboration de perspectives de recherche tant méthodologiques que thématiques.

Cette synthèse a donc pour objectif de faire le point sur les apports, les limites et les perspectives d'utilisation d'un SIG côtier, dans une problématique visant au suivi et à l'analyse des changements à long terme d'un anthroposystème¹. Elle propose également une réflexion sur la place de la géographie dans le contexte actuel d'une recherche finalisée en environnement.

Les travaux présentés doivent beaucoup aux multiples collaborations menées depuis une dizaine d'années avec des chercheurs, des étudiants, des gestionnaires impliqués sur la mer d'Iroise. Je pense en particulier à F. Bioret (Professeur, UBO), I. Le Berre (Maître de Conférence, UBO), C. Liret (Chargée d'étude, Océanopolis) et L. Brigand (Professeur, UBO). Ils doivent également beaucoup au laboratoire Géosystèmes (1992-2002), à son équipement matériel de qualité et surtout aux compétences et à la disponibilité de ses ingénieurs J. et E. Giraudet (CNRS). Cet environnement parfaitement adapté à la recherche en géographie et l'esprit d'équipe qui l'ont animé pendant une décennie sont le fait de François Cuq, Directeur de Recherche au CNRS et responsable de Géosystèmes, puis de Géomer, de 1992 à 2003. En souvenir des multiples projets menés ensemble, je lui dédie cette synthèse, bilan des recherches passées et gage de continuité.

¹ Selon le Programme « Environnement, Vie et Sociétés » (PEVS) du CNRS, un anthroposystème est l'ensemble des systèmes naturels ou artificialisés dans lesquels l'homme intervient en les exploitant, en les fréquentant et en les aménageant. Ces « environnements de l'homme » sont composés de différentes variables physiques, chimiques, biologiques, écologiques et humaines en interaction qui fonctionnent et évoluent à de multiples échelles spatio-temporelles.

PREMIERE PARTIE

CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET METHODOLOGIQUE

1. INTRODUCTION

En 1992, la seconde Conférence des Nations Unies pour l'Environnement et le Développement (CNUED, Rio) mettait l'accent sur la dimension planétaire de nombreux phénomènes écologiques et sur la nécessité d'en accroître la connaissance, d'améliorer la gestion des ressources et d'assurer la protection de l'environnement notamment contre les risques naturels et technologiques. Cette prise de conscience du rôle de l'homme dans la dégradation de certains milieux réaffirmait l'intérêt des concepts de « développement durable » (rapport Brundtland en 1986) et de « gestion intégrée » proposé au début des années 1970 par la Convention de Ramsar et l'US Coastal Zone Management Act.

En particulier, les zones côtières, à l'interface entre terre et mer, étaient reconnues comme des espaces extrêmement sensibles où les effets perturbateurs de l'homme sont conséquents. Qu'ils s'agissent des pays en voie de développement ou des pays industrialisés, leurs littoraux subissent depuis plusieurs décennies un accroissement rapide de la population provoquant des mutations territoriales de grande ampleur, des dégradations environnementales et des conflits d'usage. Depuis quelques années, partout dans le monde, l'environnement littoral a donc suscité l'intérêt d'une multitude d'acteurs, comme en témoigne le concept de « gestion intégrée de la zone côtière » qui exprime le besoin d'agir collectivement sur les processus naturels et anthropiques susceptibles de menacer le maintien durable de la qualité de l'environnement et des activités qui s'y déroulent.

Mais le préalable à une gestion efficace de cet espace complexe implique une connaissance approfondie de son fonctionnement et de son évolution, eux-mêmes conditionnés par une multitude de variables physiques, naturelles et socio-économiques en interaction, agissant sur une gamme scalaire et temporelle relativement large et dont la compréhension implique de multiples compétences scientifiques. Ce contexte pluridisciplinaire ne facilite pas la production d'une vision synthétique des processus, puisque les disciplines académiques fournissent souvent des points de vue différents d'une même réalité (Prélaz-Droux, 1995). De plus, il nécessite la mise en œuvre de méthodes et d'outils technologiques adaptés au stockage, à l'analyse et à la représentation de données de source et de nature diverses. L'ensemble de ces caractéristiques pourrait être en partie à l'origine de l'intérêt tardif de la communauté scientifique pour les zones côtières qui ne s'est développé qu'à partir des années 1980, comme l'atteste la mise en place de programmes et de réseaux de recherche nationaux et internationaux. Cependant, malgré des résultats scientifiques importants notamment sur l'approche théorique de la gestion de la zone côtière (Clark, 1995), la difficulté à développer l'ouverture pluridisciplinaire nécessaire persiste (Dronkers & De Vries, 1999). La complexité des processus en cause, l'éparpillement et l'hétérogénéité des compétences et des données

dans un vaste champ disciplinaire et dans de multiples institutions, en sont en grande partie responsables. Si on se réfère à l'expérience internationale dans ce domaine, il semble acquis que les avancées les plus significatives concernant la prise en compte des conditions écologiques se sont notamment appuyées sur les systèmes d'information géographique (SIG). Outils scientifiques et techniques, ils établissent un lien tangible entre les différents compartiments du système étudié (Cuq, 2000), et synthétisent l'ensemble des progrès conceptuels réalisés dans le domaine de l'information géographique (Denègre, 1992). Par leurs capacités de stockage, d'analyse et de représentation de l'information spatialisée, ils concourent à améliorer la connaissance du fonctionnement global des écosystèmes et contribuent aux réflexions des décideurs (Aspinall, 1995). Utilisés en synergie avec la télédétection et la géodésie spatiale, actuellement en plein essor, ils peuvent offrir un certain nombre d'atouts dans trois domaines d'application : l'aménagement et la gestion des territoires, l'appui à la recherche et au développement, et la planification des activités. Néanmoins, il apparaît après une décennie d'utilisation dans différents domaines d'application que les conditions du succès de leur mise en œuvre sont dépendantes non seulement de paramètres techniques et économiques, mais aussi sociaux, organisationnels et spatiaux (Roche & Bédard, 1997).

Cette première partie de l'ouvrage pose le contexte géographique et méthodologique dans lequel s'inscrivent les applications géomatiques développées en mer d'Iroise et pour lesquelles des perspectives de recherche sont envisagées (parties 2 et 3). Elle aborde différentes notions et propose un état de l'art concernant l'environnement littoral, les principes de gestion intégrée des zones côtières et les systèmes d'information géographique.

L'environnement littoral est présenté dans ses limites géographiques et dans ses composantes thématiques comme un espace sensible et complexe où différents paramètres interfèrent, justifiant l'intérêt d'une multitude d'acteurs. L'attrait des sociétés humaines pour cet espace d'une grande richesse entraîne une pression sur la ressource et des conflits d'usage que la *gestion intégrée de la zone côtière* se propose de résoudre. Ce concept qui s'est développé depuis les années 1970 s'exprime par différentes actions politiques et scientifiques. Néanmoins, il apparaît que cet intérêt récent d'une communauté internationale composite se traduit par des visions et des approches différentes qu'il est parfois difficile de concilier dans le contexte pluridisciplinaire inhérent à la mise en œuvre d'un projet de gestion intégrée. C'est à ce niveau que l'utilisation des méthodes géomatiques peut contribuer à développer une approche territoriale et écosystémique de la zone côtière.

Les systèmes d'information géographique sont présentés selon différents points de vue qui leur attribuent communément un rôle déterminant dans la gestion, l'analyse et la représentation de l'information géographique et dans l'aide à la décision qu'ils peuvent procurer. Leurs apports aux sciences environnementales et comme support à la gestion des territoires sont discutés. S'ils produisent des résultats intéressants dans différents domaines, il apparaît qu'ils sont encore peu utilisés sur le littoral et encore moins dans des projets finalisés basés sur des approches pluridisciplinaires.

2. ENVIRONNEMENT LITTORAL

2.1. Un espace considérable

Les sociétés humaines ont toujours entretenu des relations particulières avec le littoral² (ill. 1). Lieu d'échange et de convoitise, il a, par le passé comme aujourd'hui, souvent été le lieu de revendications, d'échanges entre différentes sociétés et diverses cultures, sources de multiples conflits d'usage (Lefeuvre, 1991).

La zone côtière est l'une des frontières les plus importantes de notre planète, tant du point de vue de son linéaire, que de sa pression humaine. Par exemple, la mesure du trait de côte de la France métropolitaine, établie sur la base du 25 000ème des cartes topographiques de l'IGN, est de 16 331 Km (îles incluses dont la Corse) (Le Berre, 1999). A l'échelle planétaire, en assimilant la zone côtière à une bande englobant les espaces situés 200 mètres au-dessus et au dessous du niveau moyen des mers, elle concernerait (Pernetta & Milliman, 1995) :

- 18% de la surface terrestre,
- le quart de la production primaire globale, dont 90% des ressources halieutiques qui attirent les hommes et conduit à une diversification des activités économiques,
- plus de 50% de la population mondiale et les 2/3 des métropoles de plus de 1.6 millions d'habitants.

De manière générale, l'urbanisation du trait de côte est croissante, au détriment du linéaire côtier naturel (Robin & Verger, 1996).

2.2. Délimitation

En ce qui concerne la limite physique entre la terre et la mer, aucune définition juridique n'existe³. Ainsi plusieurs lignes pouvant être qualifiées de « trait de côte » sont recensées par Robin (2002) en fonction des différents besoins exprimés notamment par le groupe de travail « Littoral » du Conseil National pour l'Information Géographique (CNIG). Un certain flou existe donc dans la définition de lignes de référence synthétiques (ill. 2).

² Les termes « zone côtière » ou « littoral » seront utilisés indifféremment, dans la mesure où il apparaît que leur utilisation répond plus à une notion d'échelle qu'elle ne recouvre des objets différents. En effet, le terme « littoral » est souvent utilisé lorsque l'espace concerné s'assimile à un linéaire alors que le terme « zone côtière », plus englobant, fait référence à une surface perçue à une plus petite échelle. Cette zone peut s'assimiler à un système au sein duquel les facteurs de changement agissent sur des sous-systèmes naturels et anthropiques interconnectés, conduisant à des impacts négatifs ou positifs d'ordre environnementaux, sociaux, culturels, économiques (Fabri, 1998).

³ Article 26 de la loi Littoral de 1986 : les limites du rivage sont constatées par l'Etat en fonction des observations opérées sur les lieux à délimiter ou des informations fournies par des procédés scientifiques.

Pêche au
carrelet en
Charente-Maritime

L. Kerambrun



L. Kerambrun

Ville portuaire
aux Etats-Unis

Port en Inde

L. Kerambrun



F. Gourmelon

Port de plaisance
en Méditerranée

Transport public
en Guinée-Bissau

F. Gourmelon



F. Bioret

Suivi scientifique

Promenade au
bord de mer

L. Kerambrun



L. Kerambrun

Station balnéaire sur
la côte atlantique



L. Kerambrun

Pollution par
hydrocarbures

Illustration 1. Diversité des activités humaines en zone côtière.



Illustration 2. Quelques lignes de référence (d'après Robin, 2002).

Située à l'interface entre la terre, la mer et l'atmosphère qui y interagissent, la zone côtière forme un écosystème riche, diversifié et complexe. Ses limites géographiques, ainsi que la part respective de ses deux composantes terrestre et maritime, sont variables et discutées (ill. 3).

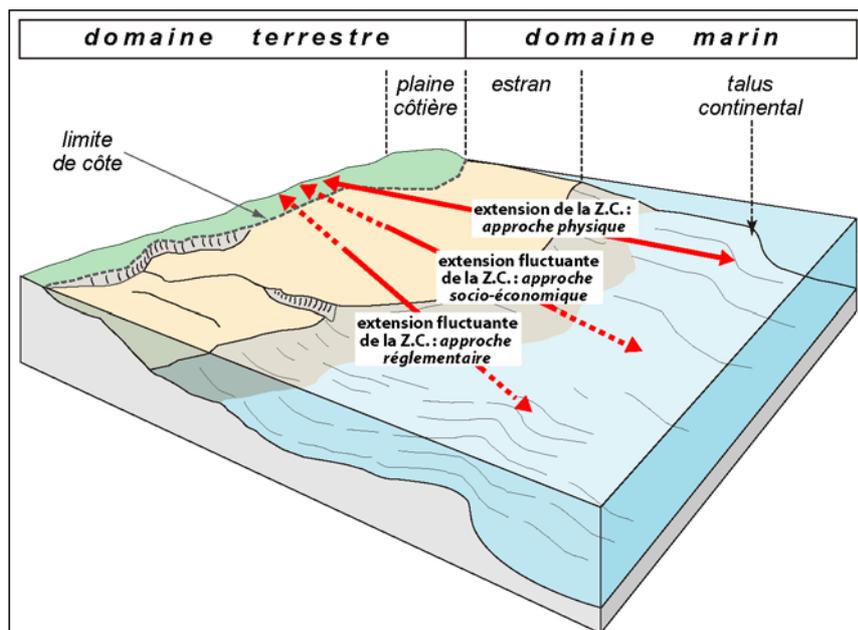


Illustration 3. La zone côtière.

D'une position restrictive, la limitant à l'estran, on l'assimile de plus en plus à un espace plus vaste, englobant notamment les activités qui s'y déroulent. Quelques auteurs la définissent comme une zone géographique aux limites floues qui subit les influences réciproques de la terre et de la mer, et qui coïncide théoriquement avec l'emprise spatiale nécessaire à la mise en œuvre d'un programme de gestion (Bécet, 1987 ; Carter, 1988). Plus précisément, d'après Holligan & De Boois (1993), elle inclut les plaines côtières et le plateau continental jusqu'à sa limite au large, correspondant ainsi aux espaces exondés lors des fluctuations climatiques et eustatiques du Quaternaire. D'autres auteurs l'assimilent à la frontière entre des éléments relativement bien connus (terrestres) et des variables beaucoup plus difficiles à appréhender (marines) (Wright & Bartlett, 1999). De nombreuses études insistent effectivement sur cette caractéristique de l'espace côtier. Sa nature dynamique ainsi que les difficultés et le coût associés à la collecte des données en mer font qu'aujourd'hui encore, malgré un effort certain de la part de nombreux organismes producteurs de données, la composante marine de l'espace côtier reste difficile à appréhender.

2.3. Le recouvrement des compétences

La zone côtière est aussi un espace où s'exercent plusieurs compétences administratives et juridiques organisées de façon sectorielle. En France par exemple, sur la partie terrestre, les communes constituent la plus petite entité territoriale sur lesquelles s'appuient les services décentralisés de l'Etat (Guillaumont & Durand, 2000). Se surimposent à ces entités de base, différents découpages territoriaux inhérents notamment à la protection et à la gestion de l'environnement qui reposent sur divers outils juridiques et contractuels (ill. 4).

Protections réglementaires	Protections contractuelles	Directives européennes	Conventions internationales, labellisations
<ul style="list-style-type: none"> - réserve naturelle - arrêté préfectoral de protection de biotope - zone centrale de Parc national - site classé, inscrit - zone ND du PLU - réserve de chasse et de faune sauvage - réserve biologique (domaniale ou forestière) - réserve naturelle volontaire - ZSC (site Natura 2000) - ZPS (Directive Oiseaux) 	<ul style="list-style-type: none"> - parc naturel régional - zone périphérique de parc national - site Natura 2000 - convention de gestion - mesures agri-environnementales 	<ul style="list-style-type: none"> - Directive Oiseaux (1979) - Directive Habitats faune-flore (1992) 	<ul style="list-style-type: none"> - Diplôme européen - Patrimoine mondial - Réserve de biosphère - Convention de Ramsar

Illustration 4. Principaux types de protection et de labels environnementaux s'appliquant aux espaces littoraux sensibles (d'après Bioret, inédit).

De plus, sur certains sites exposés aux risques littoraux comme l'érosion, les avancées dunaires et les menaces de submersion marine, les plans de prévention des risques naturels prévisibles institués par la loi du 2 février 1995, offrent un cadre réglementaire prévoyant des actions concrètes de mise en œuvre. L'espace maritime côtier, dénommé « mer côtière » par

Certaines de ces activités engendrent un risque⁴ pour le système naturel, à l'origine de l'implantation humaine sur le littoral. La surexploitation des ressources biologiques, les pollutions accidentelles liées aux infrastructures portuaires et industrielles et à un trafic maritime croissant, l'eutrophisation des eaux côtières causée par des pratiques agricoles intensives sont autant de facteurs pouvant entraîner une dégradation importante des habitats côtiers et une menace pour l'équilibre et le fonctionnement du système tout entier. De plus, les conséquences des crises météorologiques y sont souvent catastrophiques, et, sur le long terme, la remontée significative du niveau marin pourrait se traduire par une accélération des processus d'érosion, entraînant des risques accrus pour les populations locales (Collectif, 1998).

En zone côtière, la multiplicité des usages, conjuguée à la fragilité des composantes environnementales peut entraîner des situations critiques dont la résolution implique des mesures concrètes de gestion. Mais des carences au niveau des procédures, de la planification, des actions et des institutions, liées à une méconnaissance fréquente de l'importance économique et sociale d'une gestion durable des zones côtières sont autant de freins à la mise en place d'une approche globale et efficace (Commission européenne, 1999). C'est dans ce contexte, et en réponse à ce besoin, que le concept de « gestion intégrée de la zone côtière » est né dans les années 1970.

3.1. Au niveau décisionnel

Au cours des trois dernières décennies, la prise de conscience universelle de l'intérêt écologique et économique non seulement des zones côtières mais aussi de l'environnement global a conduit un certain nombre d'Etats à adhérer à des conventions élaborées par différents organismes dont l'objectif était de parvenir à une gestion durable de l'environnement. Au niveau international, on peut citer, à titre d'exemples : le Coastal Zone Management Act, la Stratégie européenne d'Aménagement Intégré des Zones Côtières qui concernent exclusivement les zones côtières, et la Convention de Ramsar, la Stratégie de Séville et la Convention sur la Diversité Biologique qui traitent de l'environnement global. Ces outils législatifs ou contractuels ont pour objectifs communs la protection des écosystèmes et le développement durable⁵ des activités humaines dans le respect de l'environnement.

La première action gouvernementale en faveur de la gestion des zones côtières est américaine et date de 1972. Le *Coastal Zone Management Act* est mis en œuvre par le National Coastal Zone Management (CZM) qui prévoit diverses mesures spécifiques à la protection et au développement de la zone côtière telles que :

⁴ Le risque est défini comme un événement dommageable, doté d'une certaine probabilité, conséquence d'un aléa naturel survenant dans un milieu vulnérable (Bourrelier, 1997).

⁵ Un développement durable ou soutenable est basé sur l'affirmation que les objectifs de bien-être économique, de justice sociale et de sauvegarde de l'environnement ne peuvent être dissociés mais sont interdépendants à terme. Il en résulte que sa mise en œuvre implique certains compromis entre ces différents objectifs à brève échéance qui doivent être arbitrés de manière à parvenir à un consensus général. Le développement soutenable doit veiller à ce que des décisions à court terme ne compromettent pas l'évolution de l'ensemble (Commission européenne, 1999).

- la préservation, le développement, et si possible, la restauration des ressources de la zone côtière sur le long terme,
- un encouragement et une assistance aux Etats dans l'exercice de leur responsabilité sur la zone côtière, concernant l'utilisation raisonnée des espaces littoraux en tenant compte des composantes écologiques, historiques, esthétiques et culturelles et des besoins de développement économique,
- l'incitation à la mise en œuvre de programmes de planification spécifiques pour la protection des ressources naturelles, le développement raisonné d'activités liées au littoral,
- l'encouragement à la participation et à la coopération de l'ensemble des acteurs concernés par le littoral.

Ce programme, dont la mise en œuvre est fondée sur un partenariat volontaire entre le gouvernement fédéral et les Etats nord-américains concerne depuis 1974, 99% du littoral. Il est relayé depuis 1990 par d'autres programmes, concernant des espaces d'intérêt majeur ou plus spécifiquement la qualité des eaux côtières.

En Europe, ce n'est qu'en 1996 que la Commission européenne met en œuvre un programme de démonstration basé initialement sur 35 projets dont l'objectif est de témoigner de la dégradation croissante du littoral et de l'inconsistance des mesures de gestion proposées (ill. 6a). Le constat établit que la plupart des conflits et des dégradations résulte de carences au niveau des procédures, de la planification, des actions et des institutions ; ces carences étant elles-mêmes liées à une méconnaissance de l'intérêt économique, social et écologique d'une gestion durable de la zone côtière. La *Stratégie européenne d'Aménagement Intégré des Zones Côtières* (AIZC) ou *Integrated Coastal Zone Management* (ICZM) est proposée par l'Union européenne à la fin des années 1990 (Commission européenne, 1999). Elle se justifie par le fait :

- que de nombreux problèmes environnementaux et de conflits d'usages s'inscrivent dans une dimension européenne qui dépasse les frontières politiques,
- que pour certaines directives européennes concernant les zones côtières (pêche, transport maritime...), il est nécessaire de développer une approche globale,
- que dans ce domaine, le besoin d'échanges d'expériences et de méthodes est réel, vu la complexité de la mise en œuvre pratique et du peu d'exemples en la matière.

La Stratégie européenne d'Aménagement Intégré des Zones Côtières est fondée sur un processus dynamique, continu et itératif destiné à promouvoir la gestion durable des zones côtières, qui s'appuie sur la sensibilisation, la concertation et la coopération entre les acteurs. Sa mise en œuvre opérationnelle, nécessairement conditionnée par un réseau de concertation complexe entre les institutions européennes et les administrations nationales, régionales et locales, tarde toutefois à se concrétiser par des options politiques claires.

D'autres conventions et stratégies émises à l'échelle mondiale et auxquelles adhèrent différentes nations, ne s'appliquent pas exclusivement aux zones côtières mais s'inscrivent dans une démarche de « gestion intégrée de l'environnement ».

C'est le cas de la *Convention de Ramsar*, signée en 1971 par Bird Life International, le Fonds mondial pour la Nature, l'Union mondiale pour la Nature et Wetlands International. Elle concerne l'utilisation rationnelle des zones humides permettant de concilier les activités



Illustration 6. Quelques initiatives de gestion intégrée de la zone côtière aux niveaux européen et mondial. 6a : les sites de démonstration de l’AIZC (d’après Commission européenne, 1999). 6b : les réserves de biosphère côtières.

sociales et économiques avec la conservation de ses caractéristiques écologiques. Cette convention s'applique à des zones humides remarquables désignées par les Etats adhérents.

Plus d'un millier de sites sont aujourd'hui inscrits sur la liste Ramsar, dont de nombreux sont situés en zone côtière. Ils bénéficient d'un engagement des acteurs et des décideurs à la préservation sur le long terme, du patrimoine écologique par une utilisation rationnelle des ressources.

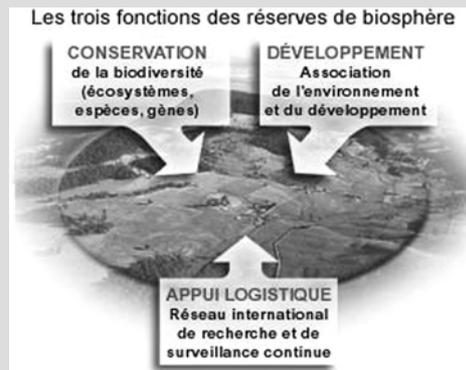
En 1974, le programme Man and Biosphere (Mab) de l'UNESCO est lancé (UNESCO, 1996) (encart 1).

ENCART 1. Le programme Mab.

Le programme Mab de l'UNESCO est fondé sur une démarche conceptuelle reliant l'écologie à l'économie, la sociologie à la politique, et dont l'objectif est de garantir la conservation d'un patrimoine naturel et culturel remarquable tout en conciliant un développement socio-économique durable (Batisse, 1986, 1990). Représentatives des principaux écosystèmes terrestres, côtiers et marins, les réserves de biosphère désignées par ce programme concernent en mars 2003, 425 territoires dont 86 en zone côtière, répartis dans 95 pays (source : UNESCO, 2003). Elles s'engagent à assumer trois fonctions essentielles :

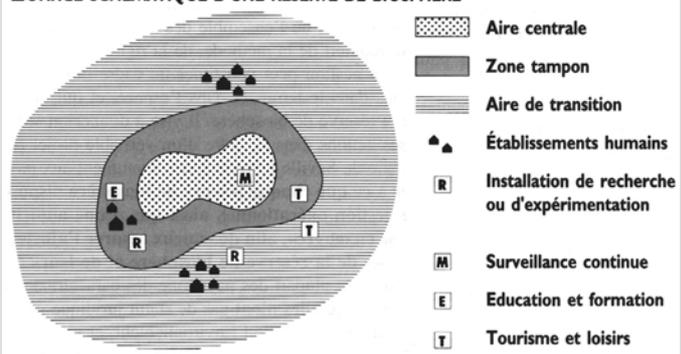
- la conservation, par le renforcement de la préservation des ressources génétiques et des écosystèmes, ainsi que par l'entretien de la diversité biologique,
- la logistique, par la création d'un réseau mondial d'aires protégées terrestres et marines,
- le développement « durable » ou « soutenable » qui associe, sur du long terme, protection de l'environnement et mise en valeur des ressources du territoire pour le maintien et le bien-être des populations locales.

Ces objectifs placent les réserves de biosphère au cœur d'une approche pluridisciplinaire ayant pour vocation d'étudier et de concilier les besoins parfois opposés de la nature et des hommes. Ils leur confèrent un rôle d'observatoire de la gestion intégrée des terres, de l'eau et de la biodiversité (www.unesco.org).



Source : <http://www.unesco.org/mab/nutshellF.htm>

ZONAGE SCHEMATIQUE D'UNE RÉSERVE DE BIOSPHERE



Source : F. Bioret *et al.*, 1998

Puis c'est en 1995, lors de la Conférence internationale sur les réserves de biosphère, que la *Stratégie de Séville* est élaborée pour expliciter les conditions de mise en œuvre, de gestion et de suivi du réseau mondial des réserves de biosphère mis en place en 1974 par l'UNESCO dans le cadre de son programme Mab. Une couverture mondiale du réseau des réserves de biosphère est recherchée de manière à ce qu'il soit représentatif de la diversité des situations naturelles, culturelles, économiques et environnementales. La multiplication des territoires labellisés a pour objectif d'accroître la conservation mondiale et de faciliter la mise en œuvre de stratégies de planification nationales et internationales (ill. 6b).

- Les réserves de biosphère ont pour vocation à devenir des lieux d'expérimentation du développement durable, en vue de contribuer efficacement à des accords internationaux tels que la Convention sur la Diversité Biologique.
- La recherche, le suivi à long terme, l'éducation et la formation sont des priorités au sein du réseau. Sa contribution aux recherches menées sur les paysages et les écosystèmes et notamment sur les changements planétaires globaux est encouragée (Dyer & Vinogradov, 1990).

- La mise en application concrète du concept de réserve de biosphère est fondée notamment sur la recherche de synergies avec les politiques de gestion locale.

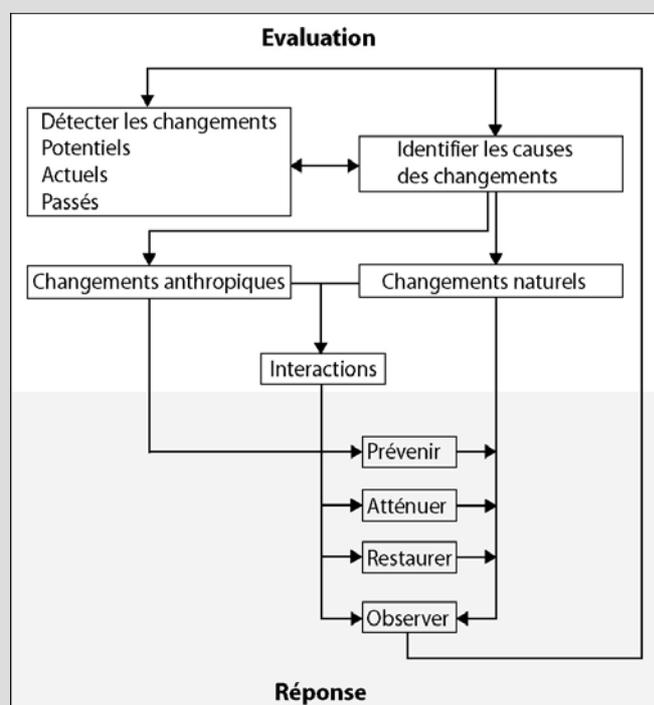
Ce concept a de nombreux points communs avec l'approche écosystémique adoptée récemment par la Conférence des Parties à la *Convention sur la Diversité Biologique* (Montréal et Nairobi, 2000). Stratégie de gestion devant favoriser la conservation et l'utilisation durable et équitable des ressources planétaires, elle repose sur l'application de méthodes scientifiques appropriées aux divers niveaux d'organisation biologique, qui incluent les processus, les fonctions et les interactions essentiels en considérant l'homme comme une partie intégrante des écosystèmes (UNESCO, 2000). Ce concept novateur englobe dans ses principes, les méthodes de gestion et de conservation mises en œuvre dans différents programmes tels que le Mab, et inhérents à différents statuts de protection. Des principes de gestion en découlent, dont la mise en œuvre est fondée sur cinq directives opérationnelles ayant pour objectifs de :

- développer les connaissances relatives aux fonctions de la biodiversité dans les écosystèmes,
- favoriser le partage juste et équitable des avantages inhérents aux fonctions de la diversité biologique dans les écosystèmes,
- recourir à des pratiques de gestion souples et adaptées, qui impliquent un suivi de leur impact programmé sur le long terme et l'adaptation des méthodes aux résultats obtenus (encart 2),
- mettre en œuvre les actions de gestion à une échelle spatio-temporelle appropriée à la problématique posée, en laissant l'initiative si nécessaire aux communautés locales,
- promouvoir la coopération intersectorielle.

ENCART 2.

Le concept de gestion adaptée.

Ce concept, « adaptive management » (Holling, 1978), décrit un processus systématique et itératif résultant d'une approche pluridisciplinaire et à long terme dont l'objectif est d'améliorer le processus de gestion-conservation, à partir des résultats des différents modes de gestion alternative correspondant à différentes hypothèses. Dans ce contexte, le suivi permet non seulement de disposer d'une estimation scientifique de l'état et des tendances évolutives des ressources naturelles, mais aussi de mesurer leurs réponses aux mesures de gestion mises en place (Ringold *et al.*, 1996).



Source : Gibbs *et al.*, 1999

Ces déclarations internationales, renforcées par de multiples initiatives nationales (Cicin-Sain & Knecht, 1998) sont fondées sur des concepts relativement proches dont la mise en œuvre est conditionnée par une approche territoriale, écosystémique et pluridisciplinaire et par un fonctionnement en réseau. La disponibilité de connaissances dans les différents compartiments du système étudié et la production d'informations synthétiques émanant des données produites dans chaque champ disciplinaire sont aussi des conditions essentielles à la pertinence des prises de décision en vue de la promotion d'un développement durable (Prélaz-Droux, 1995).

3.2. Le contexte scientifique

3.2.1. Problématique

La zone côtière qui concentre une grande part de la population mondiale et de ses activités est un espace complexe soumis à des phénomènes climatiques importants et à des pressions anthropiques multiples. La combinaison de ces facteurs physiques, naturels et humains, a entraîné au cours du siècle dernier des perturbations de grande ampleur et la prise de conscience internationale de l'existence d'un risque côtier (Robin, 2003). Avec la croissance démographique augmentant le degré de vulnérabilité des zones côtières, l'impact socio-économique des aléas météo-marins s'est amplifié. On assiste ainsi, au cours du 20^{ème} siècle, à la montée en puissance du risque qui se manifeste par deux effets contraires :

- une augmentation considérable des dommages matériels du fait de l'augmentation des pressions anthropiques dans les zones à risques. On peut citer, par exemple, les conséquences économiques des tempêtes et des inondations qui ont affectées la France entre 1999 et 2001 (dizaines de milliards d'euros) ou celles des aléas météorologiques aux Etats-Unis qui se soldent dans les années 1990 par un coût annuel de l'ordre de 50 milliards de dollars US contre 4.5 milliards vingt ans auparavant ; cette progression allant de pair avec des croissances urbaines remarquables sur le littoral (Robin, 2003) ;
- une diminution aussi considérable des pertes en vie humaine du fait des progrès en matière de prévention (Smith, 1996).

Dans un tel contexte, la demande sociale va croissante en termes de connaissances et de produits synthétiques d'aide à la gestion.

De manière générale, la problématique scientifique posée sur l'environnement littoral concerne les modalités de fonctionnement de cet écosystème complexe en vue de prédire son évolution sur les court, moyen et long termes de manière à disposer des éléments permettant de corriger voire d'anticiper des perturbations génératrices de dégradations environnementales et de crises socio-économiques. Dans un contexte de gestion intégrée de la zone côtière, la complexité des processus dynamiques implique la recherche d'une mise au point d'un modèle de réalité (ill. 7) basé sur une gamme étendue d'échelles spatio-temporelles en relation et sur des informations de nature et de sources variables en fonction du niveau d'analyse requis (Cuq, 2000). Il est en effet admis par la communauté scientifique concernée par les changements globaux que les modifications locales ont une influence significative sur des processus observables aux petites échelles spatiales.

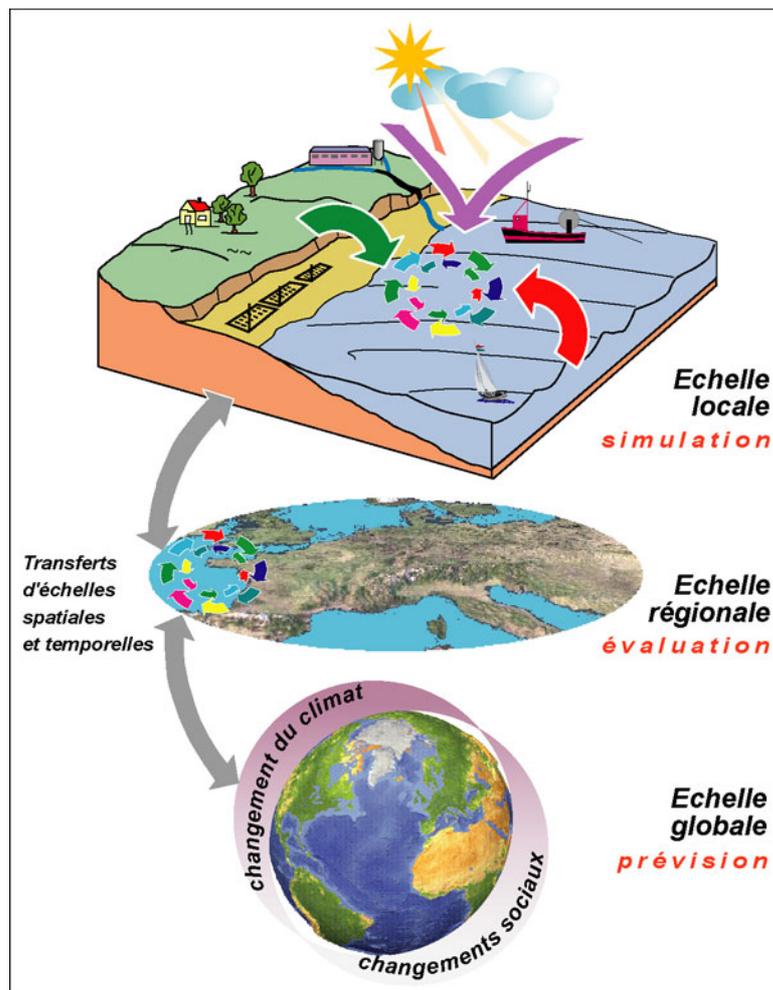


Illustration 7. Un modèle de réalité pour la gestion intégrée des zones côtières (d'après Cuq, 2000).

- A l'échelle locale, la problématique est d'analyser des processus dynamiques spécifiques, et d'étudier voire de simuler les conséquences d'une décision de gestion sur le milieu. La description des processus dynamiques implique, dans ce cas, de disposer d'informations pertinentes du point de vue thématique et acquises à haute résolution spatio-temporelle.
- A l'échelle régionale, l'impact sur le système des actions humaines et sa prédiction à moyen terme ne peuvent s'appréhender qu'à des échelles spatio-temporelles plus grandes impliquant l'intégration spatiale des interactions prises en compte à l'échelle locale. C'est à ce niveau que l'on s'intéresse à des problématiques concernant par exemple la qualité des eaux côtières, les dynamiques sédimentaires, ou les changements environnementaux provoqués par les modifications des activités humaines.
- A l'échelle globale, l'objectif est de prévoir les changements à long terme en adoptant une approche prospective combinant les variations locales et régionales de la zone côtière et la modélisation du climat et des dynamiques socio-économiques sur le long terme.

La réalisation de ces objectifs scientifiques, en réponse à la préoccupation actuelle des sociétés humaines, nécessite la mise en œuvre de programmes de recherche s'appuyant sur des dispositifs opérationnels et pérennes de suivi à long terme des variables physiques, naturelles et anthropiques nécessaires à la réalisation de synthèses objectives et de simulations réalistes.

3.2.2. Dispositif de recherche

L'intérêt des scientifiques pour les zones côtières est relativement tardif, puisque les programmes de recherche nationaux et internationaux dans ce domaine n'ont démarré qu'à partir des années 1980. Actuellement en France, le Programme National sur l'Environnement Côtier (PNEC) et le programme LITEAU du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement se complètent. Le PNEC (1999-2002) fait suite à quatre programmes nationaux antérieurs dont le Programme National d'Océanographie Côtière (PNOC). Structuré autour de chantiers localisés et de recherches thématiques, il a pour objectif de fournir les concepts scientifiques et les outils nécessaires à la mise en œuvre de programmes de gestion intégrée de la zone côtière. LITEAU, instauré en 1998, est un programme de recherches finalisées axé sur deux problématiques : d'une part la gestion des écosystèmes littoraux, et d'autre part la gestion des usages et le développement durable. En relation avec le PNEC, on peut citer les programmes « Espaces protégés » du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable et « Environnement, Vie et Sociétés » (PEVS) du CNRS qui ne sont pas exclusivement dédiés aux zones côtières. Le PEVS (1992-2002) favorise la mise en œuvre d'actions de recherche interdisciplinaires et met en place des zones-ateliers⁶ qui s'inscrivent dans la problématique du développement durable.

Au niveau européen, après les programmes MAST et « Environnement et climat » des Programmes Cadre de Recherche et de Développement Technologique (PCRDT) successifs, différents projets concernant la zone côtière sont actuellement coordonnés par le réseau thématique ELOISE (European Land-Ocean Interaction Studies) au sein du programme « Energie, Environnement et Développement Durable » du 5^{ème} PCRD (1999-2004). L'objectif de la recherche est d'étudier les changements de la structure des écosystèmes provoqués par des modifications des relations entre terre et mer et de produire les informations susceptibles d'intervenir dans un processus de gestion intégrée. Le lien entre ce réseau de recherche et le programme de démonstration de l'Aménagement Intégré des Zones Côtières (AIZC) est de plus en plus formel, afin de favoriser les échanges d'information entre les scientifiques et les différents acteurs impliqués dans la gestion intégrée aux niveaux local, régional et national.

ELOISE constitue la contribution européenne au programme international LOICZ (Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone) qui est lui-même une des composantes de l'IGBP (International Geosphere-Biosphere Program). LOICZ est mis en place au début des années 1990, sur des objectifs scientifiques concernant l'étude des processus biogéochimiques en zone côtière et de l'impact des changements climatiques globaux sur les sociétés humaines de manière à fournir des éléments scientifiques et socio-économiques pour la mise en œuvre de la gestion intégrée (Holligan & De Boois, 1993).

La réalisation de ces objectifs scientifiques sur le long terme implique la mise à disposition de séries de données d'observation acquises dans des conditions normalisées. Ce besoin

⁶ Les zones-ateliers, d'échelle régionale, sont définies en fonction de questionnements scientifiques impliquant des recherches à long terme sur les anthroposystèmes, et émanant d'une dynamique scientifique ou d'une demande sociale reformulée en termes scientifiques. Elles disposent de moyens techniques d'organisation et de traitement des données ainsi que de centres de compétences nécessaires. Les sites ateliers, d'échelle locale, englobés dans les zones-ateliers, font l'objet d'observations et d'expérimentations.

converge avec celui exprimé par l'ensemble de la communauté scientifique relevant des Sciences de l'Environnement qui s'est traduit depuis plusieurs années par la mise en place d'observatoires. On peut citer les 24 structures établies aux Etats-Unis par le programme Long Term Environmental research (LTER) et, en France, les Observatoires des Sciences de l'Univers (OSU) et les Observatoires de Recherche en Environnement (ORE). Le concept de zones-ateliers, développé par le PEVS inclut également cette notion de collecte de données d'observation pluridisciplinaire sur le long terme. Sur le littoral, un certain nombre d'initiatives récentes s'inscrivent dans cette démarche d'observations pérennes. C'est le cas au sein de l'Ifremer (réseau national d'observation de la qualité du milieu marin et réseaux de surveillance microbiologique et du phytoplancton) et de l'Institut Universitaire Européen de la Mer qui propose la création d'un ORE actuellement en cours de validation. Citons également, dans un cadre opérationnel, le projet de l'IFEN (Institut français pour l'Environnement) de mise en place d'un Observatoire du Littoral concernant l'ensemble des côtes françaises.

Dans le même temps, en marge des programmes de recherche, des réseaux de recherche associatifs sont mis en place depuis la fin des années 1980 afin de fédérer une communauté notamment scientifique concernée par les zones côtières. Ainsi en Europe, Eurocoast (European Coastal Association for Science and Technology) et EUCC (European Union of Coastal Conservation) s'appuient sur des réseaux nationaux constitués de chercheurs, ingénieurs, et gestionnaires du littoral. Leurs objectifs sont de diffuser les connaissances scientifiques et les techniques concernant la protection et l'aménagement du littoral, tout en assurant la promotion des approches pluridisciplinaires. Leur fonctionnement est basé sur l'organisation de colloques internationaux (colloques « Littoral » organisé par Eurocoast) et sur l'édition de revues (*Journal of Coastal Conservation* sous l'égide de EUCC).

S'il est indiscutable que ces activités scientifiques produisent de multiples résultats sur l'étude de divers processus et occasionnent des échanges entre chercheurs, un certain nombre de constats sont réalisés quant à la difficulté d'intégration de ces différents savoirs. Ainsi, par exemple, les conclusions de la Conférence européenne de San Feliu (Portugal) organisée par l'EUCC en 1999 insistent sur la difficulté à développer l'approche pluridisciplinaire indispensable à la compréhension des processus globaux qui s'y déroulent. D'après Burbridge & Humphrey (1999), c'est le cloisonnement des champs disciplinaires impliqués dans la réflexion qui en est en grande partie responsable. Les données décrivant tel ou tel phénomène existent, produites par différentes disciplines qui n'en ont pas la même vision et, en l'absence de langage commun et donc d'échanges possibles entre ces différents producteurs de données relatives à une même réalité, l'obtention d'une information synthétique et utilisable par un tiers est problématique.

Si l'intérêt du concept de « gestion intégrée des zones côtières » est désormais admis universellement par tous les acteurs et décideurs concernés, il apparaît que les méthodes et les outils nécessaires à sa mise en application sont encore en développement. En effet, toute décision en la matière, implique de disposer non seulement des données et des informations pertinentes, mais aussi des outils d'analyse et de représentation adéquats (Cicin-Sain & Knecht, 1998). Dans la mesure où l'information requise possède une composante spatiale essentielle, il apparaît que les systèmes d'information géographique peuvent contribuer à fournir une meilleure connaissance du fonctionnement et de l'évolution des zones côtières et corrélativement améliorer les prises de décision des gestionnaires (Bartlett, 1999).

4. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont nés aux Etats Unis dans les années 1970 et se sont propagés rapidement dans le monde entier. Ils s'inscrivent dans un ensemble d'approches, de méthodes et d'outils en constante évolution désigné par le terme générique de « géomatique ». Néologisme formé du préfixe « géo » (géographique) et de la contraction suffixale « matique » (informatique), la géomatique (encart 3) qualifie l'*Ensemble des méthodes et techniques de l'informatique appliquée aux moyens d'acquisition, de traitement et de représentation visuelle des données géoréférencées, c'est à dire qui sont reliées à une localisation sur la Terre dans un système de référence* (glossaire de cartographie, Comité Français de Cartographie, 1990 ; Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale, COMITAS, SFTP, 1988). Elle a *pour objet la gestion des données à référence spatiale et fait appel aux sciences et aux technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion* (Roche, 1997). La géomatique intervient sur les objectifs suivants :

- définir des systèmes de référence reliés à la terre,
- élaborer et utiliser des techniques à partir desquelles sont obtenues les données servant à produire l'information à référence spatiale,
- mettre au point et utiliser les SIG spécialisés dans le stockage, l'analyse, la représentation, la diffusion et la gestion de l'information localisée,
- mettre en place les systèmes d'information au sein des organismes, et étudier les implications sociales, économiques et juridiques de leur implantation (De Sède & Thiéroult, 1996 ; Prélaz-Droux, 1995 ; Roche S. *et al.*, 1996).

Les sciences et technologies géomatiques sont : la topométrie, la cartographie, la géodésie, la photogrammétrie, la télédétection et l'informatique (Bergeron, 1993). La géomatique fournit donc non seulement les moyens d'acquisition de données numériques localisées (géodésie, photogrammétrie, télédétection), mais aussi les outils de gestion, d'analyse et de représentation de l'information géographique (SIG).

Dans ce contexte, les SIG représentent la synthèse des progrès réalisés dans le traitement numérique de l'information géographique, puisqu'ils permettent de replacer dans un cadre cohérent les données géoréférencées acquises par différentes méthodes géomatiques, de les analyser et de les cartographier (Denègre, 1992).

ENCART 3. La géomatique en question.

Très utilisé au Québec et en Suisse, le terme « géomatique » n'est apparu que récemment en France, essentiellement en relation avec le développement des SIG, eux-mêmes longtemps sujets à caution. L'enquête nationale réalisée en 1997 par le CNIG⁷ révélait en effet qu'au sein de la communauté française, les SIG étaient présentés comme des outils plus ou moins fiables de production d'une information technique et que leurs avantages en termes de production de connaissances et donc d'aide à la gestion, de support de démarches scientifiques pérennes, ou comme outil de communication étaient méconnus. L'analyse des blocages mis en évidence révélait des coûts jugés trop élevés par rapport aux avantages perçus, un refus de remise en cause des méthodes de travail traditionnelles et une démarche méthodologique jugée trop complexe (CNIG, 1998).

⁷ La coordination des actions entreprises dans le domaine public est assurée en France par le CNIG (Conseil National de l'Information Géographique), créé en 1982 et dont les missions concernent l'examen annuel de la production française, la définition des spécifications et la normalisation des formats d'échange.

4.1. Principales étapes historiques

Du début des années 1960 jusqu'en 1975, les activités de quatre chercheurs, impliqués dans différents projets de par le monde, sont à l'origine du concept de « système d'information géographique » (Tomlinson & Petchenik, 1988). Au Canada, c'est R. Tomlinson qui décrit sous ce vocable, la méthode la plus adaptée, en termes de coût et de performance, à la cartographie et à l'analyse des informations environnementales collectées dans le cadre de l'inventaire des espaces canadiens (Canada Geographic Information System), et cela malgré les faibles performances de la technologie informatique de l'époque. Au même moment, en Grande-Bretagne, D.P. Bickmore est chargé de la réalisation de l'Atlas of Great Britain and Northern Island. Face aux critiques dont il est l'objet, du fait d'un délai de production trop long et de la complexité des documents réalisés, il propose une approche basée sur l'utilisation de technologies informatiques qui permettrait de stocker et de traiter les données, de modéliser les situations et de restituer cartographiquement les résultats, pour un rapport « qualité-prix » acceptable (Rhind, 1987). Ces deux expériences simultanées vont parvenir à des conclusions similaires quant à l'intérêt du développement d'une filière numérique en cartographie. Aux Etats-Unis, H. Fisher et J. Dangermond développent une nouvelle méthode de cartographie automatique, fondée sur des réalisations graphiques rapides et peu coûteuses, qui associent à la carte des données statistiques. Ces chercheurs, animés par la même motivation de développer un outil technologique novateur afin d'accroître les performances et la qualité de la production cartographique et d'en diminuer les coûts, sont aujourd'hui considérés comme les précurseurs des SIG (Coppock & Rhind, 1991).

A partir de 1973 jusqu'au début des années 1990, l'intérêt de développer ce type de système intégré est admis et la prise en charge du développement est assurée par des institutions nationales, surtout nord-américaines. Ces années sont celles de la recherche universitaire qui débouchera sur les concepts fondamentaux et les premiers algorithmes d'analyse spatiale. La motivation va de pair avec l'avènement de l'informatique qui s'accompagne d'une diminution des coûts d'équipement et avec la fourniture de données satellitaires sous forme d'images numériques. C'est aux Etats-Unis que les premiers systèmes opérationnels voient le jour, après qu'un transfert ait eu lieu des laboratoires universitaires vers les sociétés privées. On peut citer, à titre d'exemples, le logiciel « Geographic Resource Analysis Support System » (Grass) développé à partir de 1982 par les laboratoires de recherche du département de la défense américaine ou encore le logiciel Arc Info de la société ESRI (Environmental Systems Research Institute) fondée par J. Dangermond à la fin des années 1960 et dont l'origine est le « Laboratory for Computer Graphics » de l'Université de Harvard, créé par H. Fisher.

Dès 1990, l'exploitation commerciale des SIG débute en profitant des progrès technologiques réalisés en micro-informatique. Les logiciels proposés sont divers et s'accompagnent de toute une gamme de produits matériels permettant d'acquérir une chaîne complète de traitement incluant les modalités d'acquisition et de restitution de l'information. En parallèle, l'offre des producteurs d'informations géoréférencées numériques s'étoffe. L'« explosion » de ce marché, concernant à la fois le matériel, les logiciels et les données entraîne la multiplication des utilisateurs qui mettent en œuvre des applications dans des domaines extrêmement variés. L'implantation des SIG dans divers secteurs d'activité est facilitée par une concurrence commerciale et par la standardisation des produits, et une certaine banalisation de l'utilisation des SIG. Sous la pression d'une demande croissante, le marché du logiciel, des données et des services s'ouvre rapidement.

Actuellement en France, la communauté des utilisateurs est essentiellement composée de collectivités locales et de bureaux d'étude, et dans une moindre mesure de grands organismes à vocation scientifique (INRA, CNRS, universités...) ou opérationnelle (SHOM, IFREMER, BRGM...). La communauté géomatique est de mieux en mieux organisée, ce qui se traduit par la mise en place de réseaux nationaux (GDR Sigma-Cassini : <http://cassini.univ-lr.fr>) et internationaux à l'image de CoastGIS qui rassemble la communauté concernée par les SIG côtiers, par l'édition de revues spécialisées (*International Journal of Geographical Information Sciences* en Grande-Bretagne, la *Revue Internationale de Géomatique* en France) et l'organisation de colloques (les éditions successives du colloque CoastGIS depuis 1995). En parallèle, l'offre en termes de formations universitaires s'étoffe en proposant différents niveaux d'enseignement, du « tout géomatique » à quelques heures d'apprentissage d'un logiciel commercial de traitement d'information géographique.

4.2. Définitions et concepts associés

La rapide progression du phénomène « SIG » au niveau international, des domaines d'application extrêmement diversifiés et un public très hétérogène n'ont pas favorisé l'émergence d'une définition universelle. L'appellation « SIG » s'applique à des composantes et des fonctions différentes selon trois approches principales.

- Selon l'approche instrumentale, les SIG sont des outils informatiques (matériel et logiciel, parfois uniquement logiciel), considérés comme l'élément central du système.
- Selon l'approche fonctionnelle, le terme s'applique aux fonctionnalités de l'outil informatique et aux domaines d'application.
- Selon l'approche cognitive, les SIG sont un ensemble basé sur quatre composantes majeures : le matériel, les logiciels, l'information géographique numérique, le personnel ou la structure institutionnelle qui assure le fonctionnement de l'ensemble et les liens avec l'extérieur (Carter, 1989).

C'est sur cette approche, la moins restrictive des trois, que s'appuie la définition officielle (AFNOR, Z 13-150, EDIGEO norme concernant l'échange de données informatisées dans le domaine de l'information géographique, 1992). Elle assimile les SIG à un *ensemble coordonné d'opérations généralement informatisées destinées à produire et à utiliser une information géographique sur un même territoire. Ce dispositif vise particulièrement à combiner au mieux les différentes ressources accessibles : bases de données, savoir-faire, capacité de traitement qui lui sont demandées. Il apporte ainsi un appui essentiel dans la prise de décision des responsables d'un organisme* (ill. 8). Pour résumer, les SIG sont définis comme un ensemble de logiciels, données et personnes dont la fonction est d'exploiter l'information

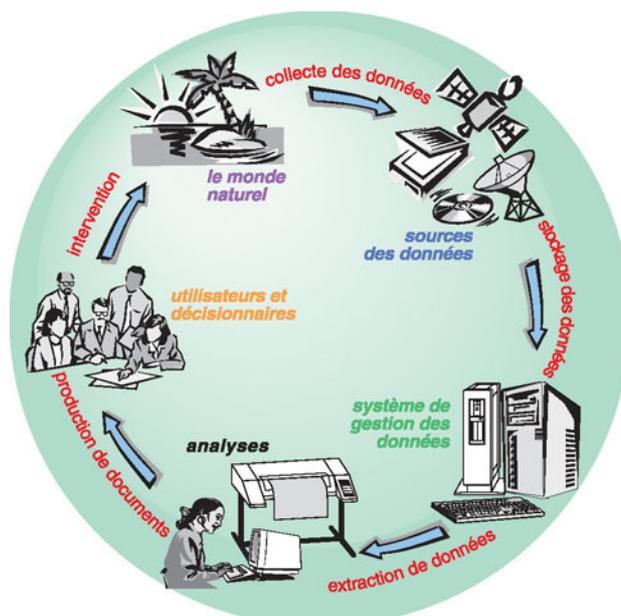


Illustration 8. Les étapes de mise en œuvre d'un SIG (d'après Cuq *et al.*, 2001).

géographique pour produire des résultats et atteindre un but (Pornon, 1992).

Ces différentes approches s'accordent sur le fait que les SIG ont pour objet l'information géographique. Aux formes d'expression classique de l'information géographique, textuelle, cartographique et iconographique, les SIG introduisent la forme numérique en tant que synthèse des formes d'expression antérieures (Denège & Salgé, 1996).

Mais alors que les anglo-saxons utilisent le terme unique « GIS » (Geographical Information System) qui a évolué dans les années 1990 vers le concept plus intégrateur de « Sciences de l'Information Géographique » (Geographical Information Science) (Goodchild, 1992), la communauté francophone propose différents concepts.

- Ainsi, les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) sont décrits comme des systèmes d'aide à la décision incluant l'équipement informatique, les procédures de traitement, les ressources humaines et les données à référence spatiale (Bergeron, 1993). D'après Prélaz-Droux (1995), il existe deux types de SIRS (ill. 9). Le Système d'Information sur le Territoire (SIT) est un outil de décision utilisé dans les domaines juridique, administratif et économique, essentiellement adapté à la gestion des données cadastrales, alors que le SIG est utilisé pour saisir, conserver, transformer, analyser, modéliser, simuler et cartographier les phénomènes et les processus distribués dans l'espace géographique (Bédard, 1987).

LE CONTINUUM SIT-SIG		
SIT	<----->	SIG
Institutionnel rigide	CADRE	Flexible
Administration	APPLICATIONS	Recherche et planification
Le territoire	ÉLÉMENT CENTRAL	Le milieu et les activités
Gestion et interrogation	TRAITEMENTS	Analyse spatiale
Fixes et régulières	UTILISATIONS	Variables et sporadiques
Très ciblés	OBJECTIFS	Ouverts
Juridiques	IMPLICATIONS	Scientifiques
Continue	MISE-A-JOUR DES DONNÉES	Périodiques
Cadastrale	ÉCHELLE D'ANALYSE	Locale et régionale
Forte	PRÉCISION DE LOCALISATION	Variable
Importante	TOPOLOGIE	Essentielle
Dans le détail	CONFORMITÉ AU TERRITOIRE	Dans l'ensemble
Essentiel	CONTROLE DES ACCES	Facultatif
Permanent	DURÉE DE VIE	Selon les besoins
Importants	MOYENS INFORMATIQUES	Modestes
Régulier	BESOIN EN PERSONNEL SPÉCIALISÉ	Variable
Fixe	STRUCTURE DE LA BASE DE DONNÉES	Évolutive
Vectoriel	MODE	Matriciel (raster) ou vectoriel

Illustration 9. Système d'Information à Référence Spatiale (d'après Prélaz-Droux, 1995).

- Les Systèmes d'Information sur l'Environnement (SIE) regroupent l'ensemble des moyens et des informations nécessaires à l'information d'un gestionnaire ou de ses opérateurs sur la structure et l'évolution du territoire (Gayte *et al.*, 1997). Pas nécessairement informatisé, le SIE assure des fonctions d'observation, de gestion et

d'analyse des informations issues de ces observations de terrain et de transmission au niveau décisionnel approprié (ill. 10). Les SIE sont de deux types. Le premier regroupe les applications de gestion qui assurent l'interface entre les opérateurs de terrain et le territoire et qui s'appuient sur des protocoles périodiques simples de façon à permettre une intervention rapide en fonction de l'évolution d'un processus donné. Le second type de SIE regroupe les applications d'aide à la décision et d'aménagement ainsi que celles d'étude et de recherche. A l'interface entre les gestionnaires et le territoire, ce second type de système implique une expertise extérieure justifiée par des thématiques plus complexes et moins dynamiques.

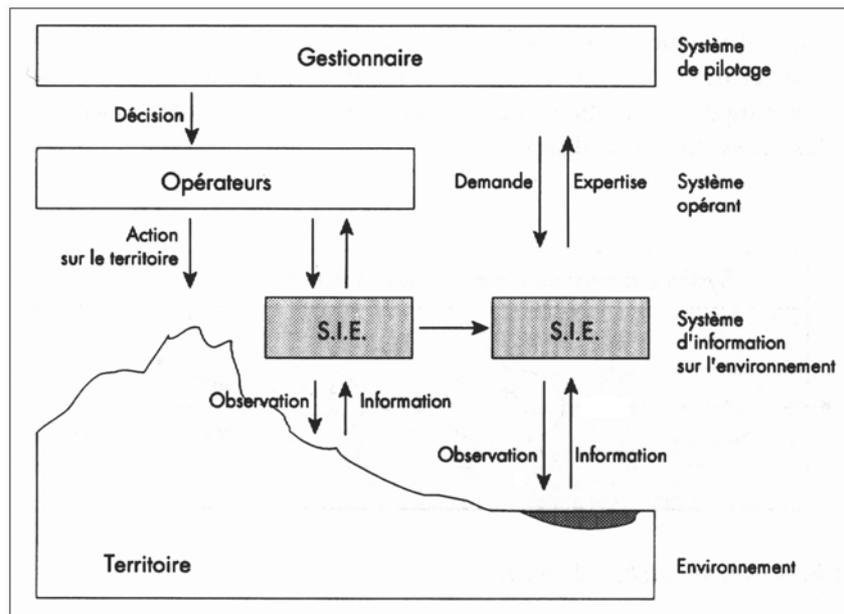


Illustration 10. Système d'Information sur l'Environnement (d'après Gayte *et al.*, 1997).

Quels que soient ces approches et ces vocables, tous considèrent les systèmes d'information géographique comme une méthode favorisant la résolution de problématiques géospaciales et finalisées.

4.3. Composantes

Selon l'approche cognitive, les SIG reposent sur la complémentarité de quatre composantes : matériel, logiciel, information et ressources humaines (ill. 11).

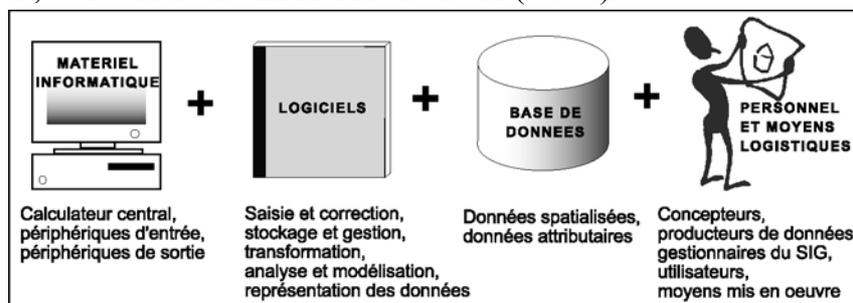


Illustration 11. Les quatre composantes d'un SIG (d'après ESRI, 1990, modifié).

- Le matériel informatique est une plate-forme de travail simple ou en réseau permettant l'acquisition des données, leur stockage, leur traitement et leur restitution cartographique. L'ordinateur supporte le logiciel et ses ressources sont utilisées pour le stockage et le calcul numérique. Cette unité centrale est connectée aux périphériques d'entrée et de sortie. En entrée, deux types de matériels sont proposés pour numériser des données analogiques (support papier) : table à digitaliser et scanner. Disponibles en différents formats (A4 à A0), ils diffèrent par les modes de représentation de l'information géographique résultant de la numérisation. Avec une table à digitaliser, les éléments graphiques sont traités comme des vecteurs orientés (mode vectoriel), alors que le scanner fonctionne en mode matriciel, c'est-à-dire qu'il produit une image constituée d'éléments de surface identiques (pixels) dont la taille est fonction de la résolution du scanner. Les périphériques de sortie sont utilisés pour la cartographie des résultats. Imprimantes et traceurs sont disponibles en différents formats et modes (couleur ou noir et blanc). Enfin, des unités de transfert externes complètent le dispositif et permettent l'introduction d'informations numériques et leur sauvegarde.
- Le logiciel est construit autour de modules spécialisés dans la saisie, l'édition, l'analyse spatiale, la cartographie, le catalogage... Actuellement, il existe plusieurs systèmes commerciaux disponibles sur différents supports informatiques qui fonctionnent, pour la plupart, dans les deux modes (vectoriel et matriciel) et offrent des fonctionnalités plus ou moins puissantes : moteur topologique, interpolation, gestion de réseaux... En 2000, sur le marché international des SIG, la société ESRI occupait 35% de l'ensemble des ventes de logiciels (Daratech, 2001). Avec son logiciel Arc Info, disponible depuis près de 20 ans, ESRI touche un public professionnel appréciant les multiples fonctionnalités de l'outil, et occupe avec le logiciel Arc View, une place importante dans le monde des SIG bureautiques. Actuellement, la compatibilité entre les différents logiciels disponibles sur le marché est acquise du fait de la normalisation des formats d'échange (norme Edigeo de l'AFNOR par exemple).
- Dans le mode relationnel, actuellement le plus utilisé par les logiciels commerciaux, l'information géographique qui résulte du traitement numérique de la donnée brute, est stockée sous forme de couches (plans ou couvertures) dans une base d'information géographique structurée (BIG). En mode relationnel, chaque couche décrit un thème, et contient des objets géographiques ponctuels, linéaires ou surfaciques. Une BIG est composée de plusieurs niveaux d'information qui correspondent à des degrés d'analyse croissants (Journaux, 1985 ; Le Berre, 1999) (ill. 12). Les couches thématiques sont le résultat de la mise en forme numérique des données analogiques et leur analyse produit des couches contenant une information thématique inédite. Le croisement de différentes couches d'analyse, sur des thèmes variés, produit des couches de système. C'est l'information spatiale ou statistique qui résulte de l'analyse de ces couches synthétiques qui est utilisée dans un contexte opérationnel d'aide à la décision. D'autres systèmes de gestion de base de données existent tels que le modèle de données orienté objet qui offre une bonne représentation des entités complexes, la prise en compte de la notion d'héritage et l'encapsulation des objets facilitant les opérations de mises à jour. Ce modèle de données est implémenté depuis peu dans des logiciels commerciaux et notamment la dernière version d'Arc Info (V8).

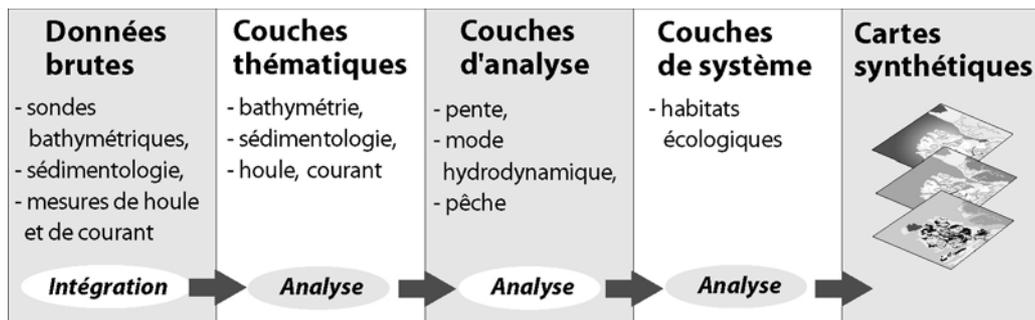


Illustration 12. Exemple de principe de structuration d'une BIG (d'après Le Berre, 1999, modifié).

- Les ressources humaines constituent la composante majeure du système, dans la mesure où leur rôle intervient sur la structure du système en fonction des objectifs visés (décideur), et sur la « vie » du système (acteur). De manière générale, les SIG offrent des possibilités de modélisation du monde réel, à condition qu'une approche systémique prévale à leur mise en œuvre (De Sède & Thiérault, 1996). Dans le domaine de l'environnement, la connaissance de ses variables constitutives (socio-économiques, physiques, naturelles, politiques...) ne suffit pas à comprendre son fonctionnement et son évolution. Il est nécessaire d'appréhender l'ensemble par le jeu des interactions de manière à favoriser une approche intégrée permettant notamment la mise en œuvre d'un développement territorial durable. Cette approche pluridisciplinaire se heurte souvent aux pratiques académiques basées sur les disciplines qui proposent des visions différentes du monde réel.

4.4. Domaines d'application et fonctions

Les domaines d'application des SIG concernent l'ensemble des activités où interviennent des données localisées : la protection de l'environnement, la gestion des ressources, l'aménagement du territoire, les études d'impact, le suivi de phénomènes dynamiques (Maguire *et al.*, 1991). Pendant longtemps, les SIG ont été assimilés aux systèmes de CAO (conception assistée par ordinateur) et de DAO (dessin assisté par ordinateur), alors que leurs fonctionnalités sont beaucoup plus diverses. En effet, ils sont utilisés d'une part pour traiter ensemble plusieurs aspects d'un même espace, abordés antérieurement à l'aide de sources incompatibles, et d'autre part pour expliciter les relations et les organisations spatiales quels que soient les objets impliqués (Cheylan *et al.*, 1993).

Pratiquement, cinq fonctions leur sont classiquement attribuées :

- *l'acquisition des données* spatialisées et thématiques ;
- *l'archivage des informations* sous forme de plans thématiques permettant un accès rapide à une base d'information géographique cohérente des points de vue spatial, scalaire et sémantique ;
- *l'accessibilité* aisée à l'ensemble des informations de la base soit par un affichage des plans thématiques soit par un accès direct aux fichiers numériques ;
- *l'analyse* des informations par l'usage de paramètres et d'opérateurs spatiaux permettant de produire une information inédite ;
- *l'affichage et la visualisation* des résultats obtenus sous différentes formes : tableaux, rapports, cartes ou consultations à l'écran.

Parmi ces fonctions, deux d'entre elles sont propres aux SIG (Denègre & Salgé, 1996). La première, d'analyse et de synthèse, permet de gérer et de traiter les relations spatiales entre les objets localisés. C'est le domaine de l'expertise humaine qui concerne l'analyse spatiale basée sur les relations entre les objets géographiques, l'analyse temporelle qui s'attache à suivre l'évolution d'un phénomène et l'analyse prospective qui s'intéresse aux simulations d'événements. La seconde fonction essentielle des SIG, d'ordre cartographique, permet de représenter l'espace en profitant de la richesse thématique des bases d'information structurées.

4.5. Information géographique numérique

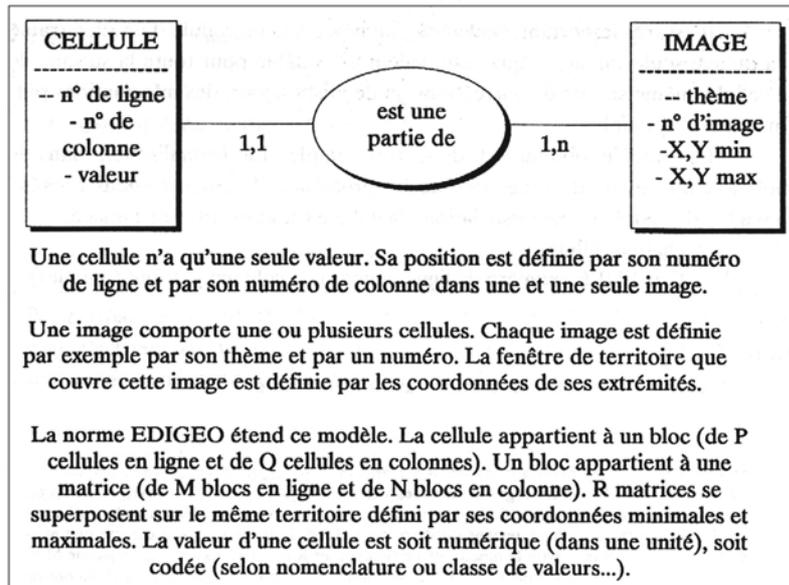
La géomatique dans son ensemble a pour objet l'acquisition de données géographiques par différentes méthodes puis leur stockage, leur analyse et leur représentation par les SIG. L'objet pris en compte est l'information géographique (« information » en anglais), qu'il convient de distinguer de la donnée (« data » en anglais). Alors qu'une donnée est le résultat brut de la mesure ou de l'observation, effectuée en référence à une échelle de perception des phénomènes (NCGIA, 1992), l'information résulte du traitement d'un ensemble de données dans le but d'en dégager des indications synthétiques. Leur mise à disposition sous forme quantitative ou qualitative constitue l'apport principal des systèmes d'information dans les processus d'aide à la décision (Prélaz-Droux, 1995).

L'information géographique est la représentation d'un objet ou d'un phénomène réel localisé dans l'espace à un instant donné (Quodverte, 1994). Décrivant la réalité selon un degré plus ou moins grand d'abstraction, elle est la synthèse de trois composantes : sémantique (critères descriptifs), géométrique (critères de localisation, de forme et de dimension) et temporelle. Ses formes d'expression ont varié au cours des temps et ce n'est que dans les années 1960, en relation avec le développement des SIG, qu'apparaît la forme numérique de l'information géographique, jusqu'alors représentée par une forme purement analogique (cartes, photographies).

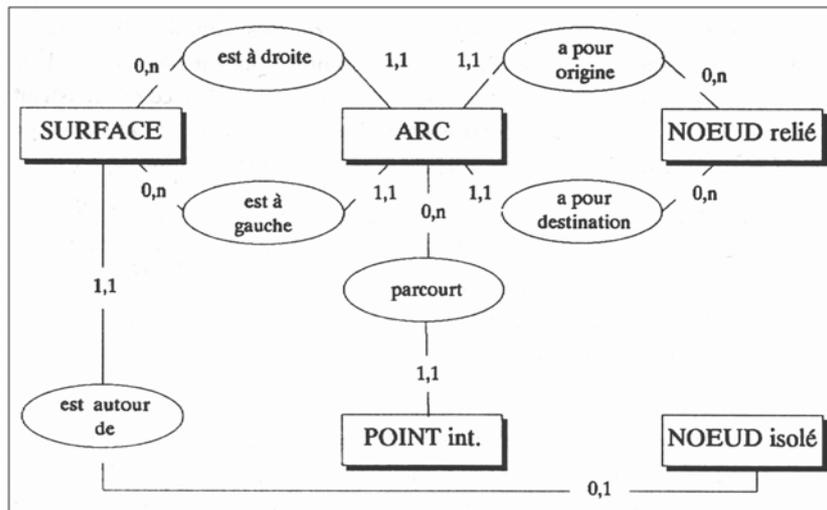
Deux approches de modélisation cartographique se sont développées pour décrire numériquement les objets réels. Elles ont conduit à formaliser deux modes principaux de représentation : le mode vectoriel et le mode matriciel.

4.5.1. Modes de représentation logique de l'information géographique

Le modèle conceptuel du mode matriciel, encore dénommé mode raster, maillé, tramé ou image, est relativement simple (ill. 13a). Il est fondé sur la notion de balayage séquentiel d'une matrice organisée en lignes et en colonnes, et constituée par des éléments de taille équivalente repérés par un numéro de ligne et de colonne. L'élément de surface, appelé pixel (« picture element » en anglais), tachel (tâche élémentaire), ou eldim (élément d'image), possède une valeur descriptive discrète (distance, température, profondeur...) ou classifiée (occupation des sols, type de substrat...). Ce modèle inclut la méthode de compression des données tramées par quadrillage hiérarchique (quadtree).



13a



13b

Illustration 13. Les modèles conceptuels de représentation de l'information géographique numérique (d'après Rouet, 1991).
13a : mode matriciel. 13b : mode vectoriel

Le modèle conceptuel du mode vectoriel est plus complexe (ill. 13b). La forme des objets est traduite par trois primitives graphiques : ponctuelle, linéaire et surfacique. A chacun de ces objets est associé un ou plusieurs couples de coordonnées dans un espace euclidien à deux ou trois dimensions, et éventuellement une valeur attributive. Ces primitives tissent les unes avec les autres, au sein de cet espace commun, un ensemble de relations spatiales, telles que l'intersection, l'adjacence, l'inclusion. C'est la topologie⁸ qui permet de les expliciter en assimilant l'ensemble des objets à des graphes planaires. En théorie, la topologie est définie par trois ensembles d'objets géométriques (sommet, face et arc) et cinq relations entre ces ensembles (ill. 14).

⁸ la topologie, ou géométrie de situation est une branche des mathématiques qui étudie les positions relatives des objets indépendamment de leur forme exacte, de leur localisation topographique et de leur taille : des surfaces peuvent être adjacentes, des lignes peuvent être connectées... (Pompon, 1992).

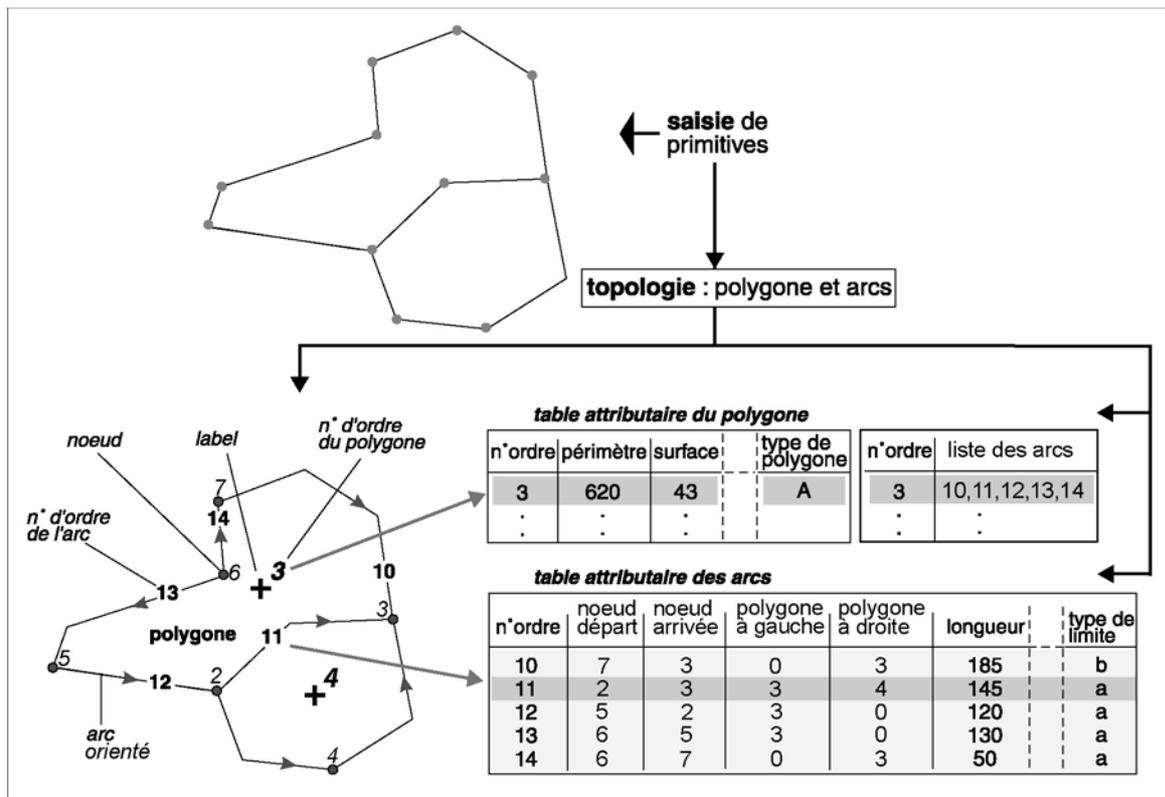


Illustration 14. La topologie (d'après ESRI, 1990, modifié).

Il existe deux systèmes de référence de localisation de l'information géographique numérique. Le système de référence indirect, fondé sur une description textuelle de la localisation, est généralement associé à un répertoire de correspondance qui assure le lien avec un système de localisation direct. Il est surtout utilisé pour des données de type administratif : adresse, code postal, îlot INSEE.... Dans le système de référence direct, la localisation d'un point dans l'espace peut s'exprimer par trois systèmes de coordonnées : cartésiennes, géographiques et en projection (Pornon, 1992). Les deux premiers expriment la localisation des objets sur un globe, donc en trois dimensions. Les coordonnées projetées sur un plan impliquent de ramener ces objets à leur position en deux dimensions sur un ellipsoïde de référence⁹. Quant à l'altitude des objets, elle est définie par rapport au géoïde de référence qui est la forme que prend le niveau moyen des mers.

Les progrès réalisés ces dernières années en géodésie spatiale¹⁰ permettent aujourd'hui de connaître à quelques centimètres près, la position géodésique d'un point quelconque positionné à la surface du globe. En France par exemple, depuis 1993, le Réseau Géodésique Français (RGF), basé sur des mesures GPS rapportées au référentiel géodésique WGS84, remplace le canevas traditionnel NTF. C'est un système de référence tridimensionnel, géocentrique et d'exactitude centimétrique. La géodésie spatiale offre donc aujourd'hui un

⁹ L'ellipsoïde permet de disposer les objets géographiques sur une surface mathématiquement définie, ce qui facilite les calculs de projection sur une surface plane (Pornon, 1992).

¹⁰ La géodésie spatiale développe et utilise des systèmes de positionnement par satellite (Global Positioning System) qui permettent une localisation sur le terrain en deux ou trois dimensions, avec une précision variable selon le système utilisé (de plusieurs dizaines de mètres à quelques millimètres). Les mesures, qui peuvent concerner divers aspects d'un suivi de terrain, servir au calcul d'un Modèle Numérique de Terrain et à la rectification géométrique de documents aériens, sont directement intégrables dans une base d'information géographique (Brossard *et al.*, 1998).

contexte technologique cohérent avec l'environnement européen et mondial, se traduisant progressivement par une harmonisation des systèmes de positionnement.

4.5.2. La normalisation

Vu la prolifération des bases d'information géographique et la multiplication des échanges, notamment par le Web, la normalisation dans le secteur de l'information géographique numérique est rapidement devenue une nécessité. Pour y parvenir, diverses commissions se sont mises en place aux niveaux national et international au cours des années 1990, telles que le Conseil National pour l'Information Géographique (CNIG) en France et de multiples services similaires dans d'autres pays. En Europe, la Commission Européenne de Normalisation (CEN) possède un comité technique, le CEN/TC 287, qui est responsable des normes concernant l'information géographique. De même au niveau mondial, le comité ISO/TC211 de l'Organisation Internationale de Standardisation (ISO) s'intéresse à la géomatique. Outre la normalisation des formats d'échange, les domaines de compétences de ces instances dans le domaine de l'information géographique, concernent notamment les produits de référence, la qualité et les métadonnées.

L'IGN est chargé d'élaborer le Référentiel Géographique à Grande Echelle (RGE®)* en intégrant des données de référence, issues de ses propres base ou provenant d'autres producteurs.

* par décision interministérielle

Le RGE® est constitué de 4 composantes :

La composante image : **BD ORTHO®**

La composante topographique : **BD TOPO®**

La composante parcellaire : **BD PARCELLAIRE®**

La composante adresse : **BD ADRESSE®**

BD ORTHO®



Contenu

Photographie aérienne couleur orthorectifiée, de résolution 50 cm.

Livraison

Dalles de 1 km², format TIFF, 24 bits.
Livraisons : Lambert II étendu, Lambert 93, Lambert zone en option.

BD TOPO®



Contenu

Voies de communications
Réseaux de transport
Hydrographie
Lignes et limites diverses
Bâtiments
Végétation
Altimétrie.

Livraison

Format : EDIGéo, DXF et DWG, MIF/MID, SHAPEFILE, GéoConcept export.
Projections : Lambert zone, Lambert II étendu, Lambert 93.

BD PARCELLAIRE®

Données parcellaires issues du cadastre, géoréférencées et assemblées. Les spécifications de la BD PARCELLAIRE® seront arrêtées au début de l'année 2003 et sa production suivra.

Contenu

Description des limites et identification des parcelles cadastrales.

BD ADRESSE®

La BD ADRESSE® est en cours de définition dans le cadre du groupe de travail "Adresse" du Conseil National de l'Information Géographique (CNIG).

Contenu

Description des noms de voies et location des adresses postales.

Illustration 15. Les niveaux d'information prévus dans le RGE.

Une *information de référence* doit permettre à chaque utilisateur d'associer des données de différentes origines et de positionner dans l'espace ses propres informations. Elle ne répond à aucun besoin applicatif particulier mais doit, au contraire, être commune au maximum d'applications de façon à permettre la manipulation et la combinaison des informations de toutes origines qui lui seront rattachées (CNIG, 1998). Dans tous les secteurs, des réflexions sont actuellement engagées sur la production d'information de référence. C'est l'IGN qui est chargé en France de l'élaboration d'un Référentiel à Grande Echelle (RGE)¹¹ (ill. 15).

¹¹ Mandat sur décision interministérielle du 19 février 2001.

Le projet dont l'échéance est annoncée pour 2007, est de rassembler au sein de cette base de données les données de référence disponibles sur le territoire national au sein des organismes producteurs de données géoréférencées. Quatre niveaux d'information sont d'ores et déjà prévus par l'IGN : ortho-photographies (BD Ortho), topographie (BD Topo), parcellaires cadastrales (BD Parcellaire) et adressage localisé (BD Adresse).

Concernant spécifiquement la zone côtière, un premier inventaire des données géographiques de référence a été réalisé par le Shom et l'Ifremer (Allain *et al.*, 2000). Suite à la tempête et à la pollution par hydrocarbure qu'a connu le littoral atlantique français en 1999, le CIADT de février 2000 a décidé la mise en place d'un SIG interministériel (SIGI)¹² pour constituer un état initial de la zone côtière et aider à terme à évaluer l'impact de futures catastrophes. Dans la foulée, le groupe de travail littoral (GTL) est mis en place par le CNIG afin de dresser l'inventaire qualitatif des données existantes et des besoins, de définir les données de référence nécessaires à la création et au fonctionnement d'une banque d'information géographique littorale, d'élaborer un langage et un vocabulaire commun à l'ensemble des acteurs, d'établir un catalogue des données sur le littoral donnant les caractéristiques de chacune des informations nécessaires et identifiant les organismes susceptibles de les recueillir, de les valider et de les structurer pour les fournir et les mettre à jour, d'évaluer et prévoir un calendrier des besoins budgétaires des acteurs et de coordonner la mise en place des moyens humains et techniques nécessaires au recueil, à la validation et à une meilleure diffusion de l'information existante comme à l'organisation du réseau des organismes détenteurs de cette information. Mais comme le souligne Robin (2003), la définition de données de référence en zone côtière est extrêmement ardue. L'enquête nationale auprès de l'ensemble des usagers de la zone côtière, proposée par le GTL, met en évidence la multiplicité des approches, la difficulté d'identifier des besoins moyens, et corrélativement un produit unique de référence, même s'il semble exclu de proposer plusieurs données de référence adaptées à des utilisations particulières. Les recommandations définitives du GTL sont attendues en 2003.

La *qualité* d'une base d'information géographique est un paramètre essentiel à son utilisation par un tiers et à l'estimation de la fiabilité des résultats des analyses dont elle fait l'objet. Elle est définie dans la norme ISO 8402 comme l'ensemble des propriétés et des caractéristiques d'un produit ou d'un service qui lui confère l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites. Les paramètres de qualité attachés à l'information géographique numérique concernent sa nature, son format et son coût (Le Berre, 1999). La pertinence, l'âge (date de création, actualité, date de péremption), la répartition spatiale (exhaustivité et densité), l'échelle (de saisie, d'analyse et de restitution) et la précision (planimétrique et sémantique) sont les principaux paramètres utilisés pour décrire la qualité de l'information géographique numérique. Le format d'échange peut également influencer sur son intégrité. Il intervient donc également comme un paramètre de qualité, de même que sa disponibilité et son coût (Burrough, 1986).

Dans le développement de tout système d'information géographique conçu sur le long terme, il arrive un moment où la taille et la complexité des bases d'information qu'il pilote sont telles qu'il devient difficile d'évaluer leur potentialité d'utilisation pour une application donnée. Face à cette situation paradoxale qui est rapidement devenue une réalité dans le domaine de l'information géographique numérique, et qui peut conduire à la non-utilisation de

¹² Il se résume actuellement à la mise à disposition d'ortho-photographies acquises à basse mer en 2000 par l'IGN au dessus des côtes de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique.

l'information accumulée, des groupes de travail *ad hoc* réunis au sein des commissions de normalisation, se sont intéressés à la production de *métadonnées* normalisées. Cette nécessité est encore accrue par le contexte actuel de diffusion *via* Internet. Les métadonnées relatives aux informations géographiques numériques sont définies comme des données décrivant des informations et ont pour fonction de regrouper tous les paramètres utiles à l'utilisation d'un lot de données géographiques tels que le contenu, la qualité, les conditions d'échange... Dans ce domaine, la normalisation a pour objectif de garantir un cadre cohérent permettant de maintenir les investissements effectués par une institution sur les données géographiques et de fournir des données à des catalogues diffusés par différents supports dont le WEB.

L'organisation hiérarchique à trois niveaux, global, étendu et détaillé est celle utilisée par tous les standards et les normes¹³ (Spéry & Libourel, 1998) (ill. 16). Pour permettre au producteur d'information géographique de produire et de gérer des métadonnées conformes aux standards, des outils spécifiques sont proposés. Ainsi, le logiciel *Reports* développé par le CERTU¹⁴ pour le CNIG, permet de consulter et de saisir les métadonnées selon le standard européen ENV12657, labellisé par l'ISO. En complément de ces outils de saisie, les géorépertoires sont des catalogues qui proposent des fonctions de recherche et de visualisation des métadonnées, voire des possibilités de téléchargement, de commande et de facturation d'informations numériques. Les premiers géorépertoires ont été développés par les producteurs d'information géographique, qui ont rapidement ressenti le besoin d'étendre leur diffusion au WEB (Proulx *et al.*, 1997). Les géorépertoires actuellement disponibles sur ce réseau de communication, concernent essentiellement les bases d'information américaines contenant soit des supports cartographiques, des images satellitaires ou aériennes. On peut néanmoins citer le géorépertoire français Bosco (Base d'Observation pour le Suivi des Côtes), mis en œuvre par le BRGM et le CETMEF, qui porte à la connaissance des organismes intéressés un ensemble de données concernant les caractéristiques physiques du domaine côtier.

¹³ Ce type de structuration est adopté par exemple par le standard américain (FGDC), le comité européen de normalisation (CEN TC287), l'organisation internationale pour la standardisation (ISO TC211) et l'OpenGIS Consortium (OGIS).

¹⁴ Le Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports et les Constructions Urbaines du METL a différentes missions dont celle de contribuer à la normalisation et à la réglementation technique (www.certu.fr).

Code CEN/TC 287	Élément de métadonnées	Contenu
1.1	Titre du lot de données	<i>Nom explicite du lot de données (+ éventuellement date)</i>
2		Aperçu du lot de données
2.1	Résumé	<i>Brève description du lot de données géographiques, résumant son contenu et ses objectifs</i>
2.2	Nom du producteur	<i>Nom de l'organisme producteur des données</i>
2.3	Type d'entité spatiale	<i>Entité spatiale (point, ligne, surface, grille, ...)ⁱ</i>
9.3.6	Format	<i>papier ou numérique (type de logiciel)</i>
2.7	Objectifs de la production	<i>Objectifs pour lesquels le lot de données a été produit</i>
2.8	Echelle de la donnée	<i>Pour des données issues de la télédétection ou de modélisation indiquer la résolution</i>
3		Qualité du lot de données
3.1	Généalogie	<i>Brève description des étapes de production des données</i>
3.2	Exactitude du positionnement	<i>Précision en m, en degré, ...</i>
5		Système de référence spatialⁱⁱ
5.5.2	Nom du système de référence	<i>Exemples : WGS84, Europe50, NTF</i>
5.2.3	Nom de l'ellipsoïde	<i>Exemple : WGS84, Clarke 1880, International 1924</i>
5.2.4	Nom de la projection cartographique	<i>Exemple : Mercator, Lambert, UTM, ...</i>
5.2.5	Nom du niveau de référence verticale	<i>Niveau de référence altitudinal</i>
6		Extension géographique et temporelle
6.2.3.1	Nom de la zone couverte par le lot de données	<i>Dénomination de la zone géographique</i>
6.1.1	Etat d'avancement du travail	<i>Etat d'avancement du travail ou date d'achèvement prévue</i>
6.4	Extension temporelle	<i>Période, dates, intervalles de temps ... couvertes par le lot de données</i>
7		Définition des donnéesⁱⁱⁱ
7.4.1	Nom de l'attribut	<i>Paramètre associée à la donnée</i>
7.4	Définition de l'attribut	<i>Description du paramètre mesuré (contenu, unité de mesure, précision de la mesure)</i>
9		Métadonnées administratives
9.1.1	Nom de l'organisme	<i>Nom complet de l'organisme responsable du lot de données + sigle ou acronyme</i>
9.1.3	Adresse de l'organisme	<i>Adresse postale, téléphone, fax, courrier électronique, site Internet</i>
9.2.1	Nom du contact	<i>Nom et titre de la personne jouant le rôle de contact</i>
9.3.1	Conditions d'utilisation	<i>Contraintes réglant l'accès au lot de données géographiques et son utilisation (convention contractuelle ou commerciale, copyright, ...)</i>

ⁱ Type d'entité spatiale élémentaire utilisé pour représenter les données (ex : points pour des sondes bathymétriques, lignes pour des isobathes, surfaces pour des zones sédimentaires, grille pour un modèle, ...).

ⁱⁱ Pour être intégrées à un SIG, les données doivent se référer à un système de référence spatial commun. Les informations relatives au système de référence sont indiquées sur la carte dont est issue ou sur laquelle est reportée la donnée. Dans le cas de données recueillies sur le terrain à l'aide d'un GPS le système de référence est définie avant la saisie, selon la zone géographique.

ⁱⁱⁱ Ces trois champs doivent être renseignés autant de fois qu'il y a d'attributs thématiques par entité spatiale. Un fichier de données d'observations des dauphins peut ainsi comprendre l'heure de l'observation, la position du dauphin, son activité, ... Pour chaque paramètre il convient d'indiquer un nom et une description qui comprend le contenu du paramètre, son unité de mesure, la précision de la mesure, ...). Par exemple dans un fichier de données bathymétriques le paramètre « Profond » correspond à la mesure de la profondeur, en mètre, pour une précision de 0,2 à 1 m ; le paramètre « Age » correspond à l'année du recueil de la donnée.

Illustration 16. Les métadonnées simplifiées utilisées dans le programme européen d'étude des grands dauphins côtiers (d'après Liret *et al.*, 2003).

4.6. SIG en environnement

Concernant l'environnement, les SIG sont mis en œuvre dans des études ou des programmes de recherche finalisée ayant pour perspective l'aide à la décision. Dans ce contexte, la connaissance d'un territoire incluant ses multiples composantes physiques, naturelles et humaines ainsi que la maîtrise des processus d'évolution qui l'animent sont essentielles. Or

l'information géographique numérique puisqu'elle permet d'analyser les relations spatiales entre les divers paramètres environnementaux, et du fait des possibilités de modélisation qu'elle offre, constitue un élément essentiel à la compréhension du milieu. Mais qu'ils soient scientifiques ou gestionnaires, les utilisateurs de SIG, s'ils partagent un outil et un objet d'étude commun, ont des attentes complémentaires en ce qui concerne l'utilisation du traitement numérique de l'information géographique (Gourmelon, 2002).

4.6.1. L'intérêt des chercheurs...

Comme il n'est pas question ici de recenser les différents types d'applications scientifiques qui utilisent les ressources fonctionnelles des SIG, nous prendrons l'exemple de l'écologie du paysage où la pratique du traitement numérique de l'information géographique constitue un pôle scientifique pluridisciplinaire extrêmement dynamique dans les pays anglo-saxons¹⁵. Les réflexions menées y sont résolument spatialisées et quantitativistes et traitent de l'écologie des paysages en tant que science écologique et géographique transdisciplinaire (Naveh, 1993) au sein de laquelle la dimension spatiale occupe une place centrale.

La compréhension du fonctionnement et de l'évolution des écosystèmes repose sur des données environnementales spatialisées qui sont nécessairement récoltées dans une double perspective spatiale et temporelle. Ces données de nature variée peuvent gagner en précision géométrique et en cohérence sémantique, en optimisation de stockage et en potentialités d'analyse, lorsqu'elles sont intégrées à un SIG. Dans ce champ de recherche et d'application, les SIG sont appréciés à plusieurs titres.

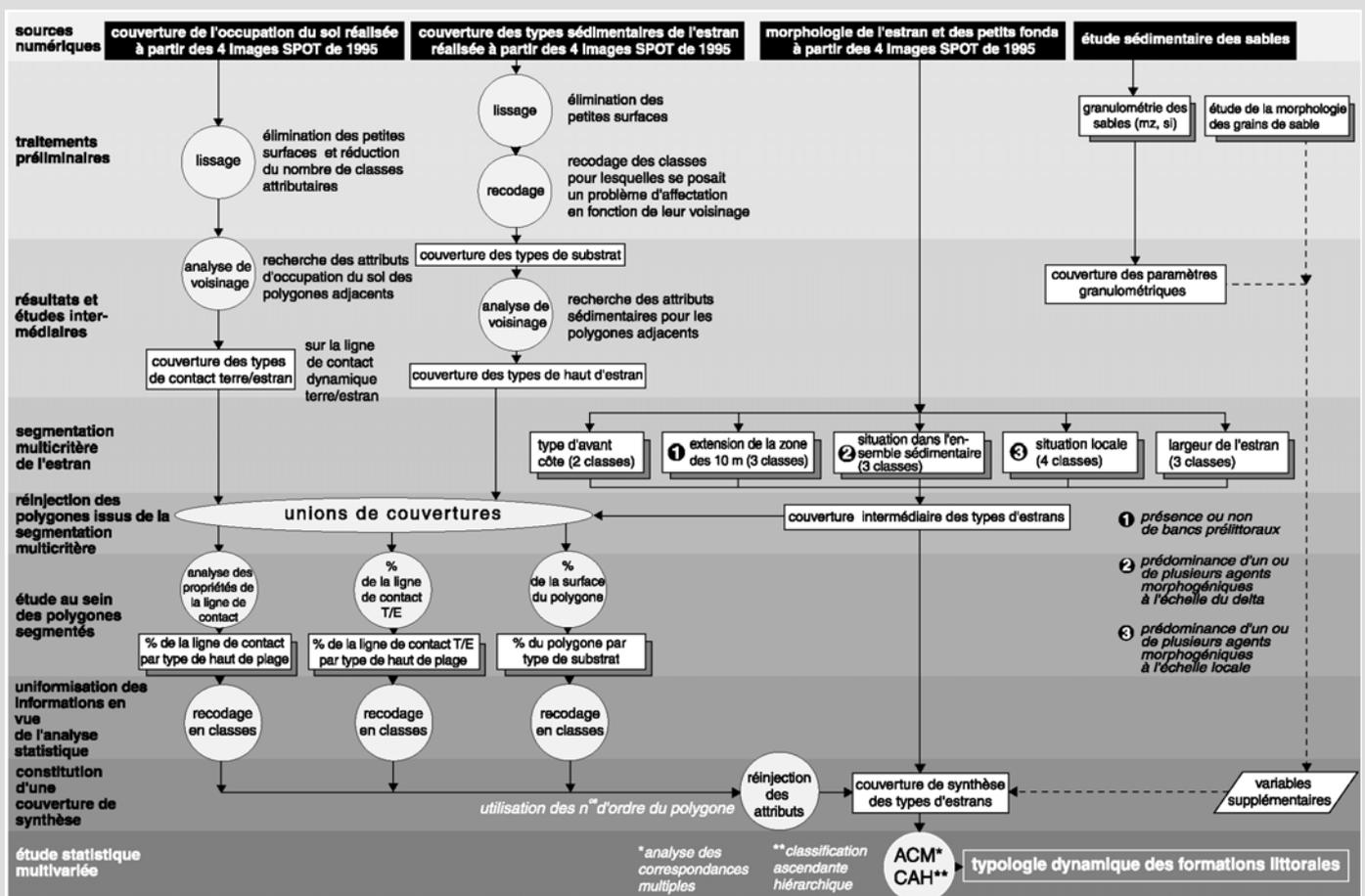
- La structuration des bases d'information géographique. Le choix d'une démarche SIG dans un projet concernant l'environnement répond à des critères extrêmement logiques. En effet, la multitude de paramètres et donc d'objets géographiques complexes de par leurs caractéristiques sémantiques et géométriques à prendre en compte dans une analyse environnementale conduit à recourir à la numérisation des données (Ricketts, 1992). Certains projets pilotent des bases d'information géographique reposant sur plusieurs dizaines de couches thématiques. La méthode proposée par Le Berre (1999) est une adaptation au SIG de la cartographie de synthèse de l'environnement mise au point par Journaux (1985). Elle est fondée sur cinq niveaux d'information correspondant à des degrés d'analyse croissants (ill. 12).
- Les composantes scalaires et temporelles de l'information géographique. Les perspectives spatio-temporelles inhérentes aux processus environnementaux impliquent d'intégrer la hiérarchie des systèmes écologiques au niveau des bases d'information géographique. La nature hiérarchique des processus et des structures environnementaux constitue un champ de recherche interdisciplinaire très riche qui conduit à explorer les méthodes empiriques d'agrégation et de désagrégation des objets géographiques permettant d'appréhender les niveaux scalaires d'un processus donné. Sur ce thème, un SIG multiscalaire peut fournir les moyens d'évaluations empiriques des variations d'échelles de la structure de l'environnement (Raynal *et al.*, 1996). Ainsi une des approches possibles pour créer une base d'information géographique multiscalaire est proposée par la structuration de l'information spatiale selon la méthode de rasterisation *quadtree* (Hansen, 1996), fondée sur l'emboîtement de cellules de grille de résolution spatiale différente.

¹⁵ comme en témoigne la revue *Landscape Ecology* qui assure la diffusion de la production scientifique concernée.

- Les possibilités d'analyse statistique et spatiale des paramètres environnementaux. La nature numérique de l'information géographique est adaptée à l'analyse statistique dont le premier niveau permet de disposer automatiquement de statistiques générales relatives aux objets géographiques (surface, longueur, distance...). A un niveau d'analyse plus complexe, la plupart des applications utilisant ces méthodes ont pour objectif de mettre en évidence les relations entre plusieurs variables environnementales telles que, par exemple, la végétation actuelle et l'histoire de l'utilisation humaine de l'espace (Foster, 1992) ou encore, l'impact de populations animales sur le milieu naturel (Johnston *et al.*, 1993). Du point de vue méthodologique, l'analyse statistique et spatiale des objets géographiques contenus dans les bases d'information concerne, par exemple, les réseaux (dimension fractale des objets linéaires) ou les mesures d'autocorrélation spatiale des objets surfaciques (encart 4).

ENCART 4. Les possibilités d'analyse spatiale des SIG.

Le SIG réalisé dans le cadre du programme de recherche concernant le fonctionnement de l'archipel des Bijagos a servi de support à plusieurs applications (Cuq *et al.*, 2001). Dans une perspective de gestion et d'aménagement du littoral, la description des processus dynamiques intertidaux a été réalisée de manière à déduire les composantes cinématiques de l'évolution du trait de côte (Pennober, 1999). A partir de données satellitaires, de levés de terrain et d'échantillons sédimentaires, des plans d'information géoréférencés sont réalisés. Ils servent de support à l'étude des propriétés métriques et topologiques, à l'analyse des relations spatiales entre les objets géographiques et à la définition des descripteurs morphologiques et spatiaux associés à ces objets.



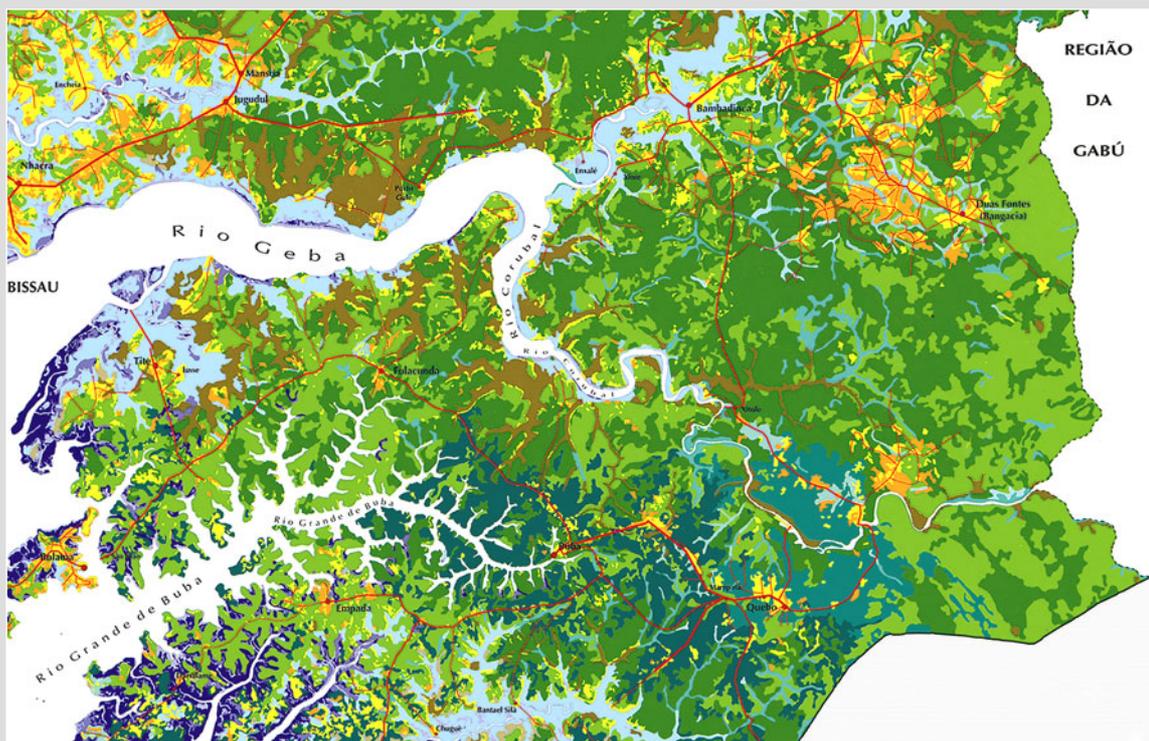
Les principaux résultats acquis à partir de cette méthode fondée sur l'analyse spatiale et statistique ont permis d'améliorer significativement la connaissance des formes, des dynamiques et de la cinématique qui caractérisent l'estran de l'archipel des Bijagos (Pennober, 2000).

- La mise au point de plans d'échantillonnage pertinents est également une des fonctions des SIG, appréciés par les chercheurs en environnement. En effet, une fois fixé le niveau scalaire adapté à l'étude d'un phénomène environnemental donné, le SIG peut être utilisé pour élaborer un plan d'échantillonnage des variables écologiques. Par exemple, le relief, la nature des sols et la végétation sont des informations qui peuvent être utilisées pour définir la localisation d'échantillons de terrain de manière à ce qu'ils soient représentatifs de la diversité écologique d'une région donnée (Briggs & Tantram, 1997).
- L'intégration de la télédétection dans les SIG apporte aux thématiques environnementales une puissance d'investigation réelle (Robin, 1995). Néanmoins, elle ne représente qu'une source potentielle de données parmi d'autres dont l'utilisation n'est justifiée que par la problématique posée. Les apports de cette synergie résident dans l'enrichissement des SIG par l'imagerie et réciproquement, dans les possibilités d'extraction d'information de l'imagerie par assimilation des produits-image dans une base d'information géographique. Les apports de ce couplage SIG-télédétection qui exige des règles méthodologiques strictes (Cuq & Gourmelon, 1996) s'expriment au niveau de trois démarches environnementales : l'inventaire, la révision et la prévention. Pour ce qui concerne l'inventaire, l'imagerie satellitaire s'avère l'outil indispensable surtout dans les régions qui ne disposent pas d'information spatiale adaptée (encart 5). Sur le thème de l'occupation du sol, il existe ainsi des bases d'information géographique développées à des échelles régionales constituées à partir de données satellitaires. On peut citer Corine Land Cover proposée par l'IFEN sur l'ensemble de l'Europe pour l'occupation des sols à 1 : 100 000 (Cornaert & Maes, 1992).

ENCART 5. La synergie SIG-télédétection.

Le projet de planification côtière engagé par la Guinée-Bissau à partir des années 1980 impliquait, pour sa mise en œuvre opérationnelle, de disposer de cartes actualisées de l'occupation des sols, en remplacement des documents existant datant de 1978. Vu les délais de production imposés, l'indisponibilité de données aériennes utilisables et les contraintes de coût, une méthodologie fondée sur l'actualisation d'une carte ancienne par une image satellitaire récente a été mise au point. Elle repose sur des méthodes d'analyse spatiale et l'élaboration de modèles d'évolution du couvert au sein d'un SIG (Cuq *et al.*, 1996).

Les résultats validés sur le terrain ont servi de support à la réalisation d'une carte de l'occupation des sols des provinces côtières bissau-guinéennes, produite à 1 : 200 000 et utilisée par les acteurs de la planification (Cuq *et al.*, 1993).

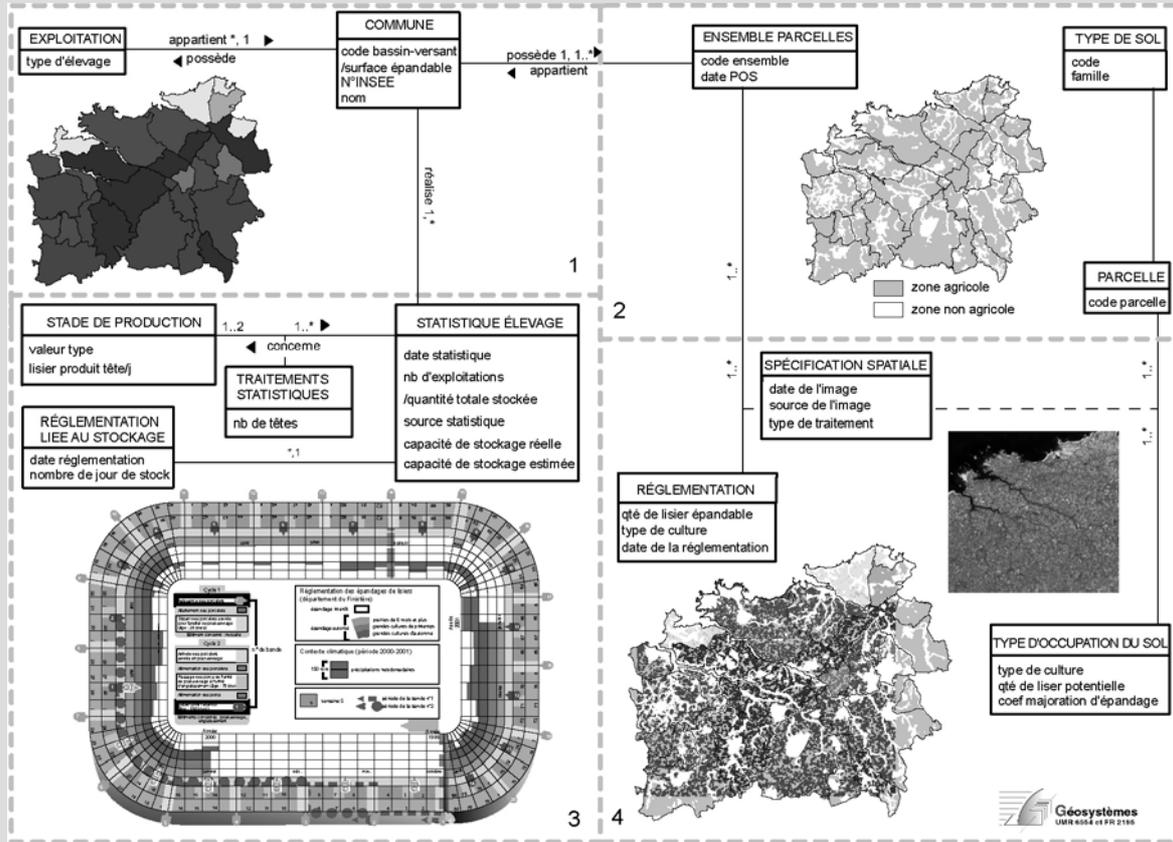


Pour la révision et la planification, l'imagerie satellitaire constitue une source d'information inégalée de par la répétitivité des observations qu'offrent les vecteurs de télédétection. Qu'elle concerne des projets de conservation de la nature et de gestion des ressources (Meaden, 1994, 1999), de planification urbaine (Dousset & Gourmelon, 2003) ou littorale (Donoghue, 1994 ; Donoghue & Mironnet, 2002), la télédétection constitue une source d'informations géographiques de choix. Enfin, dans le domaine de la prévention, la combinaison imagerie satellitaire-SIG est utilisée pour le suivi de zones soumises, par exemple, à des risques naturels tels que les glissements de terrain (Asté *et al.*, 1993) et les crues (Piégay, 1993), les risques d'incendie (Guarnieri, 1994), ou encore les risques de pollution agricole (Belloncle *et al.*, 1997) ou marine (Ricketts, 1992).

- Le couplage des SIG avec les modèles spatio-temporels. Cette initiative est récente et résulte autant du besoin d'intégration de la dimension spatiale dans les plates-formes de modélisation (Tissot, 2003) que de la nécessité de la prise en compte du temps dans les SIG (Cheylan *et al.*, 1994 ; Langran, 1992). Dans ce domaine, des développements conceptuels récents traitent des entités spatio-temporelles transformables en proposant un nouveau modèle de données intégrable dans un logiciel de type SIG (Claramunt & Thiéroult, 1995). L'objectif principal du couplage est de replacer les modèles dans un ensemble cohérent d'informations permettant de développer des outils de simulation pluridisciplinaire satisfaisants. Dans cette perspective, les SIG peuvent intervenir à deux niveaux dans la modélisation. L'information géographique est utilisée dans l'étalonnage des modèles afin de garantir un forçage pertinent et des résultats réalistes. Puis l'information géographique numérique intervient en phase de validation car le SIG peut gérer des séries de données spatiales nécessaires à l'analyse de l'évolution du système étudié. Cette tendance à la complémentarité SIG-modélisation est encore en phase de recherche pré-opérationnelle (encart 6). On peut citer néanmoins dans le domaine de la prévision des incendies de forêts, le projet d'aide à la décision à référence spatiale basé sur le couplage d'une BIG et de modèles des vents et d'accessibilité au site incendié (Guarnieri, 1994), en écologie des paysages, les modèles prédictifs pour l'évolution d'une ressource naturelle en relation avec les activités humaines (Bonnetoy *et al.*, 2001) et en climatologie urbaine, les modèles de pollution atmosphérique mis en œuvre dans un environnement de type SIG (Ung *et al.*, 2000). En milieu marin, la modélisation hydrodynamique est généralement utilisée pour calculer des courants de marée, des hauteurs d'eau, des transports sédimentaires et des concentrations en éléments solubles ou en suspension. En synergie avec un SIG, elle permet de simuler efficacement les dynamiques spatio-temporelles des masses d'eau, de fournir la localisation d'outils de surveillance et de mettre en évidence les secteurs à risque (Loubersac *et al.*, 2000).

Encart 6. Le couplage des SIG avec la modélisation.

DAHU (Dynamique des Activités Humaines) est un simulateur basé sur un modèle orienté objet qui permet de décrire dans le détail le déroulement spatio-temporel d'une activité d'élevage intensif (Tissot *et al.*, 2001). Il a été développé dans le cadre d'un projet du PEVS (CNRS) et appliqué à un cas concret visant à modéliser le cycle de l'élevage porcin hors-sol sur le littoral finistérien (Tissot, 2003). A partir de données mises en forme dans une base d'information géographique telles que les statistiques agrégées à la commune, issues du Recensement Général Agricole, l'occupation et l'utilisation du sol à différentes échelles spatiales (POS, images aériennes et satellitaires), le simulateur fournit divers résultats. Ainsi la pression d'épandage est simulée à un pas de temps journalier et corrélée avec les mesures de terrain relatives à la pollution des sols et des eaux côtières.



Source : Tissot *et al.*, 2001

4.6.2. L'intérêt des gestionnaires...

Du point de vue des gestionnaires, les domaines d'intervention des SIG sont extrêmement variés : suivi à long terme des écosystèmes, gestion des ressources naturelles, aménagement du territoire, lutte contre les risques naturels et technologiques... Quels que soient les domaines d'application, ils sont surtout utilisés pour leur capacité à gérer les données localisées et les sites, et aider au suivi de l'environnement (D'Oleire-Oltmanns, 1997).

En effet, la gestion de l'information spatiale de source et de nature variées est une priorité pour une institution concernée par l'environnement. Le choix d'un support numérique plutôt qu'analogique permet d'améliorer l'efficacité de la prise de décision en offrant des garanties de sécurité et de qualité des données, des facilités d'accès à l'information et des potentialités d'analyse accrues.

Concernant la gestion des sites, les prises de décision ont souvent comme support des documents cartographiques élaborés à partir d'une multitude de données spatiales (Lardon *et al.*, 2001). Ils constituent une aide visuelle indispensable pour le personnel de terrain, un support aux inventaires et un moyen d'information et de communication. Les SIG permettent

de mobiliser sur un support unique des informations de sources variées en des temps d'accès limité, de procurer une aide à la conception de cartes répondant à des besoins précis et de gagner du temps dans la production par une automatisation possible de la conception. L'ensemble de ces caractéristiques permet non seulement d'augmenter la production cartographique mais aussi d'en accroître la qualité et l'adéquation avec les objectifs à atteindre.

Pour le suivi de l'environnement, les SIG peuvent être utilisés dans la mise en place des opérations de terrain, dans la détection et la modélisation des changements spatiaux et pour la simulation d'évolution ou d'impacts (encart 7).

- Ainsi, ils servent à localiser les sites à inventorier avant la phase de terrain en combinant certaines informations contenues dans la base afin de déterminer les variables (écologiques) à échantillonner. Au retour de la mission, l'intégration des coordonnées géographiques des échantillons permet une meilleure gestion des sites expérimentaux. Dans ce cadre, les progrès technologiques récents des GPS permettent une localisation sur le terrain d'une précision centimétrique, ce qui réduit les risques d'erreur dans l'enregistrement de l'information spatiale. Dans ce contexte opérationnel, les SIG peuvent également intervenir dans le pilotage des plans d'expérimentation par une recherche des sites répondant aux critères requis pour la mise en place de l'opération ou pour la concentration d'actions sur les habitats naturels vulnérables ou à forte valeur patrimoniale (Joerin, 1995 ; Lathrop & Bognar, 1998 ; Mac Donald & Cain, 2000).
- En général, l'environnement possède une composante dynamique conditionnée par l'influence de contraintes naturelles et anthropiques, qui peut se traduire par des modifications plus ou moins importantes et irréversibles de la composition, de la structure et de la fonction des milieux, conduisant même parfois à leur disparition totale. L'aptitude à détecter les changements est donc cruciale pour une gestion efficace car elle permet d'établir des surveillances, de déceler des tendances dynamiques permettant d'établir des prédictions à court terme. Les SIG, par les méthodes d'analyse diachronique qu'ils offrent, sont bien adaptés à la détection des changements spatiaux. Ils fournissent également un moyen d'évaluation des actions de gestion et sont bien intégrés aux nouveaux modèles de gestion adaptée et interactive (Gibbs *et al.*, 1999).
- La simulation des impacts et des changements sur la diversité des milieux permet de proposer la mise en œuvre de stratégies de gestion visant à éviter ou à réduire certains aspects négatifs, voire de restaurer certains milieux à forte valeur patrimoniale ou stratégiquement sensibles. Leur modélisation spatio-temporelle, à partir d'informations contenues dans la base peut apporter une aide indiscutable par la production de synthèses réalistes de l'évolution de l'écosystème.

ENCART 7. Les principaux apports des SIG à la gestion de l'environnement.

Le SIG consacré au littoral de Guinée-Bissau a été mis en œuvre sur deux objectifs de gestion principaux (Gourmelon *et al.*, 2001) :

- aider à la mise en œuvre de la planification côtière engagée à l'échelle nationale,
- accompagner le suivi à long terme programmé sur la Réserve de Biosphère de l'Archipel des Bijagos (UICN, 1996).

Les acteurs de la gestion du littoral ont bénéficié des apports du SIG dans trois domaines.

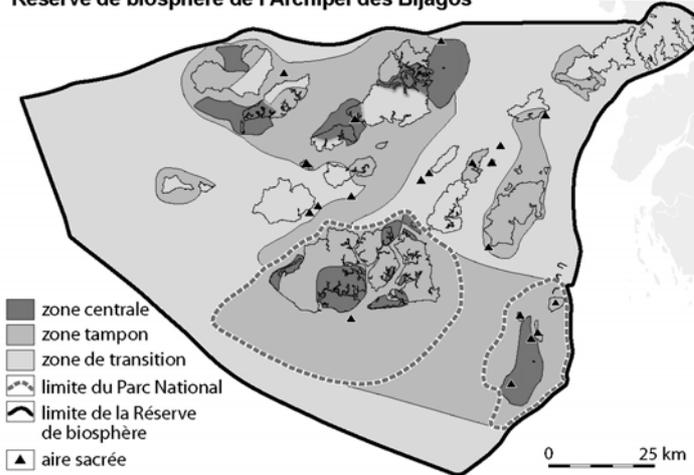
1) la gestion des données.

Extrait du "dictionnaire" de la base d'information Bijasig, F.Cuq (ed) 2001

COUCHE D'INFORMATION	DESCRIPTION	ENTITÉ	ATTRIBUTS	GÉNÉALOGIE
Plages d'altitude	Valeurs des plages hypsométriques en 8 tranches de 5 mètres (de < 0 m à > 30 m)	surfaces	altitude en mètres	MNT interpolé à 70 mètres à partir des données topographiques numérisées sur les cartes portugaises à 1 : 50 000 (1956)
Pourcentages des pentes	Valeurs des pourcentages de pente en 10 classes de 1 % (0% à sup 10%)	surfaces	pourcentages	MNT interpolé à 70 mètres à partir des données topographiques numérisées sur les cartes portugaises à 1 : 50 000 (1956)
Orientations des pentes	Valeurs de l'orientation des surfaces en 16 classes de 250 centigrades (0 à 4000 décigrades)	surfaces	orientation en décigrades	MNT interpolé à 70 mètres à partir des données topographiques numérisées sur les cartes portugaises à 1 : 50 000 (1956)
Démographie	Population (par île) et densité (hab/km ² /île)	surfaces	population et densité	Recensement de la population (1979) et contour des îles
Dynamique littorale	3 classes	surfaces	typologie	étude des conditions hydrodynamiques à partir de plans de houles et des images satellitaires SPOT XS 1995 et 1989 et de l'image LANDSAT de 1973

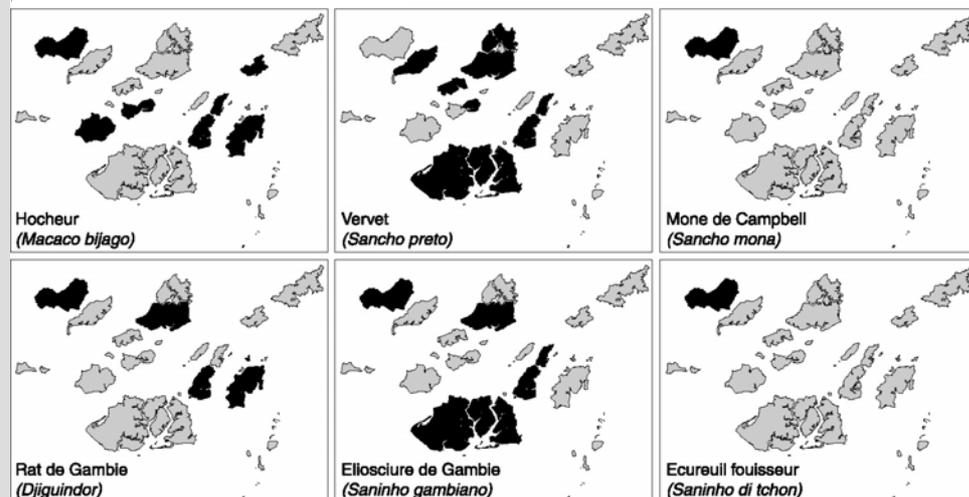
2) la gestion des sites.

Réserve de biosphère de l'Archipel des Bijagos



Localisation (présence/absence) de quelques mammifères caractéristiques dans l'archipel des Bijagos

3) Le suivi des milieux.



Sources : Cuq *et al.*, 2001

4.7. Conditions de mise en œuvre

4.7.1. Etapes pré-opérationnelles

La mise en œuvre d'un SIG se traduit par la mise en commun de données, de compétences, de ressources matérielles, et par la multiplication des échanges entre partenaires (De Sède & Thériault, 1996). Dans le domaine de la planification, les institutions qui utilisent les outils géomatiques s'accordent sur le fait que leur opérationnalité dépend de divers facteurs qu'il convient d'étudier avant l'implantation du système. Ainsi une étude de faisabilité doit permettre d'inventorier l'existant et d'identifier les besoins en termes d'information géographique, de proposer une structuration de l'information et de discuter des conditions de mise en œuvre (Le Berre & Gourmelon, 2000). Mais, même en suivant cette démarche éprouvée, les difficultés d'implantation de la géomatique dans les institutions sont réelles et les facteurs responsables des échecs constatés semblent davantage liés au contexte de la mise en œuvre qu'à sa nature technologique (Prélaz-Droux, 1995 ; Roche *et al.*, 1996 ; Gayte *et al.*, 1997). Néanmoins, cette situation a tendance à évoluer favorablement depuis quelques années.

Pour que les SIG puissent répondre efficacement aux requêtes des utilisateurs, une phase conceptuelle est indispensable pour déterminer l'architecture de l'information au sein du système. La première étape dans l'élaboration d'un SIG devrait être consacrée à l'élaboration d'un Modèle Conceptuel de Données (MCD), dont l'objectif est d'identifier, d'organiser et de schématiser les opérations à mettre en œuvre dans le cadre d'une application donnée. Or, dans bien des cas, les démarches prévalant à l'élaboration de bases d'information géographique restent intuitives, conduisant parfois à des problèmes d'utilisation dus à la mauvaise organisation des données. L'analyse conceptuelle et méthodologique de la mise en œuvre d'un SIG dans un contexte institutionnel correspond à une démarche d'informatisation qui peut être menée selon différentes méthodes, telle que Merise très utilisée en informatique de gestion. Néanmoins, leurs spécifications et leur champ d'application ne coïncident pas complètement avec la démarche menant à l'implantation d'un SIG, qui doit nécessairement s'envisager dans un cadre plus large fondé sur les étapes suivantes (Aronoff, 1989) : faisabilité du projet au regard du contexte institutionnel, spécification des besoins des utilisateurs, évaluation des choix techniques, implantation du système. De plus, les dysfonctionnements constatés dans certains projets résident souvent dans des objectifs mal définis (De Sède & Thériault, 1996). L'approche systémique du territoire pour la mise en œuvre de SIG institutionnels fournit un cadre pérenne et évolutif et favorise les collaborations inter-institutionnelles pour un partage des données géographiques (Prélaz-Droux, 1995 ; De Sède & Thériault, 1996). La Représentation Systémique du Territoire (RST) se définit comme un modèle interdisciplinaire du territoire basé sur la détermination de phénomènes et des relations qui le composent et qui sont pertinents dans le cadre de la gestion, de l'aménagement et de la planification du territoire (ill. 17). Elle en donne une définition et une description adaptées aux exigences d'une approche interdisciplinaire, prend en compte leur évolution temporelle et les causalités associées et évite les redondances et les incohérences propres à la juxtaposition des visions sectorielles de chacune des disciplines. La RST constitue de ce fait un cadre de référence pour la mise en œuvre d'un réseau d'échanges entre des partenaires possédant des applications géomatiques et étant appelés à travailler ensemble dans le cadre de l'aménagement et de la gestion du territoire (Prélaz-Droux, 1995). De fait, comme le soulignent Chevallier & Daudelin (1996), les apports de la géomatique et plus particulièrement des SIG à la gestion territoriale et au développement durable ne sont réels que s'ils répondent à des objectifs décisionnels clairement formulés.

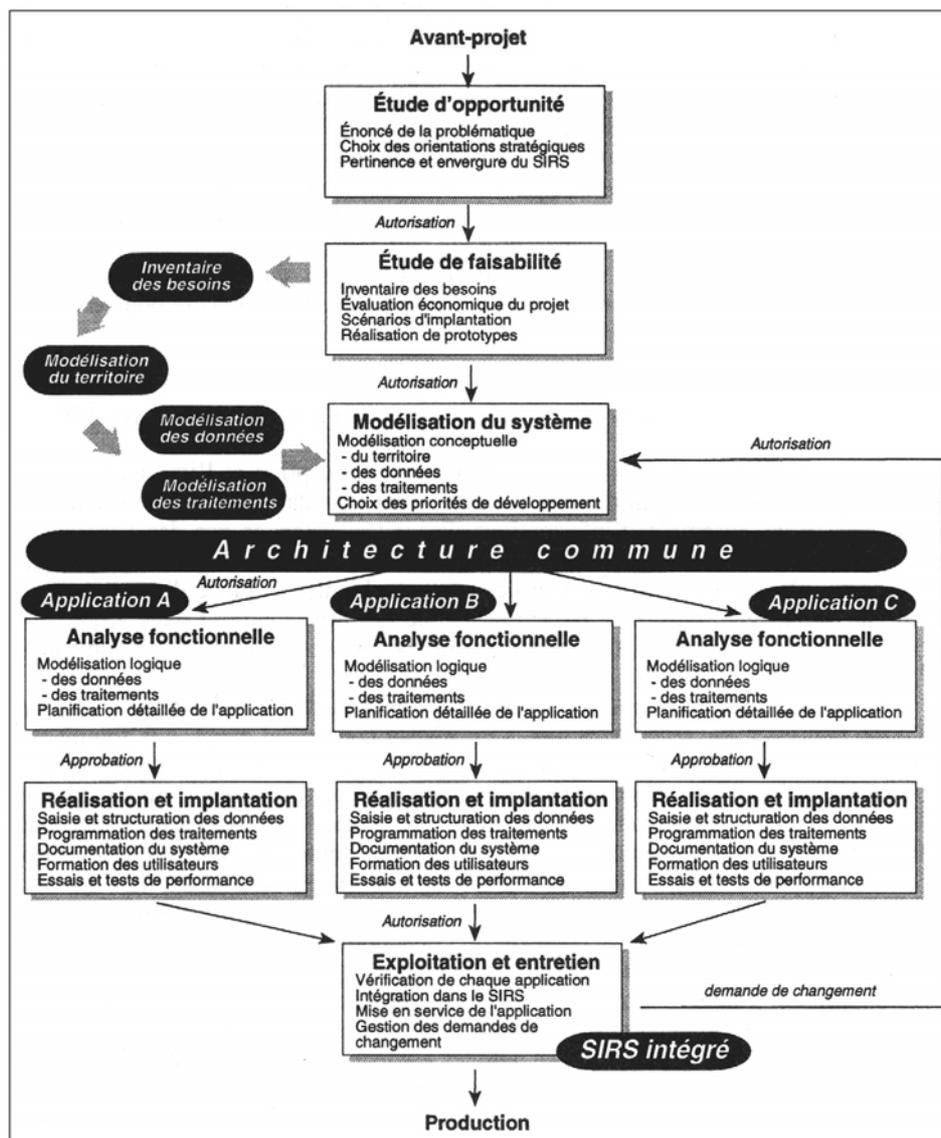


Illustration 17. Les principes de la Représentation Systémique du Territoire (d'après De Sède & Thiéroult, 1996).

4.7.2. Mise en œuvre opérationnelle

Les thématiciens de l'environnement qui utilisent les potentialités des SIG travaillent souvent dans une perspective d'aide à la décision spatiale et agissent de ce fait dans des programmes de recherche finalisée. Dans ce cadre, un SIG a pour vocation de produire les éléments spatiaux nécessaires à l'inventaire des connaissances concernant un espace donné, de contribuer à l'analyse des processus spatio-temporels qui s'y déroulent et d'aider aux prises de décision des gestionnaires, trois domaines d'application qui correspondent aux phases de développement de l'outil (Crain & Mc Donald, 1984) (ill. 18).

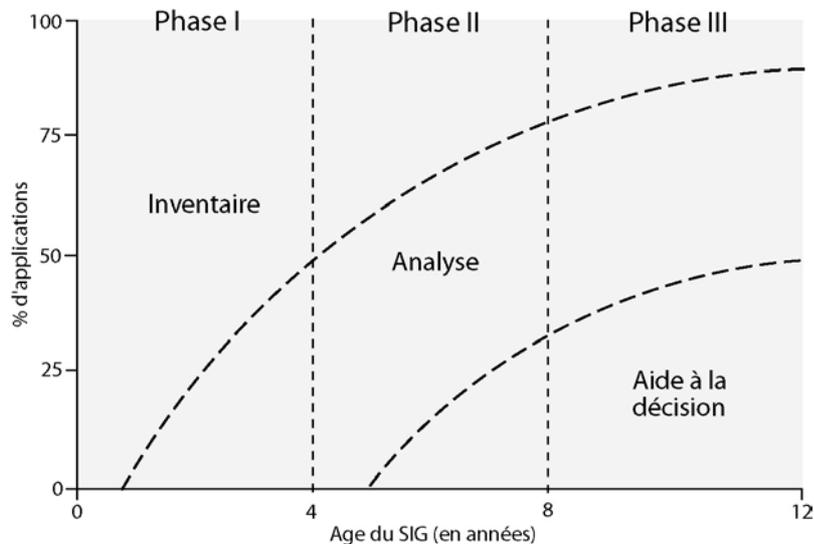


Illustration 18. Les principales étapes de la mise en œuvre d'un SIG (d'après Crain & Mc Donald, 1984).

- L'état des connaissances environnementales conduit, dans un premier temps, à dresser un inventaire des données nécessaires à la résolution de la problématique posée, sous la forme d'un dictionnaire des données. Ensuite, les données disponibles sont mises en forme dans une base d'information structurée, supposant leur mise en cohérence géométrique et sémantique des points de vue thématique, scalaire et temporel. Cette étape indispensable permet non seulement de dresser un inventaire des connaissances mais aussi de mettre en évidence les lacunes et, corrélativement, d'identifier les informations complémentaires à acquérir.
- L'analyse des processus environnementaux nécessite la prise en compte de nombreux paramètres physiques, biologiques et socio-économiques, acquis dans une double perspective scalaire et temporelle. Leur intégration sous forme de couches au sein d'un SIG, permet l'analyse de leurs relations logiques, thématiques, statistiques ou géométriques par diverses fonctions (calcul de distances ou de surfaces, interpolation, analyse multivariée, ...). Les résultats spatiaux des analyses réalisées constituent, en retour, une information inédite susceptible d'enrichir les bases d'information géographique. Ainsi les SIG, en permettant l'analyse des relations spatiales qui existent entre divers paramètres et du fait des possibilités de modélisation qu'elle offre, constitue un élément essentiel à la compréhension des processus environnementaux (Haines-Young *et al.*, 1993).
- L'acquisition des connaissances peut avoir pour objectif de fournir les éléments nécessaires à la gestion de l'environnement (Burbridge & Humphrey, 1999). Les SIG peuvent y contribuer soit par la production de produits finalisés (cartes, statistiques, simulations...) soit en tant que support d'information dans des systèmes opérationnels de décision. Par exemple, les gestionnaires d'espaces protégés développent un ensemble d'activités dont certaines tâches peuvent bénéficier des fonctionnalités des SIG : la gestion des données localisées et des sites ainsi que le suivi de l'environnement (Briggs & Tantram, 1997).

4.8. SIG et gestion intégrée de la zone côtière

Si l'intérêt des SIG pour l'environnement littoral, est reconnu depuis plusieurs décennies, c'est seulement à partir du début des années 1990 que les applications se sont diversifiées et multipliées, utilisant alors les progrès technologiques réalisés en informatique et surtout les données spatiales et océanographiques de plus en plus nombreuses. Avant cette date, des projets pilotes ont été menés, essentiellement dans les pays anglo-saxons, qui utilisaient essentiellement les capacités de stockage et de représentation cartographique de ces systèmes. C'est le cas par exemple, des projets RAMS (Resources and Management Shoreline database) mis en œuvre dans la baie de Chesapeake aux Etats-Unis (Eberhart & Dolan, 1980) et CIS (Coastal Information System) réalisé par le Canadian Geological Survey (Fricker & Forbes, 1988).

A partir du début des années 1990, les logiciels permettant le développement de SIG sont plus performants et plus ergonomiques, les mettant à la portée d'un public de plus en plus important. Néanmoins, ils restent adaptés à la résolution de problématiques terrestres, et tiennent peu compte du caractère flou des limites géographiques en milieu marin, de la gamme scalaire extrêmement large dont il faut tenir compte dans l'étude de processus côtiers, de la nécessité d'appréhender un environnement en trois dimensions et éminemment dynamique. Il résulte de l'inaptitude de l'outil à produire et à gérer l'information dynamique, un retard certain du développement des SIG côtiers comparativement à ceux consacrés aux espaces terrestres. Néanmoins, Bartlett (1999) souligne que même dans leur état de développement actuel, ils peuvent contribuer efficacement à la gestion intégrée des zones côtières de différentes manières.

- Ils offrent en effet la possibilité de gérer des bases de données volumineuses concernant des espaces géographiques complexes et vastes et des thématiques variées.
- Ils impliquent l'adoption de standards concernant les typologies, les référentiels géographiques, les métadonnées descriptives, qui garantissent non seulement la conformité des bases d'information développées, mais aussi la compatibilité de l'information entre les utilisateurs et donc sa pérennité.
- Ils permettent le partage de bases de données, notamment *via* Internet, facilitant ainsi l'actualisation de l'information, et la fourniture à l'ensemble des acteurs concernés, d'une information commune. Ce caractère non redondant de l'information s'accompagne d'une facilité de stockage et d'accès.
- Enfin, ils proposent des outils de modélisation et de simulation appréciés pour l'aide à la gestion, dans la mesure où ils permettent de simuler l'impact d'une mesure de gestion quelconque avant sa mise en œuvre effective.

Si les SIG sont utilisés dans de nombreuses problématiques littorales, scientifiques et finalisées, leur appui à la prise de décision dans un contexte de gestion intégrée de la zone côtière reste actuellement partiel et dans bien des cas sectoriel. Néanmoins, sur le thème intégrateur du risque côtier, ils fournissent un certain nombre d'éléments utiles à l'évaluation et à la simulation du risque : cartes thématiques, production d'indices et de variables spatio-temporelles synthétiques, représentation globale du risque (Robin, 2003)... S'il on admet qu'une bonne décision de gestion doit conduire, à partir d'une connaissance complète de l'évolution des processus, à maintenir ou à améliorer l'état du système dans des perspectives de développement durable, il convient d'élaborer un modèle de réalité pertinent et de s'interroger sur les modes de représentation de l'information (Cuq, 2000). Or, la complexité des systèmes côtiers et des processus qui s'y déroulent rendent difficile l'élaboration d'un tel modèle et impliquent d'étudier les modalités d'intégration des SIG au sein de systèmes d'aide

à la décision fondés sur la complémentarité des méthodes géomatiques (ill. 19) et notamment sur le couplage avec des modèles (Capobianco, 1999 ; Keith *et al.*, 2000). Dans ce domaine, la modélisation des interactions entre Nature et Sociétés représente l'un des enjeux des prochaines années en ce qui concerne l'aide à la gestion des zones côtières, au niveau de la simulation de l'impact et de la prédiction des tendances évolutives (Cuq, 2000).

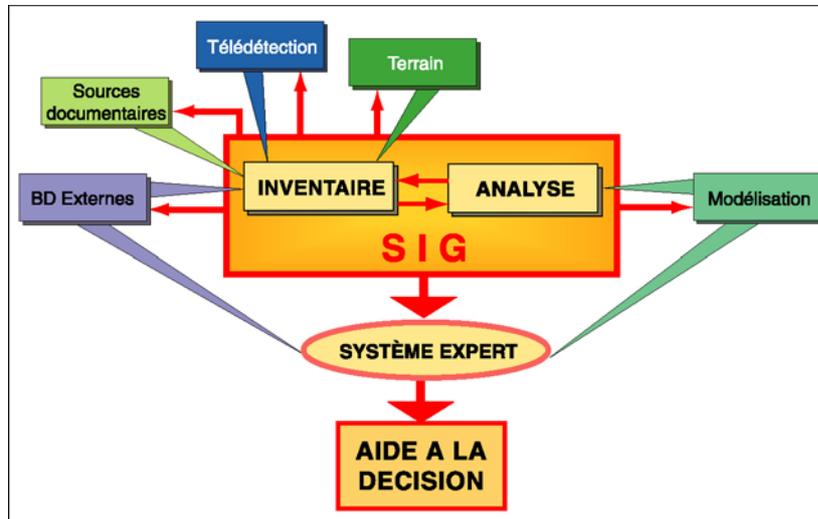


Illustration 19. Vers un outil intégré, adapté au suivi, à l'analyse et à la gestion du littoral (d'après Gourmelon & Le Berre, 2001).

5. CONCLUSION

La zone côtière est un espace extrêmement complexe dont le fonctionnement et l'évolution sont conditionnés par de multiples paramètres naturels, physiques et anthropiques qui interagissent à différentes échelles spatio-temporelles. Les systèmes écologiques y sont variés, généralement très productifs, et d'autant plus fragiles que leurs ressources renouvelables subissent une pression anthropique croissante, pouvant menacer l'équilibre global et déboucher sur des conflits d'usage.

Cette situation préoccupante à l'échelle mondiale a justifié depuis une trentaine d'années la mise en place de programmes nationaux et internationaux relatifs à la gestion intégrée de la zone côtière et à des recherches scientifiques menées dans différentes disciplines. Néanmoins, de nombreux constats font état de la difficulté de disposer d'une vision synthétique des processus littoraux, indispensable aux prises de décision. Si on se réfère à l'expérience internationale dans ce domaine, il semble acquis que les avancées les plus significatives concernant la prise en compte des conditions écologiques se sont notamment appuyées sur les systèmes d'information géographique. Outils scientifiques et techniques, ils établissent un lien tangible entre les différents compartiments du système étudié et synthétisent l'ensemble des progrès conceptuels et techniques réalisés dans le domaine de l'information géographique.

Néanmoins, la mise en place de ces systèmes dont les apports à la connaissance et à la gestion environnementales sont reconnus, pose un certain nombre de questions méthodologiques et nécessite une démarche conceptuelle rigoureuse. Concernant la zone côtière, leur utilisation implique également de disposer d'informations pertinentes et de méthodes d'analyse complémentaires. Il apparaît cependant que dans l'état actuel de leur développement, les SIG

peuvent contribuer efficacement à la production d'éléments de connaissance utiles aux prises de décision des gestionnaires.

La seconde partie de ce mémoire traite de l'apport et des limites de l'utilisation d'un SIG consacré aux espaces littoraux de la mer d'Iroise. Il est mis en œuvre avec deux objectifs complémentaires. Le premier est de contribuer aux recherches menées sur le fonctionnement et l'évolution d'un écosystème complexe, et le second est de procurer aux gestionnaires des éléments concrets facilitant leur prise de décision.

DEUXIEME PARTIE

SIG ET APPROCHE ECOSYSTEMIQUE DE LA MER D'IROISE

1. MER D'IROISE : PRESENTATION GENERALE DU CONTEXTE

1.1. Milieu naturel

Située entre la Manche et l'Atlantique, la mer d'Iroise s'étend de l'île d'Ouessant au Nord jusqu'à l'île de Sein au Sud ($48^{\circ}30'N - 48^{\circ}N$) (ill. 20). A l'Est, elle est limitée par les côtes occidentales du Finistère et par les entrées de la rade de Brest et de la baie de Douarnenez, alors que sa limite occidentale correspond approximativement à l'isobathe des 100 mètres. Trois ensembles insulaires s'y individualisent : l'île d'Ouessant, l'archipel de Molène, et l'île de Sein.

De ses caractéristiques topographiques, hydrologiques, hydrodynamiques et sédimentologiques, naissent une richesse et une diversité paysagère et biologique des plus remarquables (ill. 21). Ainsi, la mer d'Iroise est caractérisée par des habitats marins extrêmement nombreux qui témoignent non seulement de la rencontre entre les fonds grossiers et calcaires de la Manche, et ceux fins et vaseux du Golfe de Gascogne, mais aussi des gammes étendues de profondeur et des conditions hydrodynamiques variées.

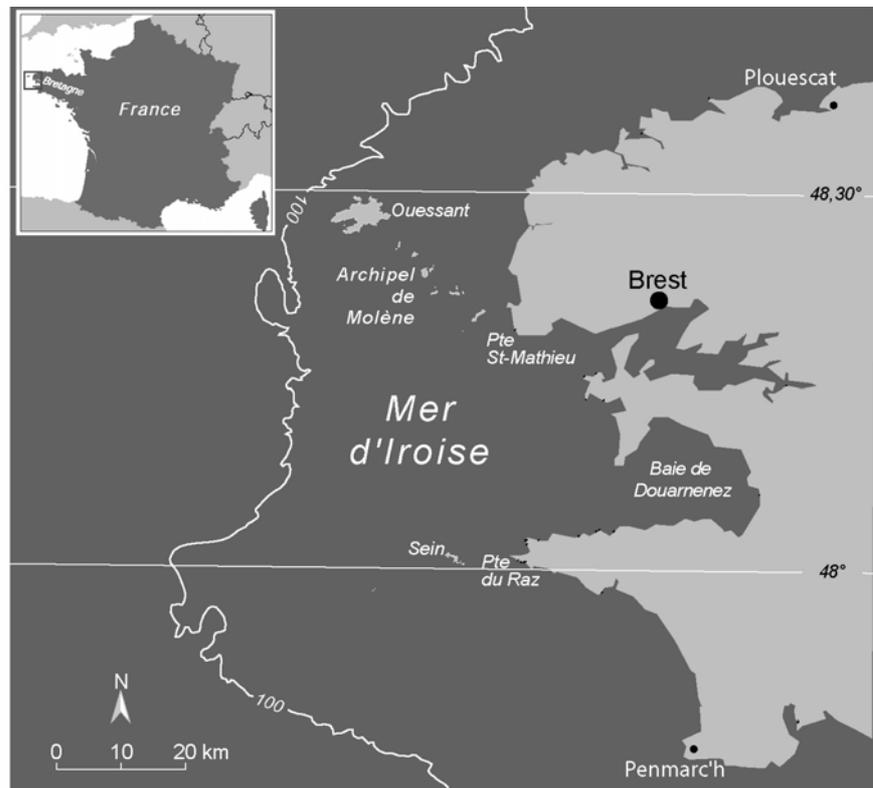


Illustration 20. La mer d'Iroise : situation géographique.

De même à terre, il existe de nombreuses biocénoses, dues notamment à l'alternance des côtes basses et meubles et des falaises, d'orientations diverses. De plus, l'Iroise correspond à la limite septentrionale ou méridionale de répartition de nombreuses espèces végétales et animales.



F. Bioret

Dune (Le Conquet)



L. Kerambrun

Champ de blocs (Porspoder)



L. Kerambrun

Transport maritime (embarcadère de l'île de Sein)



L. Kerambrun

Plaisance (fête nautique à Douarnenez)



L. Kerambrun

Port de pêche (Audierne)



L. Kerambrun

Pêche au casier (île de Sein)

Illustration 21. Diversité des paysages et des activités en mer d'Iroise.

Cette richesse écologique, reconnue dès les années 1950, est confirmée par les recherches actuelles qui considèrent que l'ensemble de la zone contient une palette presque complète des habitats marins des côtes Manche-Atlantique françaises et de leur peuplement, dans un état de conservation suffisamment satisfaisant pour abriter des populations pérennes des principaux super-prédateurs des réseaux trophiques (Le Duff, 1999).

Cet équilibre est néanmoins fragile, car soumis à des pressions anthropiques croissantes, liées à différentes activités professionnelles et de loisir, qui peuvent modifier les équilibres antérieurs et entraîner des situations conflictuelles et des menaces pour le maintien de la qualité de l'écosystème (ill. 21).

1.2. Activités humaines

En mer, se juxtaposent plusieurs activités dans un cadre spatio-temporel et réglementaire extrêmement complexe (Le Tixerant, 2002). Parmi les plus présentes viennent la pêche et le transport maritime. Par exemple, la moitié de la production nationale de laminaires est extrait de l'archipel de Molène, dont les abords abritent le plus grand champ d'algues exploité de France (Arzel, 1998). La pêche côtière est toujours pratiquée sur la zone. Elle met en œuvre des techniques diverses (types d'engins, maillage des filets...) et concerne des espèces cibles variées, prélevées à des époques et sur des zones particulières. Le transport maritime y est intense, à l'image du rail d'Ouessant au large de la mer d'Iroise, qui constitue une voie de navigation essentielle en Europe. Plus de 50 000 navires l'empruntent en effet chaque année, exposant le littoral finistérien à un risque potentiel de pollution élevé.

Sur la frange continentale, l'agriculture est basée sur un modèle d'exploitation intensive et spécialisée (Canevet, 1993), surtout dans la production laitière, porcine et avicole qui alimente une filière agroalimentaire bien implantée dans le Finistère. Cette activité n'est pas sans conséquence sur la qualité du milieu littoral dont l'altération est parfois à rechercher en tête de bassins versants (Tissot, 2003). L'eutrophisation des eaux côtières, favorisée notamment par des apports excessifs d'engrais chimiques et des pratiques d'épandage mal contrôlées, conduit à diverses expressions du déséquilibre du milieu telles que les marées vertes. Quant aux communes littorales et surtout insulaires, elles connaissent depuis une dizaine d'années un accroissement du tourisme qui devient une activité économique essentielle au maintien des populations locales (Brigand, 2002), mais qui peut conduire sur les sites les plus fréquentés à des dégradations environnementales.

La reconnaissance scientifique de la richesse du patrimoine environnemental de la mer d'Iroise, conjuguée à la prise de conscience de sa vulnérabilité face aux multiples pressions anthropiques qu'elle subit, ont contribué dès les années 1970, à la mise en œuvre de diverses mesures de gestion et de protection.

1.3. Protection

Différents statuts de protection se juxtaposent en mer d'Iroise dont les principaux sont les suivants : réserve de biosphère, parc naturel régional, réserve naturelle, réserve de chasse et de faune sauvage.

Le **Parc Naturel Régional d'Armorique** (PNRA) a été créé en 1969 par le Ministère de l'Environnement. Il s'étend sur 172 000 hectares dont le tiers en espace maritime (ill. 22). Les milieux qui le composent sont variés : les îles de la mer d'Iroise, la presqu'île de Crozon, l'Aulne maritime et les Monts d'Arrée. Un syndicat mixte assure son fonctionnement conformément à une charte qui définit notamment ses principales missions, à savoir :

- participer au développement économique et social des communes associées,
- connaître, protéger, mettre en valeur et transmettre le patrimoine naturel et culturel,
- partager ses objectifs avec la population locale et un public élargi.

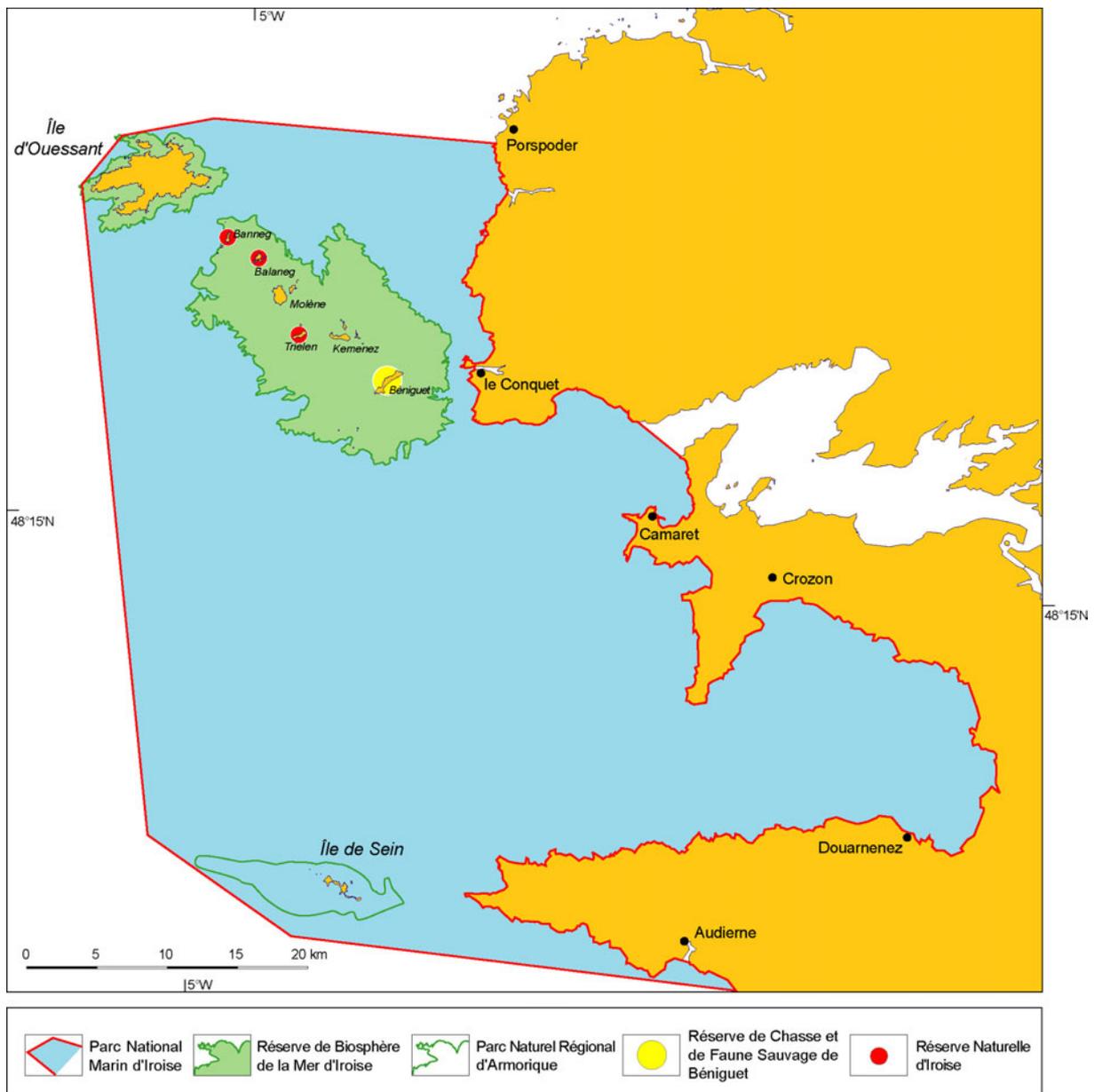


Illustration 22. Les principaux statuts de protection de la mer d'Iroise.

La **Réserve de Chasse et de Faune Sauvage** de l'île de Béniguet a été créée en 1986 (ill. 22). Sa gestion est assurée par l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS), établissement public sous tutelle du Ministère de l'Environnement (Yésou *et al.*, 1996). Le débarquement du public y est interdit par arrêté préfectoral depuis 1993. D'une superficie de 64 hectares, l'île de Béniguet est caractérisée par une flore et une faune remarquables. Malgré

des secteurs colonisés par des friches post-culturelles nitrophiles, elle conserve en effet la végétation originelle des dunes, hauts de plages et cordons de galets qui sont des habitats d'intérêt communautaire au titre de la Directive européenne « Habitats ». Mais son intérêt majeur réside dans la présence d'une avifaune nicheuse diversifiée à l'origine de l'actuel classement en réserve. Sur cet îlot, l'objectif de gestion est de conserver le patrimoine écologique notamment par des actions concrètes de limitation des broussailles et de prévention du dérangement des colonies d'oiseaux.

En 1988, l'archipel de Molène et l'île d'Ouessant reçoivent le label de **Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise**, décerné par le programme Man and Biosphere (Mab) de l'UNESCO, en reconnaissance de la richesse du patrimoine écologique de l'ensemble et de sa représentativité des écosystèmes littoraux du domaine biogéographique atlantique (ill. 22). Comme les autres réserves de biosphère créées de par le monde et selon les principes de la Stratégie de Séville, la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise a pour vocation :

- de participer à la conservation des ressources génétiques, des écosystèmes et de la diversité biologique ;
- d'intégrer le réseau mondial des aires protégées qui permet des échanges d'information scientifique et technique sur la conservation et la gestion des écosystèmes naturels et aménagés ;
- d'associer par des actions de développement durable, sur le long terme, protection de l'environnement et mise en valeur des ressources du territoire pour le maintien et le bien-être des populations locales.

La mise en œuvre de ces fonctions s'appuie sur un zonage de l'espace en trois aires aux enjeux différents (ill. 22). La zone centrale regroupe en Iroise quatorze îlots qui sont rigoureusement protégés et où ne sont tolérées que les activités scientifiques. La zone tampon qui englobe tous les autres îlots et la frange littorale des deux îles habitées, est vouée à la recherche, à l'éducation et aux activités récréatives. Dans la zone de transition, correspondant à la partie centrale des îles d'Ouessant et de Molène et à l'ensemble du milieu marin pris en compte jusqu'à l'isobathe des 20 mètres, doit théoriquement s'exercer un développement durable des ressources en synergie avec la protection des milieux.

Dans le cadre des activités scientifiques de la réserve et du suivi à long terme mis en place, des inventaires ont été réalisés dans différentes disciplines. Ils concernent la végétation des îlots de l'archipel de Molène (Bioret & Fichaut, 1990), les activités humaines en milieu marin (Hily & Cuillandre, 1991), la macrofaune intertidale (Jean *et al.*, 1993) et les mammifères marins (Ridoux *et al.*, 1994). Ces travaux confirment la richesse de la réserve en termes de biodiversité et soulignent sa vulnérabilité face à différentes pressions anthropiques. Avec le projet de création d'un parc national marin en Iroise, impulsé par le comité de gestion de la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise dès 1993, le suivi à long terme programmé a été précocement interrompu.

Créée en 1992, la **Réserve Naturelle d'Iroise** est gérée par Bretagne Vivante-SEPNB¹. Elle regroupe dans l'archipel de Molène, les îlots de Banneg, Balaneg et Trielen sur une superficie totale de 39 hectares (ill. 22). Ses paysages insulaires sont divers et l'ensemble présente une grande originalité écologique du point de vue des biotopes et des peuplements. Ainsi vingt espèces d'oiseaux nicheurs y sont recensées et le milieu marin abrite des petites populations sédentaires de phoques gris, de grands dauphins et de loutres. La réglementation interdit l'accès à Banneg et le tolère périodiquement à Balaneg et en permanence à Trielen.

¹ Ces îlots marins faisaient partie de la réserve biologique (SEPNB) qui gère actuellement l'île aux Chrétiens, Kervouroc, Morgaol et l'ensemble des îlots situés aux abords de l'île d'Ouessant.

Depuis 1993, l'Etat s'intéresse officiellement au projet de création d'un **parc national marin en Iroise**. Les études menées notamment dans le cadre des activités scientifiques de la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise ont confirmé le formidable patrimoine naturel de ses espaces marins et terrestres. En parallèle, les constats dressés par les acteurs socio-économiques témoignent d'un engouement croissant pour cette zone qui s'exprime par 5000 emplois dans le secteur des services liés aux activités récréatives. De manière à conserver le patrimoine paysager et naturel tout en favorisant un développement socio-économique durable, un projet de territoire est actuellement en cours de définition. Reposant sur des groupes de travail constitués de scientifiques, de gestionnaires et de professionnels socio-économiques, la réflexion est engagée sur différentes problématiques telles que le maintien des ressources halieutiques, le développement des îles habitées, la conservation du patrimoine naturel et culturel. La zone du Parc, telle qu'elle est établie actuellement, correspond approximativement aux limites de la mer d'Iroise, en incluant la baie de Douarnenez. Trois périmètres d'intérêt patrimonial majeur concernent l'île d'Ouessant et ses abords, l'archipel de Molène et la Chaussée de Sein (ill. 22).

1.4. Contexte scientifique en mer d'Iroise

1.4.1. La problématique

Depuis une cinquantaine d'années, de multiples recherches ont été menées sur différentes problématiques posées par l'environnement côtier de la mer d'Iroise (Le Duff, 1999).

Ses caractéristiques naturelles remarquables, couplées à une augmentation de la pression anthropique dont elle fait l'objet, impliquent une demande sociale croissante en termes de connaissances et de produits synthétiques d'aide à la gestion. Comme bien des espaces d'interfaces, la zone côtière finistérienne connaît en effet depuis peu la multiplication des enjeux sociaux, qu'ils s'inscrivent dans des contextes de développement socio-économique ou de préservation de la diversité paysagère et naturelle parfois conflictuels.

La demande notamment exprimée par les multiples acteurs locaux de la gestion est en plein essor depuis environ une décennie. Dans un contexte de gestion intégrée de la zone côtière, les problématiques abordées au niveau local concernent l'analyse de processus dynamiques spécifiques, tels que l'évolution du tapis végétal sur un îlot protégé, l'installation d'une espèce invasive dans un site donné, ... ainsi que l'étude voire la simulation des conséquences d'une décision de gestion sur le milieu. La description des processus dynamiques impliquent, dans ce cas, de disposer d'informations pertinentes du point de vue thématique et acquises à haute résolution spatio-temporelle. Les études menées doivent donc s'appuyer sur des suivis à long terme réalisés sur des variables clairement identifiées et à des échelles spatio-temporelles relativement fines. A ce niveau, les recherches finalisées ont pour objectif de fournir aux acteurs locaux des éléments de connaissance du fonctionnement et de l'évolution d'un processus donné leur permettant de mieux définir leurs objectifs de gestion et d'adopter des mesures opérationnelles adéquates.

Au niveau scalaire supérieur, l'intégration des résultats locaux acquis a pour objectif de répondre à des problématiques plus globales concernant les relations Nature/Sociétés et de dresser des bilans prospectifs. Le projet d'Observatoire du Domaine Côtier a été mis en place à cet effet.

1.4.2. Le projet d'Observatoire du Domaine Côtier

La création de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM) au sein de l'Université de Bretagne Occidentale, en mai 1997, répondait à un objectif scientifique pluridisciplinaire visant à étudier le fonctionnement du « système couplé atmosphère-océan-géosphère-biosphère de la planète Terre ». De manière à structurer la démarche, une fédération de recherche CNRS regroupant les laboratoires de géographie, de biologie, de bio-géochimie et de géologie de l'IUEM travaillant sur la zone côtière a été créée début 2000. Compte tenu du savoir-faire de ces équipes dans différents champs disciplinaires, la création d'un Observatoire du Domaine Côtier (ODC) a été acceptée par les tutelles. Programmé essentiellement sur le site-atelier de la mer d'Iroise, choisi en raison de ses spécificités naturelles et anthropiques et de l'intérêt qu'il suscite depuis plusieurs décennies auprès des scientifiques brestois, l'ODC a pour objectif d'analyser la dynamique du changement à long terme de l'environnement côtier sous l'influence du climat et des activités humaines. Pour y parvenir, les dispositions suivantes sont mises en œuvre (ill. 23) :

- Le suivi sur le long terme de la variabilité des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques du littoral par l'acquisition de séries d'observation concernant divers paramètres physiques (trait de côte), chimiques (flux de nitrates, teneur en chlorophylle *a*) et biologiques (bancs de maërl et herbiers de zostères) ;
- la mise en place d'un Système d'Information pour l'Environnement Côtier (SIEC) destiné à rassembler les données résultant des observations, à les mettre en forme, et à les rendre accessibles à la communauté scientifique et à ses partenaires extérieurs,
- la recherche des facteurs responsables de cette variabilité : phénomènes climatiques à grande échelle et/ou perturbations anthropiques locales et régionales,
- la modélisation du fonctionnement du système sur le long terme.

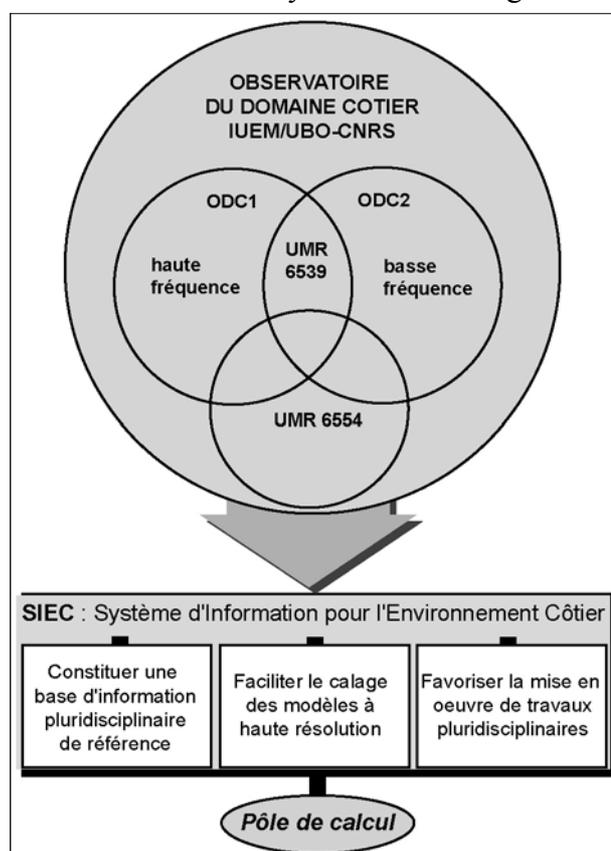


Illustration 23. Les éléments de l'Observatoire du Domaine Côtier de l'IUEM.

La mer d'Iroise et ses abords constituent donc un site remarquable, tant du point de vue de ses richesses naturelles, que de ses activités anthropiques multiples. La nécessité d'un suivi des milieux et des activités qui s'y déroulent et la mise en œuvre d'une gestion intégrée pour le maintien de la diversité écologique et le développement durable, y apparaît essentielle. C'est dans ce contexte que naît le projet de création d'un SIG dédié, dans un premier temps à la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise, puis étendu à l'ensemble du site.

2. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

C'est en 1989 que le projet de réaliser un SIG sur la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise a vu le jour. Il était en grande partie fondé sur les conclusions d'un atelier international consacré aux approches comparatives des méthodologies d'étude et d'expression des résultats de recherche relatifs aux systèmes micro-insulaires en Méditerranée et en Europe du Nord (Mab UNESCO, 1990). Elles affirmaient que les recherches finalisées interdisciplinaires menées dans le cadre du programme Mab de l'UNESCO avaient pour objectifs prioritaires d'identifier, de comprendre et de prévoir leur fonctionnement dans une perspective de gestion ou de restauration des systèmes écologiques et des ressources, qui tiennent compte du développement durable. De manière à prendre en compte dans sa globalité le système micro-insulaire, l'accent était mis sur la nécessité d'une mise en commun d'approches plutôt que sur la juxtaposition de compétences propres à chaque discipline (Long, 1990). Or, il apparaissait que l'approche systémique pouvait être favorisée par l'utilisation des systèmes d'information géographique, dont les potentialités étaient testées par le développement d'une base de données relationnelles concernant le milieu physique de l'île d'Ouessant (Madec & Cuq, 1990).

A l'époque, seule l'île d'Ouessant faisait en effet l'objet d'une description spatiale de ses composantes physiques, biologiques et humaines, synthétisée dans un atlas pluridisciplinaire (Brigand, 1986). Avec le classement en réserve de biosphère, un suivi scientifique à long terme était mis en place dès 1989, pour lequel des données spatialisées étaient fournies par les différentes disciplines associées à sa mise en œuvre. C'est dans ce contexte qu'un SIG fut élaboré à partir de 1991. Le projet, soutenu par le Conseil Général du Finistère fut mis en œuvre au Centre de Recherche Ornithologique et d'Etude du Milieu Insulaire (Institut de Géoarchitecture, Université de Bretagne Occidentale), relayé à partir de 1992 par le laboratoire Géosystèmes (UMR 6554 CNRS, Université de Bretagne Occidentale).

2.1. Ressources matérielles, logicielles et humaines

Actuellement, le SIG consacré à la mer d'Iroise est localisé au laboratoire Géomer (UMR LETG 6554 CNRS), membre de l'Institut Universitaire Européen de la Mer (UBO). Il bénéficie des ressources logicielles, matérielles et humaines de cette unité de recherche (ill. 24).

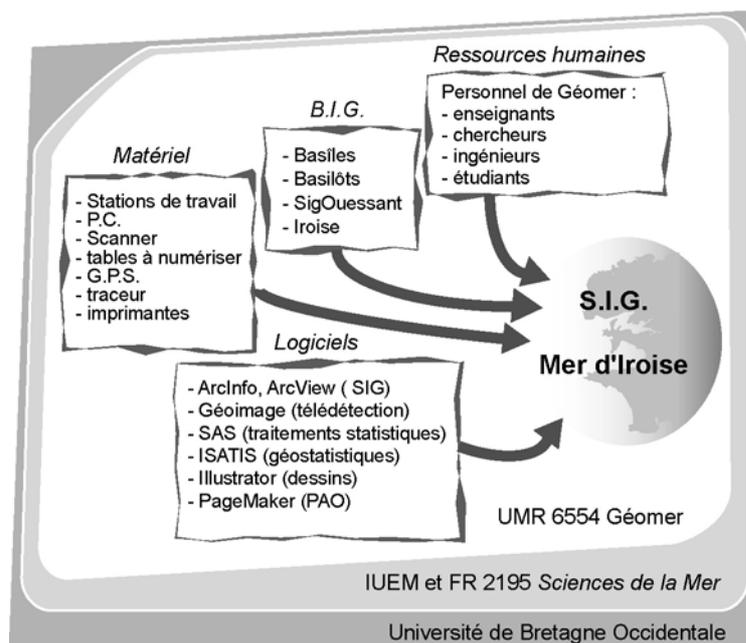


Illustration 24. Les composantes du SIG mis en œuvre sur la mer d'Iroise au laboratoire Géomer (UMR LETG 6554 CNRS).

Matériel

Les deux stations de travail sur lesquelles sont implantés les bases d'information géographique et les logiciels fonctionnent en réseau avec des micro-ordinateurs reliés aux périphériques d'entrée et de sortie : tables à digitaliser et scanners pour la saisie des documents analogiques, imprimantes et traceurs pour la restitution cartographique.

Logiciel

Depuis le début du projet, c'est le logiciel Arc Info qui pilote le système (ESRI, 1990). Il gère les deux modes de représentation de l'information géographique numérique, matriciel et vectoriel, en permettant la conversion d'un mode à l'autre. Il facilite également l'analyse de l'information par un modèle de données topologique et relationnel. Ses principales fonctionnalités concernent :

- l'acquisition de données de nature et d'échelle diverses : données image (documents scannés, images satellitaires) ou données vectorielles acquises par digitalisation à l'aide d'une table ;
- la double interrogation logique et graphique du contenu de la base ;
- la transformation des données : gestion des échelles et du système de projection, modélisation ... ;
- la gestion des données par un Système de Gestion de Base de données Relationnel (SGBDR) ;
- l'analyse de l'information par un corpus de fonctions spatiales, temporelles et prospectives ;
- la cartographie automatique.

Ce choix d'un logiciel évolutif a permis d'acquérir progressivement une bonne maîtrise de l'ensemble des fonctionnalités et s'est avéré tout à fait judicieux, vu l'évolution des produits ESRI au cours de la dernière décennie. Néanmoins, si à l'usage, Arc Info s'avère un outil extrêmement puissant, doté de fonctions d'analyse spatiale robustes, il n'est pas adapté au

traitement d'images et apparaît limité en analyse statistique multivariée. Le dispositif mis en place au laboratoire s'est donc progressivement étoffé de manière à disposer d'une configuration logicielle bien adaptée aux différentes étapes inhérentes au traitement de l'information géographique numérique : analyse d'images aériennes et satellitaire (logiciel Géoimage), analyse de données (logiciel SAS), géostatistique (logiciel Isatis) et illustration (logiciel Adobe Illustrator).

Les ressources humaines sont celles du laboratoire Géomer dont les compétences thématiques et méthodologiques sont variées. Les bases d'information géographique sont régulièrement mises à jour par le personnel titulaire et par les étudiants (DEA, thèses) qui utilisent le système dans différents applicatifs de recherche. Le cadre institutionnel de sa mise en œuvre est l'Institut Universitaire Européen de la Mer.

2.2. Bases d'information géographique

Aujourd'hui, quatre bases d'information géographique qui répondent à différents objectifs de recherche et de gestion, traitent entièrement ou partiellement de la mer d'Iroise.

Basiles est une base d'information géographique dont l'objectif est de favoriser les recherches sur le thème de l'insularité, tout en procurant aux gestionnaires des éléments de connaissance et de gestion des îles. Elle correspond à un inventaire géographique des îles et îlots français de l'Atlantique et de la Manche, réalisé au 25 000ème sur la base de l'information cartographique de l'IGN. L'entité spatiale de base est l'île ou l'îlot², décrit par 194 variables regroupées en 33 attributs, validées par photo-interprétation et enquête de terrain. En mettant en relation ces données, de multiples classifications sont réalisées, en prenant en compte l'occupation et les usages actuels de ces espaces (Brigand, 2000) (ill. 25).

Basîlots est consacrée exclusivement aux milieux terrestres des îlots marins classés en réserve. Elle inclut des couches d'information relatives à la végétation des îlots de la Réserve Naturelle d'Iroise (Banneg, Balaneg, Trielen) et de l'île de Béniguet (Réserve de Chasse et de Faune Sauvage). Elle concerne également les données relatives à la Réserve Naturelle des Sept-Îles (Manche) et celles collectées sur la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio (Corse du Sud). *Basîlots* a été mise en place en 1997 dans le cadre d'un projet soutenu par le Ministère de l'Environnement (ill. 26) qui émanait du constat réalisé par le groupe thématique « îlots marins et milieu sous-marin » de la Commission Scientifique de Réserves Naturelles de France quant à la dégradation du tapis végétal constatée sur l'ensemble du réseau. Dans ce contexte, un inventaire permettant d'évaluer la qualité phytocoenotique de la végétation terrestre a été réalisé sur un échantillonnage d'îlots représentatifs : archipels de Molène et des Sept-Iles (Bretagne), Iles Lavezzi et Cerbicale (Corse) (Bioret & Gourmelon, 2003). La base d'information géographique *Basîlots* contient donc les couvertures dérivant de ces inventaires, réalisés en 1990 (Réserve Naturelle d'Iroise et Réserve de Chasse et de Faune Sauvage), en 1995-1996 sur les trois ensembles géographiques et en 2002 (Réserve de Chasse de Béniguet, Réserves Naturelles des Bouches de Bonifacio et des Sept-Îles). L'information géographique de référence est fournie par les ortho-photographies de l'IGN dans le système de projection

² Les îles et îlots retenus dans cet inventaire sont végétalisés, et sont ou peuvent être habités. Ils sont isolés par la mer de façon permanente ou temporaire ; c'est le cas des îles d'estran qui sont accessibles à basse mer (Brigand, 2000).

Répartition géographique des îles et îlots selon la surface

Relations entre les attributs et la couche graphique des îles et îlots (expl. Belle-Île)

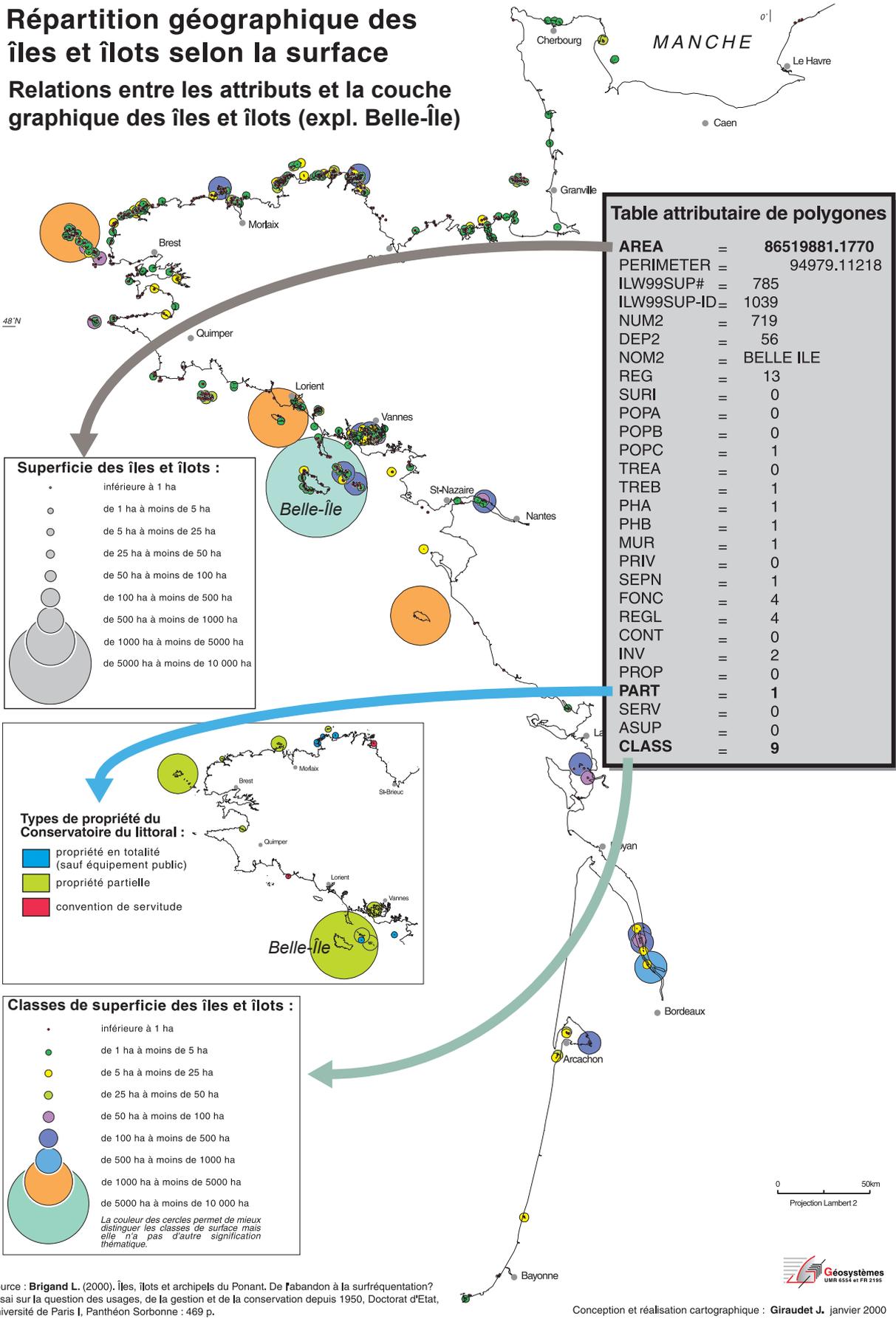


Illustration 25. Basiles : l'inventaire des îles et des îlots du littoral de la Manche et de l'Atlantique (d'après Brigand, 2000, modifié).

cartographique Lambert 2 (système géodésique NTF, ellipsoïde de Clarke 1880). Sur les îlots corses qui ne disposent pas de cette information de référence, l'intégration des données de terrain à la base d'information géographique repose sur un travail de photo-interprétation des missions aériennes de l'IGN ou sur la mise en forme de levés réalisés au GPS.

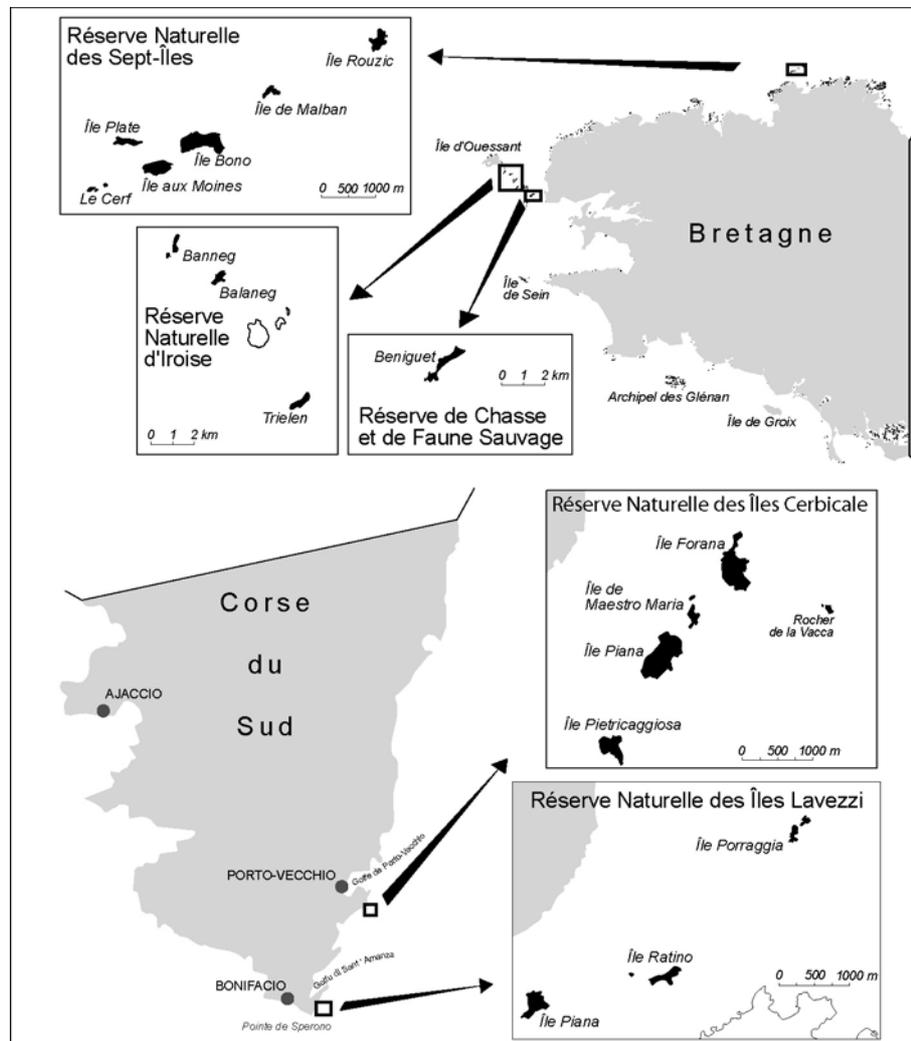


Illustration 26. *Basîlots* : une base d'information géographique consacrée au suivi à long terme des îlots marins protégés (d'après Gourmelon *et al.*, 2003, modifié).

Les deux bases d'information géographique suivantes sont exclusivement consacrées à la mer d'Iroise. *SIGOuessant*, mise en œuvre en 1990, concerne les milieux insulaires et intertidaux de la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise (Gourmelon *et al.*, 1995) alors qu'*Iroise* est développée sur l'ensemble du littoral finistérien (Le Berre, 1999).

SIGOuessant a été mise en place afin d'accompagner le suivi scientifique à long terme programmé sur la réserve de biosphère à partir de 1989. Puis elle s'est progressivement étoffée grâce aux programmes de recherche menés en partenariat avec les gestionnaires locaux (PNRA, ONCFS, Bretagne Vivante-SEPNB). Son objectif scientifique est de fournir des éléments de compréhension relatifs au fonctionnement et à l'évolution de ce micro-système insulaire par l'acquisition d'informations thématiques géoréférencées et l'analyse spatiale multi-critères. Si sa mission en termes d'aide à la gestion n'était pas clairement définie

au début du projet, il s'est avéré que les résultats obtenus pouvaient, dans certains cas, apporter des informations intéressantes directement les gestionnaires, ne serait-ce que par la production de documents cartographiques de qualité.

D'un point de vue conceptuel, cette base d'information géographique est multi-sources, multi-échelles et multi-dates (ill. 27). Elle concerne trois ensembles géographiques : l'île d'Ouessant, l'archipel de Molène et l'estran de l'ensemble de la zone. Chaque domaine est matérialisé dans le système par les couvertures nécessaires à l'étude de différents processus environnementaux. Par exemple, l'île d'Ouessant est décrite par une quinzaine de couches thématiques qui contiennent des objets surfaciques (pédologie, végétation, usage des sols...), linéaires (réseaux de communication) ou ponctuels (sites de nidification...). Par thème et par site, des séries temporelles sont traitées. Ainsi, en ce qui concerne la végétation ouessantine, trois couvertures décrivant ce thème en 1985, 1992 et 2002 sont disponibles. L'information géographique de référence utilisée est la BD Ortho de l'IGN, et les gammes scalaires sont comprises entre le 5 000ème (végétation des îlots marins) et le 25 000ème (voies de communication de l'île d'Ouessant).

	Sources des données	Couche thématique	Entité	Attributs	validité
O U E S S A N T	IGN	altitude	point	altitude	1983
	INRA	pédologie	Surface	nature du sol + type de substrat + épaisseur du sol + hydromorphisme	1985
	IGN photo ou BD Ortho UBO/CNRS	végétation	surface	formation végétale +physionomie +hauteur + série + stade dynamique + potentialité théorique + occupation des sols	1985 1992 2002
	IGN UBO/CNRS	utilisation des sols	Surface	type	1952
	Commune de Lampaul UBO/CNRS	parcellaire ancien	surface	type de parcelle + utilisation des sols	1844
	UBO/CNRS	mouton	Surface	type d'utilisation	1993
	Centre Ornithologique	crave à bec rouge	Surface/ point	Territoire d'alimentation/ site de nidification	1998,1999, 2000 2001
	IGN DDE Finistère	voies de communication	arc	classement + type + nature	1991
	IGN UBO/CNRS	bâti	point	village + type de bâti + occupant	1985
I L O T S	IGN	altitude	point	altitude	1983
	IGN photo ou BD Ortho UBO/CNRS	végétation	surface	unité + substrat + série + stade dynamique + espèce dominante + formation principale	Béniguet 1990, 1996, 2001 Banneg et Balaneg 1990, 1996 <i>autres</i> : 1990
	INRA	micromammifères	point	Espèce + nombre de capture	Béniguet 1999
	ONCFS SEPNB	goélands	surface	Densité + nombre + espèce	Béniguet 1988, 1992,1997, 2001 Banneg et Balaneg : 1990
	ONCFS	oiseaux nicheurs	point	Espèce	Béniguet : 1999
	SEPNB UBO/CNRS	patrimoine lithique	arc	Type de construction	RN Iroise 2001
E S T R A N	UBO/CNRS	Stratification biologique	surface	Substrat + mode hydrodynamique + taux de couverture algale + strate	1992
	ONCFS	oiseaux nicheurs	point	espèce + nids	Béniguet : 1999

Illustration 27. Le dictionnaire de l'information géographique contenue dans *SIGOuessant*.

En 1995, naissait le projet de synthèse de l'environnement littoral finistérien qui justifiait d'étendre géographiquement le SIG (Le Berre, 1999). Dans cette perspective, une nouvelle base d'information géographique (*Iroise*) est créée. Elle rassemble l'ensemble des données disponibles sur le littoral, notamment auprès des producteurs officiels (SHOM, IGN, Ifremer,

IFEN,...), de manière à disposer d'une plate-forme suffisamment complète pour mener diverses applications de recherche et d'aide à la décision (Le Berre *et al.*, 2000).

L'emprise spatiale de la base d'information géographique *Iroise* correspond à la zone côtière comprise entre les communes de Penmarc'h au Sud et de Plouescat au Nord (ill. 20). En mer, sa limite coïncide avec l'isobathe des 100 mètres et à terre elle inclut les communes littorales. La gamme scalaire s'étend du 10 000ème (estran) au 100 000ème (milieux marin et terrestre). Une trentaine de couches thématiques sont produites à partir des référentiels géographiques du SHOM et de l'IGN mis en cohérence géographique et disponibles dans le système de projection cartographique Lambert 2. Elles proviennent de l'intégration de données numériques (sondes bathymétriques du SHOM), de la numérisation de données analogiques existantes (cartes sédimentologiques des côtes de France) ou de données collectées sur le terrain (ouvrages côtiers). Globalement, trois champs thématiques (physique, naturel et socio-économique) sont couverts par l'information collectée sur les espaces terrestres, intertidaux et marins (ill. 28). L'information géographique est structurée au sein de la base selon une méthode hiérarchique en cinq niveaux inspirée des principes de la cartographie de synthèse de l'environnement (Journaux, 1985).

	Sources des données	Couche thématique	Entité	Attributs	validité
M A R I N	SHOM BDBS	Bathymétrie	Point	Profondeur + âge	1816-96
	UBO/CNRS SHOM IFREMER	Nature sédimentologique des fonds	Surface	Type de sédiment	1969-96
	SHOM <i>Atlas numérique</i>	Courants de marée	Grille	Vitesse + direction	1994
	UBO/CNRS	Faciès bio-sédimentaires	Surface	Substrat + faciès + Profondeur + Mode	1969-97
	Océanopolis	Mammifères marins	Surface	Nombre d'observations par type d'activité	1994-03
	SEPNB	Oiseaux marins	Point	Espèce + Type de site + Valeur patrimoniale	1998
	DDAM	Sites aquacoles	Surface	Localisation + Activité + Saisonnalité + Production + Valeur	1998
	DDE	Extractions de granulats marin	Surface	Type de granulats + Quotas	1998
	DDAM	Ports et mouillages	Point	Nombre + Type de mouillages	1996-98
SHOM BDSigma UBO/CNRS	Réglementation maritime	Surface	Zonages	2001	
E S T R A N	SHOM <i>BDSigma</i> <i>BDBS</i>	Zéro hydrographique	Arc	Zéro	1998
	SHOM TCFM	Trait de côte	Arc	Trait de côte	1998
	IFEN <i>CORINE Erosion</i> <i>Côtière</i> UBO/CNRS	Géomorphologie du linéaire côtier	Arc	Type + Dynamique	1998
	SHOM <i>BDPS</i> UBO/CNRS	Nature sédimentologique	Surface	Type	1998
	SHOM UBO/CNRS	Faciès bio-sédimentaires	Surface	Substrat + Niveau + Mode hydrodynamique	1976
	SHOM UBO/CNRS	Ouvrages côtiers	Arc	Caractéristiques des ouvrages + Vocation	1998
	DDAM	Cultures marines	Surface	Type de culture + Production + Valeur	1998
T E R R E S T R E	Agence de l'Eau Loire-Bretagne <i>BDCarthage</i>	Bassins versants	Surface	Bassins versants + sous-bassin	1992
	Agence de l'Eau Loire-Bretagne <i>BDCarthage</i>	Réseau hydrographique	Arc	Toponyme + Sens d'écoulement + Largeur + Navigabilité	1992
	DIREN	Inventaires ZNIEFF et ZICO	Surface	Type de zone + Inventaire des habitats + Inventaire des espèces	2000
	IFEN <i>CORINE Land Cover</i> <i>CETE Normandie</i> IPLI	Occupation des sols	Surface	Type d'occupation	1991
	INSEE	Démographie	Surface	Statut de la population	1998
	IGN <i>BDCarto</i> , <i>BDTopo</i>	Structure administrative	Surface	Communes + Canton + Département + Région	1992
	DDE <i>Plan d'assemblage</i>	POS	Surface	Type de zone	2002
	DIREN DDE UBO/CNRS	Protections environnementales	Surface	Type de protection	1998

Illustration 28. Le dictionnaire de l'information géographique contenue dans *Iroise* (d'après Le Berre & Gourmelon, 2000).

Cette base d'information géographique est utilisée dans différentes recherches visant par exemple à produire des documents adaptés à la lutte contre les pollutions par hydrocarbures (Le Berre *et al.*, 2003), ou pour la modélisation des activités humaines (Le Tixerant, 2003). Elle a également servi de support à l'étude de faisabilité d'un SIG adapté aux besoins du Parc National Marin d'Iroise en projet (Le Berre & Gourmelon, 2000).

Le système d'information géographique développé depuis plus de dix ans sur la mer d'Iroise, offre une plate-forme d'informations géospatiales suffisamment riche des points de vue thématique, temporel et scalaire, pour permettre diverses applications scientifiques en relation étroite avec des objectifs de gestion de l'environnement (ill. 29).

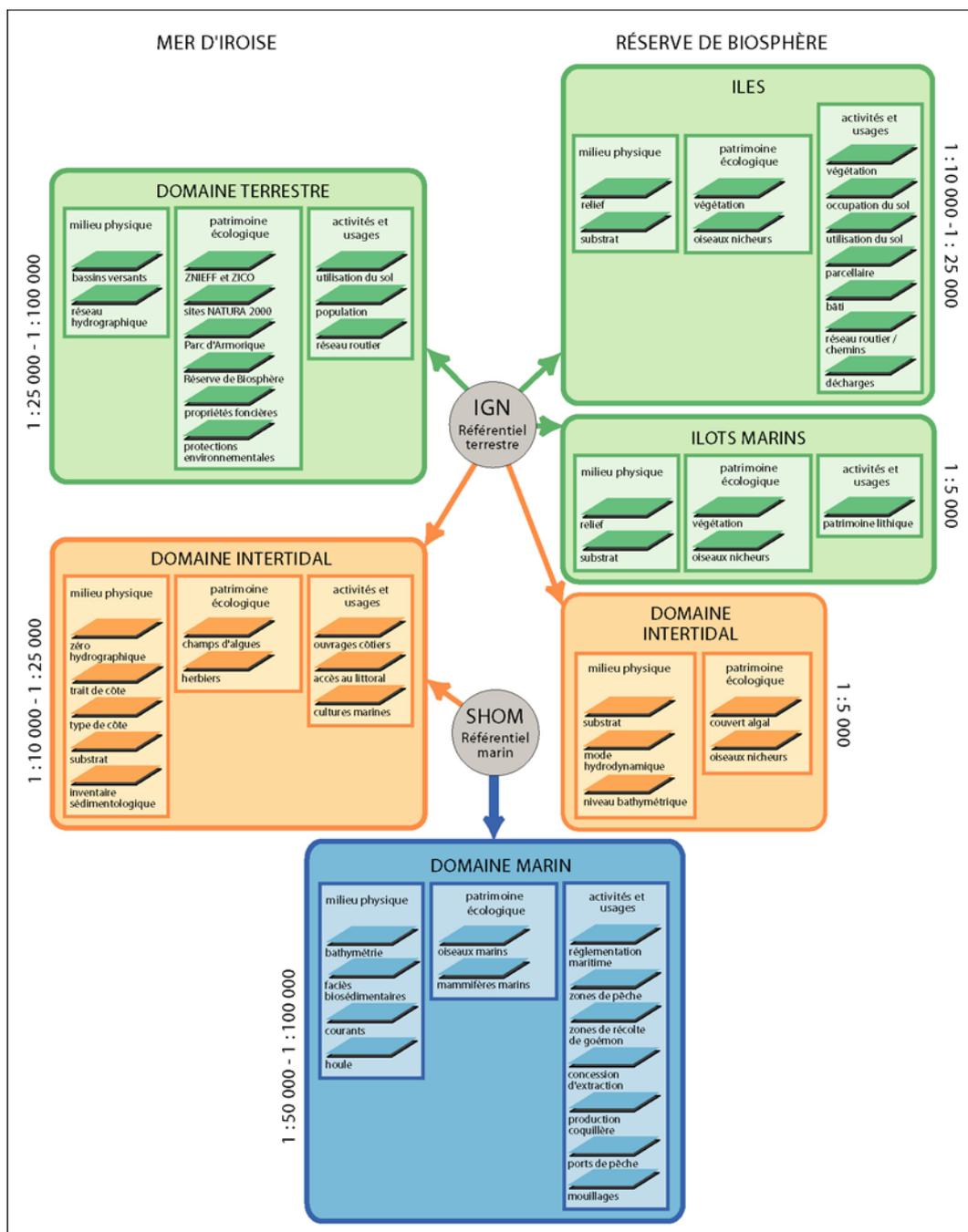


Illustration 29. L'organisation de l'information géographique dans le SIG consacré à la mer d'Iroise (d'après Gourmelon & Le Berre, 2001).

Afin d'illustrer les possibilités du système, trois applications menées selon une approche écosystémique sont présentées. Elles concernent les territoires insulaires et l'espace marin, abordés sur des problématiques visant globalement à améliorer la connaissance du fonctionnement et de l'évolution de la zone côtière et à produire des éléments synthétiques utiles à la prise de décision des gestionnaires. Ces trois applications concernent :

- les changements d'occupation et d'utilisation des sols de l'île d'Ouessant,
- les dynamiques à long terme de la végétation des îlots marins protégés,
- l'habitat potentiel du grand dauphin en mer d'Iroise.

3. ANALYSE DES CHANGEMENTS D'OCCUPATION ET D'UTILISATION DES SOLS DE L'ILE D'OUessant

3.1. Introduction

Les dynamiques qui façonnent un paysage reposent sur des interactions spatio-temporelles complexes entre divers paramètres physiques, biologiques et socio-économiques. Néanmoins, l'influence de l'homme sur les milieux est dans bien des cas déterminante (Foster, 1992). Sur le littoral, ce sont surtout les politiques d'aménagement en réponse à la croissance récente du tourisme qui provoquent des mutations spatiales et paysagères de grande ampleur souvent liées à une urbanisation effrénée (Pottier & Robin, 1997). De manière plus insidieuse, des changements paysagers et écologiques peuvent également être provoqués par le déclin des activités agricoles. Ce processus a entraîné, au cours du 20ème siècle dans de nombreuses régions, la prolifération des friches dont l'évolution conduit aujourd'hui à la fermeture des paysages (Brossard *et al.*, 1993 ; Simon & Tamru, 1998) et à une diminution de la diversité biologique (Baudry, 1991). Dans ce contexte, la limitation de la prolifération des broussailles peut s'envisager par des actions de gestion, à condition de connaître la genèse du paysage actuel et l'impact des interventions humaines sur le tapis végétal (Bakker, 1989). Les recherches menées sur ce thème et dont l'objectif est d'appréhender les interactions entre les activités humaines et l'environnement sont menées pour la plupart dans une perspective diachronique sur un laps de temps plus ou moins long (siècle ou demi-siècle) et à partir de données spatiales fournies notamment par l'interprétation de photographies aériennes (Hester *et al.*, 1996).

La problématique du temps et de ses conséquences spatiales sur les structures paysagères sont au cœur des problématiques étudiées en écologie du paysage (Forman & Godron, 1986 ; Forman, 1995 ; Naveh & Lieberman, 1984). Avec le développement des méthodes géomatiques, et principalement des systèmes d'information géographique, l'analyse spatiale des changements environnementaux a connu de nouveaux développements dans les années 1990 (Cheylan *et al.*, 1994 ; Haines-Young *et al.*, 1993 ; Langran, 1992). Différentes approches concernant des études diachroniques de l'occupation des sols ont été menées à des échelles régionales (Dunn *et al.*, 1991). Elles reposent sur l'élaboration de matrices de transition (Turner, 1987) et sur le calcul de divers indices statistiques tels que la diversité, l'hétérogénéité et la fragmentation (Burel & Baudry, 1999 ; Mendonça-Santos & Claramunt, 2001).

Aujourd'hui, le paysage de l'île d'Ouessant est profondément marqué par l'abandon de l'activité agricole, ce qui se traduit par la prolifération des friches. De manière à analyser les mutations territoriales qui ont façonné le paysage actuel, une série de données décrivant l'occupation des sols de 1844 à 2002 a été acquise et analysée, de même que les changements d'utilisation des sols ont été étudiés entre 1844 et 1992. L'objectif de cette analyse est également de mesurer le rôle du pâturage ovin dans l'entretien des milieux de manière à l'envisager comme un moyen de gestion.

3.2. Présentation du site

L'île d'Ouessant (1550 hectares) est la plus grande île habitée de la mer d'Iroise (ill. 30). Située à 11 milles du continent, elle se présente comme un plan incliné du Nord-Est au Sud-Ouest, cerné de falaises qui culminent à 60 mètres au Nord-Est. Ce plateau, d'origine granitique, est entaillé dans sa partie médiane micaschisteuse par deux vallées en auge qui débouchent à l'Ouest dans une large baie. Le climat, typiquement hyperocéanique, se caractérise par des amplitudes thermiques les plus faibles de France (inférieures à 10°C) et des précipitations relativement faibles, jusqu'à deux fois inférieures à celles qui arrosent le continent, ainsi que par des tempêtes fréquentes (Bioret, 1989).

Les différents types de végétation sont conditionnés par la nature des sols, l'exposition aux vents et aux embruns et par les pratiques humaines anciennes (ill. 31). Landes et pelouses littorales croissent sur les sols les plus pauvres de la frange littorale. Sur les sols bruns plus profonds de l'intérieur de l'île, la prairie mésophile et les broussailles colonisent les anciennes cultures. Sur les sols hydromorphes des deux vallons principaux et des dépressions qui entaillent le plateau perpendiculairement à la mer, se développe une végétation de prairies hygrophiles localement colonisées par des phragmitaies et des saulaies (Bioret, 1989 ; Bioret *et al.*, 1994).

Entièrement exploitée par l'homme jusqu'au début du 20^{ème} siècle, l'île d'Ouessant a subi, à partir de 1911, une chute démographique très importante, de 2661 habitants en 1911 à 1065 habitants en 1990, qui s'est accompagnée d'une déprise agricole conduisant à la disparition totale des terres cultivées (Brigand *et al.*, 1990, 1992 ; Péron, 1997). Seule une activité traditionnelle d'élevage ovin se maintient encore sous une forme extensive et selon le système de la vaine pâture. Un cheptel composé d'environ un millier de têtes, contre 5903 en 1857 (Gestin *et al.*, 1982) est en vaine pâture de septembre à février puis parqué à proximité des villages le reste de l'année (Brigand & Bioret, 1994). Dans ce contexte de sous-pâturage, l'enfrichement qui correspond à un processus de succession secondaire (Falinski, 1998) s'exprimant par la colonisation de tous les milieux par des formations de ronciers, de ptéridaies, de fourrés ou de landes, est un problème environnemental et sa gestion un enjeu important de la préservation de la diversité biologique et de la qualité paysagère (Brigand *et al.*, 1992). Aujourd'hui, l'économie provient, en grande partie, des activités de service liées notamment au tourisme, en pleine croissance depuis les années 1980 avec un flux annuel de l'ordre de 200 000 visiteurs. Cette fréquentation essentiellement saisonnière combinée à l'embroussaillage de l'intérieur de l'île canalise les flux de touristes sur la frange côtière, entraînant des perturbations diverses telles que le dérangement de certains oiseaux nicheurs et la dégradation de la végétation littorale.

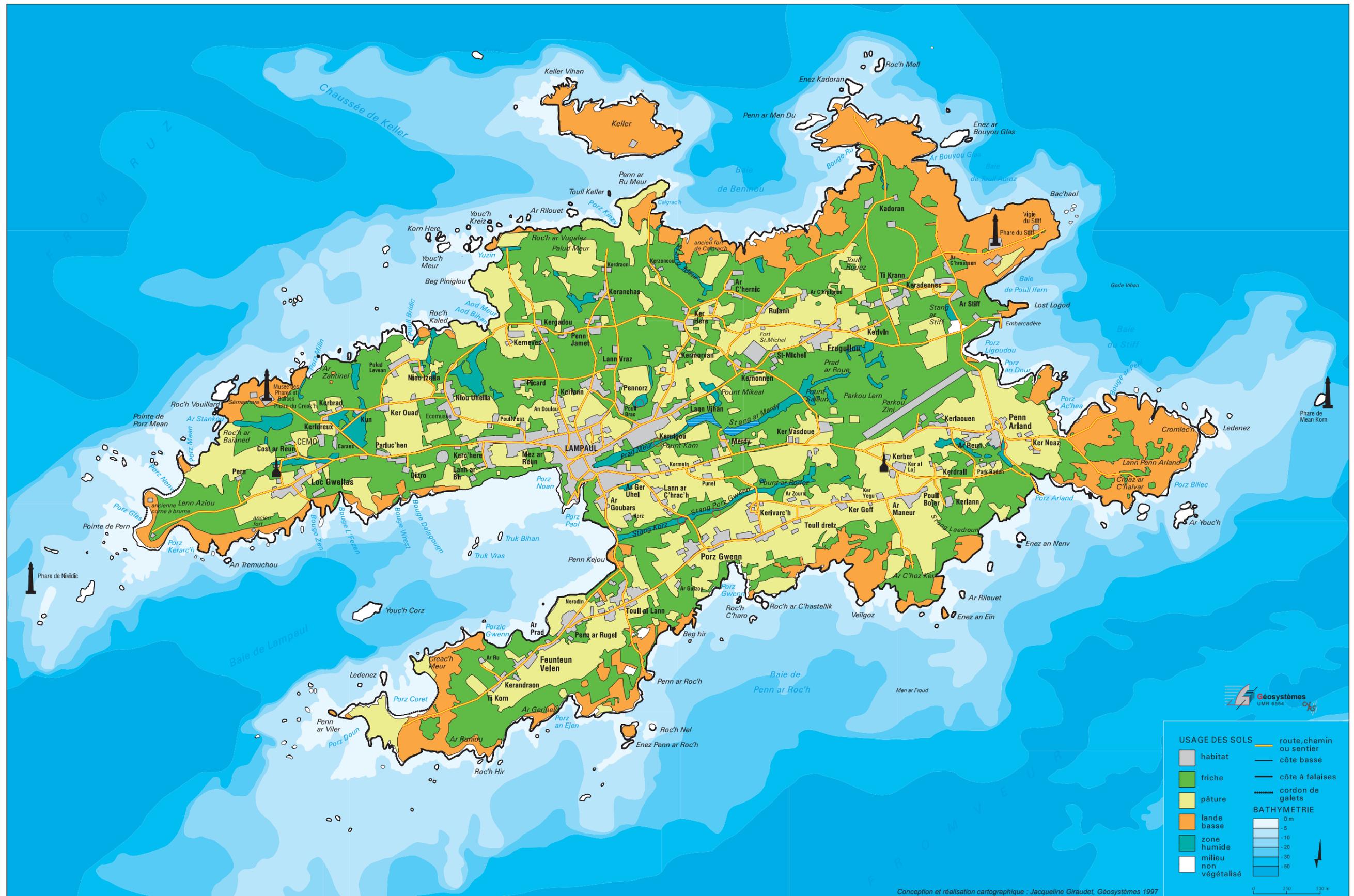


Illustration 30. L'île d'Ouessant (d'après Giraudet & Gourmelon, 1997, modifié).



F. Bioret

Bâti



F. Bioret

Broussailles



F. Bioret

Lande littorale



F. Bioret

Enclos à Ajonc d'Europe



F. Bioret

Prairie fauchée



F. Bioret

Zone humide

Illustration 31. Les principaux types de milieux ouessantins

3.3. Analyse des changements d'utilisation des sols de 1844 à 1992

3.3.1. Données et méthodes

L'étude diachronique menée repose sur l'acquisition et l'analyse d'une série temporelle de données acquises directement ou indirectement sur le thème de l'utilisation des sols (Gourmelon *et al.*, 1995 ; Couix & Le Berre, 1996). Deux types de documents constituent le matériel d'étude (ill. 32).

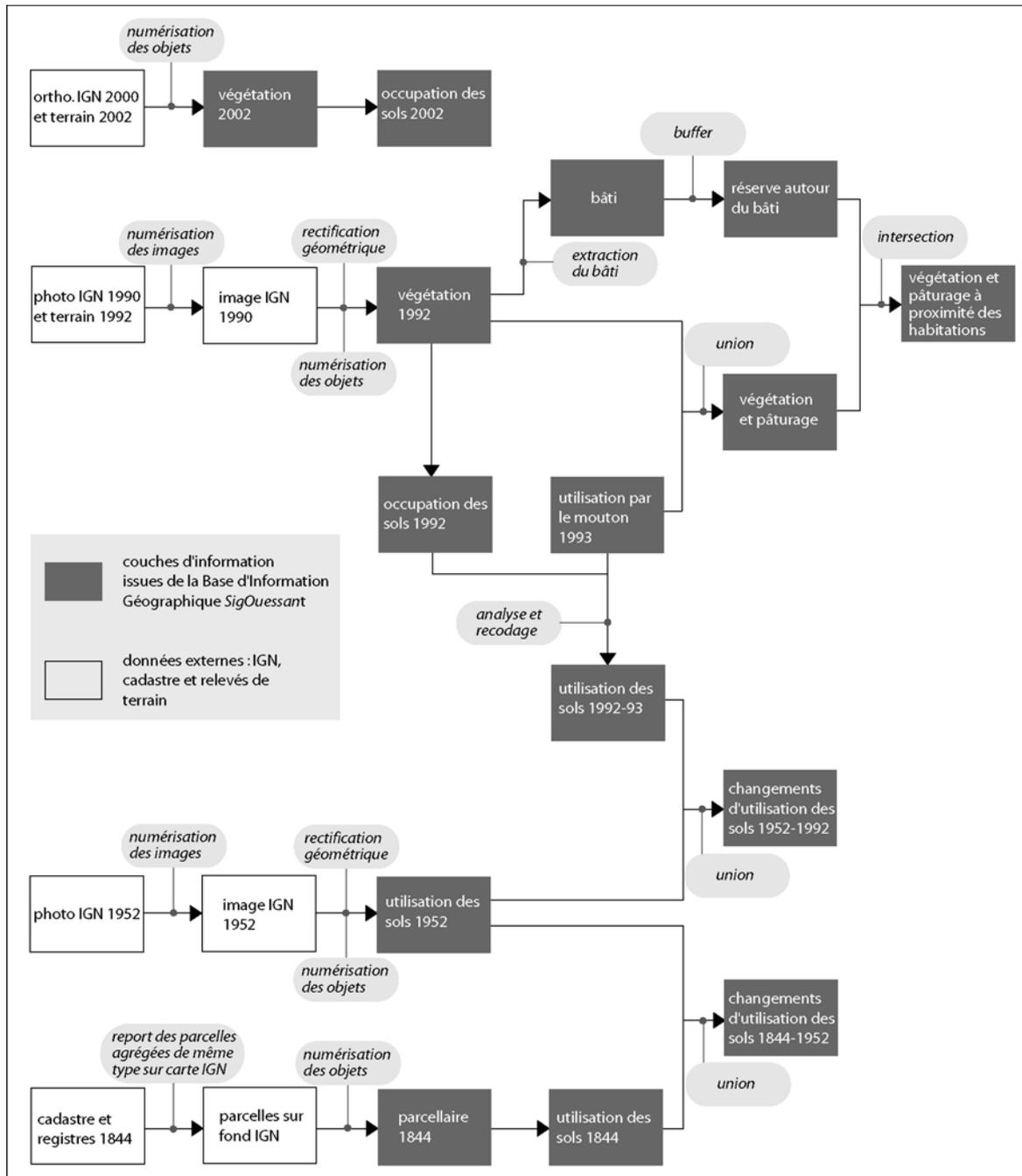


Illustration 32. Données et méthodes de production de couches thématiques sur les thèmes de l'occupation et de l'utilisation des sols de l'île d'Ouessant.

Pour 1844, le cadastre napoléonien permet de représenter les types d'utilisation des sols en tenant compte de la forme, de la localisation et de la toponymie des parcelles (Couix & Le Berre, 1996).

Pour 1952 (encart 8) et 1992, la source des données est fournie par les photographies aériennes de l'IGN, respectivement en noir et blanc et en couleur naturelle³. Elles servent de base à un travail de photo-interprétation et de terrain réalisé en 1992 (Gourmelon *et al.*, 1995). En 1992, l'inventaire de la végétation est réalisé selon une typologie fondée sur une vingtaine de classes (ill. 33). Le regroupement pertinent de ces unités sur la base de types d'occupation des sols est réalisé, puis par combinaison avec une couverture acquise en 1993 sur le thème du pâturage ovin, une couverture d'analyse décrivant l'utilisation des sols en 1992 est produite selon les règles de décision suivantes. Prairies humides, roselières et saulaie sont regroupées dans la classe « zone humide ». Les classes « bâti » et « cultures » sont maintenues. Les formations littorales et les prairies mésophiles, quand elles sont pâturées sont attribuées à une nouvelle classe « pâture ». Les formations littorales impâturables sont attribuées aux « landes basses » alors que la prairie mésophile pâturable ou impâturable est affectée à une classe « friche » qui regroupe également les broussailles et les fourrés.

Série de végétation	Unités de végétation	Classe cartographique	L'enfrichement	Types d'occupation des sols
MESOPHILE	Prairie mésophile	3	Végétation secondaire non enfrichée	Prairie mésophile
	Faciès de superposition	4	Embroussaillage	Broussailles
	Groupement de substitution	5		
	Enclos à ajonc d'Europe peu enfriché	7		
	Enclos à ajonc d'Europe moyennement enfriché	8		
	Enclos à ajonc d'Europe très enfriché	9	Stade terminal	Fourré à prunellier
	Fourré à prunellier	6		
HYGROPHILE	Roselière	14	Végétation secondaire non embroussaillée	Roselière
	Molinaie	15	Embroussaillage	
	Mégaphorbiaie	11		
	Petite roselière à <i>Cyperus longus</i>	16		
	Prairie mésohygrophile	10	Végétation secondaire non embroussaillée	
	Végétation amphibie	12		
	Jonçaie	13	Stade terminal	Saulaie
	Saulaie	17		
LITTORALE	Pelouse littorale	1	Végétation naturelle peu perturbée	Pelouse et lande littorale
	Lande littorale	2		
ACTIVITE ANTHROPIQUE	Culture	18	Occupation humaine	Culture Bâti, remblai, eau libre
	Bâti, remblai, eau libre	19		

Illustration 33. Typologie utilisée pour la description des milieux semi-naturels de l'île d'Ouessant (d'après Bioret *et al.*, 1994, modifié).

³ 1952 : mission F0317-0817, noir et blanc, 1 : 25 000
1990 : mission FR8298C, couleur, 1 : 25 000

ENCART 8. La photo-interprétation des clichés aériens de 1952.

Du fait de la qualité médiocre des photographies aériennes de 1952, un certain nombre de problèmes d'identification sont apparus en cours de traitement. Ainsi en zone littorale, la distinction *lande basse impâturée – prairie pâturée*, est difficile à établir. Ce problème est indirectement résolu par la présence ou l'absence de petites constructions de pierre, appelées à Ouessant "gwaskedou", de diamètre d'un mètre environ, destinées à abriter les moutons des vents violents. Cet élément singulier se détache particulièrement bien sur la végétation littorale rase. Il atteste de la présence du mouton. La distinction *culture – prairie pâturée*, plus délicate, est fondée sur l'état du parcellaire d'exploitation. Lorsque la photographie témoigne d'une alternance de lanières claires et foncées, l'identification des terres labourées s'impose. La prairie s'en distingue par la perte de cette texture malgré le maintien des sillons; ce qui se traduit sur les documents photographiques par des zones de teinte uniforme, découpées par de multiples structures linéaires. Les *broussailles* sont caractérisées sur les clichés par quelques entités sans texture particulière tout comme les *zones humides* des vallons de l'île. Les *enclos à lande haute (ajonc d'Europe)*, entretenus en 1952, sont parfaitement identifiables du fait de leur forme rectangulaire liée aux murs de pierres sèches qui les délimitent. Le *bâti* (au sens de la parcelle bâtie et non de l'unité d'habitation) est également repérable sur les clichés.

Donc, la typologie commune aux trois dates est fondée sur sept classes : les landes basses, les friches, les pâtures, les cultures, les cultures encloses d'Ajonc d'Europe, les zones humides et le bâti. Au sein de la base d'information géographique *SIGOuessant*, ces trois états sont stockés sous forme de couvertures vectorielles, géoréférencées dans le système de projection cartographique Lambert 2. C'est une procédure de fusion géométrique (*polygon overlay*) qui permet de mettre en évidence les changements intervenus dans l'utilisation des sols (Gourmelon *et al.*, 2001). La combinaison de ces plans d'information acquis à partir de sources différentes et de qualité géométrique variée a révélé des décalages importants entre des objets homologues aux trois dates. Il a donc été nécessaire avant d'opérer la fusion et pour produire des informations interprétables en termes de dynamiques de rectifier géométriquement les couvertures anciennes sur la base de la plus récente. Cette opération a nécessité la prise en compte d'une multitude de points de contrôle et le calcul d'un modèle de déformation. Néanmoins, du fait de la persistance de déformations locales, les résultats de l'analyse spatiale sont à considérer comme des tendances et non comme des mesures exactes.

3.3.2. Résultats

Aux trois dates, l'utilisation des sols est la suivante (ill. 34).

En 1844, l'île est entièrement exploitée. Plus de la moitié de sa surface est vouée aux cultures et 20% aux pâtures qui sont essentiellement localisées sur le pourtour littoral également caractérisé au Sud-Est par la lande basse. Les zones humides occupent les fonds de vallons sur environ 10% de la surface de l'île.

Si la déprise agricole ne se traduit pas encore dans le paysage de 1952 par l'apparition des broussailles, en revanche ses conséquences se lisent déjà dans l'émiettement des terrains cultivés, bien visible sur les photographies aériennes au profit des zones de landes basses et de la prairie. Environ un tiers des terres est encore labouré. Les enclos à Ajonc d'Europe ne sont pas encore embroussaillés et les landes basses qui ne sont apparemment plus concernées par le pâturage ovin couvrent 10 % de la surface insulaire.

En 1992, la physionomie paysagère de l'île semble profondément modifiée. Toute forme de culture a disparu, les landes basses s'étendent sur presque toute la frange littorale et les friches colonisent plus de 40 % de la surface de l'île. Seuls, le bâti et les milieux pâturés se maintiennent en 1992 dans des proportions équivalentes à celles de 1952.

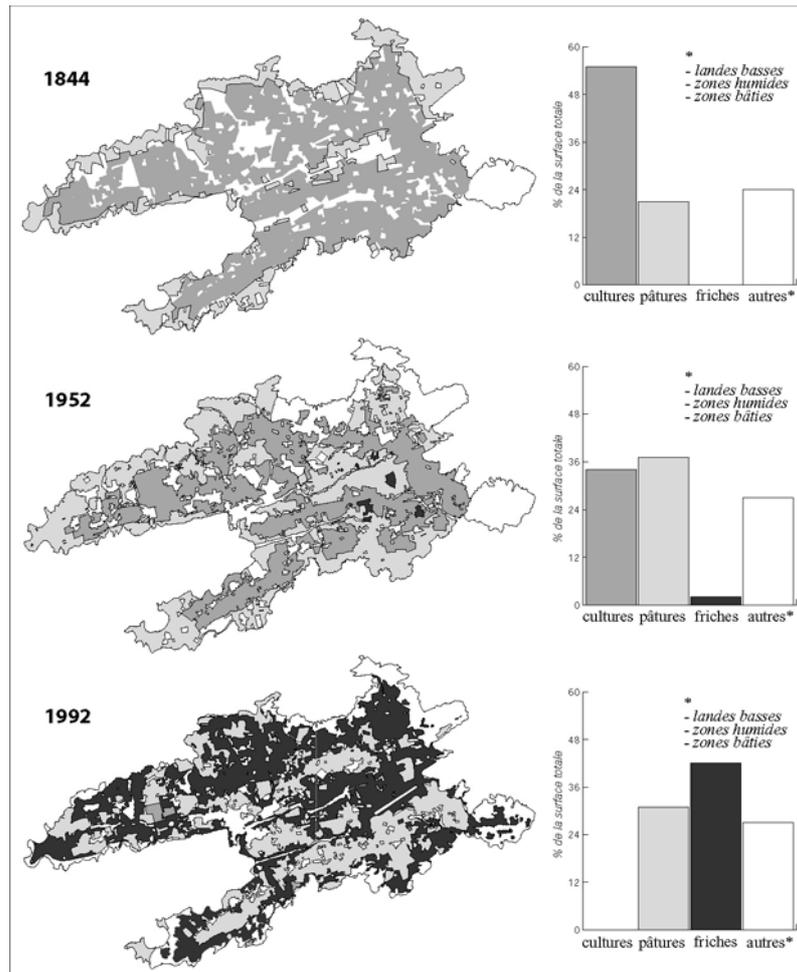


Illustration 34. Les principales tendances dynamiques de l'utilisation des sols de 1844 à nos jours (d'après Gourmelon *et al.*, 2001).

L'analyse combinée des différents plans met en évidence les modalités d'évolution des paysages ouessantins et révèle l'intensité des changements intervenus sur les milieux surtout entre 1952 et 1992 (Gourmelon *et al.*, 1995). Du point de vue spatial, le bâti, les zones humides et les landes basses littorales sont relativement stables, à l'inverse des cultures qui disparaissent, des friches et leur corollaire, les broussailles, qui apparaissent à partir de 1952 et des terrains pâturés. Ceux-ci constituent un cas particulier, puisque les surfaces concernées, si elles croissent significativement de 1844 à 1952 (21% à 37%), stagnent ensuite (31% en 1992). Cette stabilité n'est qu'apparente car l'analyse révèle le fait que les pâtures actuelles ne sont héritées qu'à 31% des pâtures anciennes (1952), 63% de cette classe provenant d'un gain sur les terrains encore cultivés en 1952 et abandonnés depuis. Ce changement d'affectation s'accompagne d'une "migration" des pâtures de la frange littorale vers l'intérieur de l'île (ill. 35). En 1952, le littoral est pâturé sur un peu plus de 27 km (sur les 50 que compte l'île), alors qu'en 1992 le linéaire côtier pâturé n'est plus que d'environ 6 km. De ce fait, la végétation littorale n'est plus entretenue par le cheptel ovin et tend à évoluer vers un stade de landes hautes à ajonc de Le Gall. La progression des *friches* est tout autre. Si elles ne marquent pas significativement les paysages du milieu de notre siècle, il n'en est pas de même de nos jours. Leur consommation d'espace est remarquable car en moins de quarante années, elles ont colonisé près de 42% du territoire insulaire. Cette croissance s'opère prioritairement au détriment des prairies de 1952 (49%) et des anciennes cultures (29%). Ces dernières qui

diminuent d'environ 20 % en un siècle (1844-1952), disparaissent totalement ensuite, même si deux grandes parcelles, héritées d'une relance agricole tentée en 1975, sont encore utilisées en 1992.

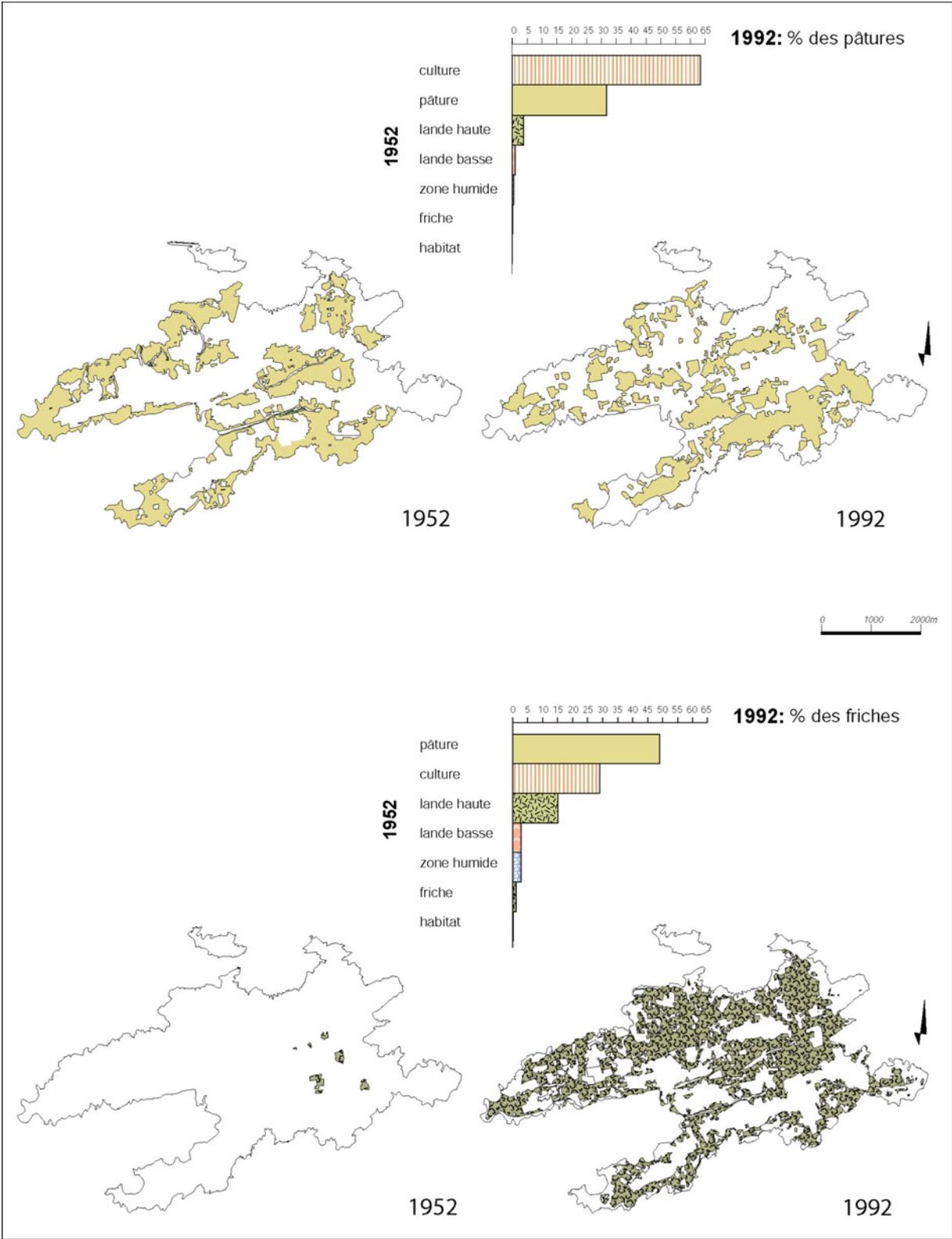


Illustration 35. Entre 1952 et 1992 : des changements territoriaux de grande ampleur (d'après Gourmelon *et al.*, 1995).

3.4. Le pâturage ovin au début des années 1990

3.4.1. Données et méthodes

De manière à préciser la répartition spatiale des secteurs pâturés et l'impact du pâturage ovin sur le processus d'embroussaillage, une analyse est réalisée pour la période 1992-1993. Elle repose sur l'analyse combinée de trois plans d'information concernant le bâti (1992), la végétation (1992) et l'utilisation des milieux par le cheptel ovin (1993) (ill. 32 et 36).

Le bâti est repéré sur les photographies aériennes et sur la carte topographique de l'IGN. La végétation est décrite par un travail de photo-interprétation validé sur le terrain sur la base d'une typologie en 20 classes rattachées aux séries mésophile, hygrophile et littorale (ill. 33). En ce qui concerne l'utilisation du milieu par le cheptel ovin, l'observation est réalisée sur le terrain pendant l'été 1993, quand les moutons sont maintenus à l'attache. A partir de prospections systématiques, trois classes sont identifiées et reportées sur les photographies aériennes agrandies au 10 000ème : les zones pâturées, pâturables et impâturables. Les zones pâturées sont caractérisées par la présence effective des moutons ou par des indices de leur présence récente tels que des excréments, des herbes couchées ou piétinées. Dans les zones pâturables qui présentent la même physionomie que les précédentes, aucune trace de la présence récente des animaux n'est visible. Enfin les zones impâturables sont caractérisées par l'absence de moutons ou d'indices attestant d'une présence récente conjuguée à des types de végétation différents.

Par une procédure de combinaison (« *union* ») entre les plans d'information décrivant la végétation et l'utilisation par le mouton, les unités de végétation des zones pâturées, pâturables et impâturables sont mises en évidence. Quant à l'analyse de la localisation des pâtures, elle est réalisée par la génération de zones tampons (de 100 mètres) appliquées aux objets de la couverture décrivant les unités d'habitations. Le pâturage et la végétation associée sont ensuite combinés aux zones tampons par une fonction d'algèbre de cartes (« *intersect* »).

3.4.2. Résultats

En 1992-1993, 28 % de l'espace insulaire sont effectivement pâturés, 17 % sont considérés comme pâturables alors que 55 % du territoire sont impâturables.

En ce qui concerne les types de végétation associés à ces trois situations, diverses tendances sont mises en évidence par la combinaison des deux plans d'information. Les secteurs pâturés sont des prairies mésophiles (72%), des faciès de superposition à fougère aigle (7%), des groupements de substitution à fougère aigle et à roncier (7%) et des pelouses littorales (4%). Dans les secteurs pâturables, les prairies mésophiles s'étendent sur 50% des superficies, les pelouses littorales sur 13%, les faciès de superposition et les groupements de substitution respectivement sur 10% et 7%.

Les autres unités de végétation sont présentes sur les trois secteurs dans des proportions peu significatives, toujours inférieures à 2%.

La végétation pâturée pendant la période d'observation appartient donc à quatre types principaux : prairies mésophiles, pelouses littorales, faciès de superposition à fougère aigle, groupements de substitution à fougère aigle et à roncier. Ces unités sont concernées diversement par le pâturage. 55% des prairies mésophiles, qui occupent globalement 580 ha, sont pâturés, 22 % sont impâturables, et 23 % sont pâturables.

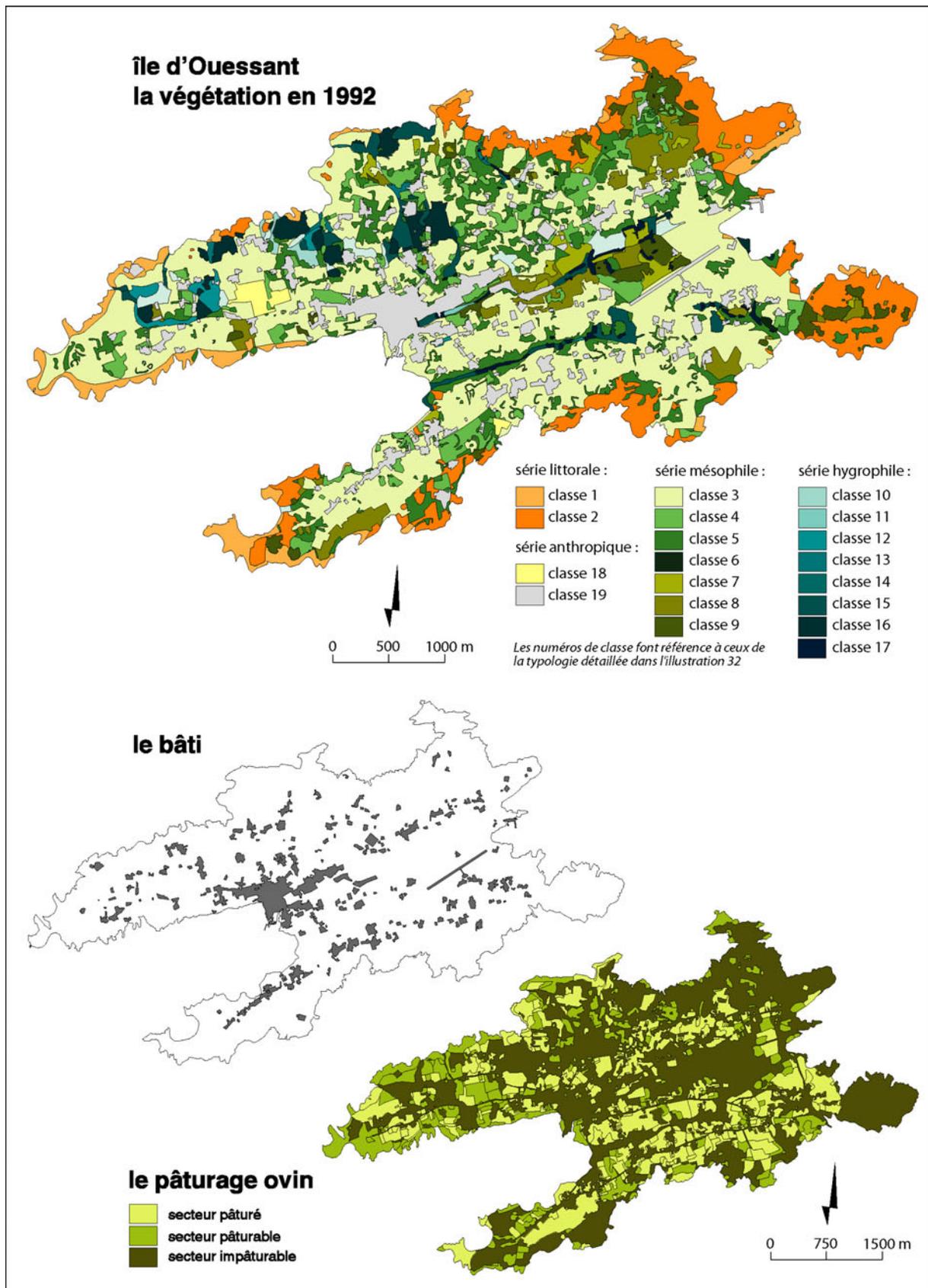


Illustration 36. Les thèmes utilisés pour l'étude du pâturage ovin en 1992-1993 : la végétation, le bâti, les pâtures.

Les groupements de substitution, nettement moins bien représentés sur l'île (175 ha), sont essentiellement impâturables (73 %), alors que les faciès de superposition (100 ha) sont impâturables à 42 %, pâturables à 32 % et pâturés à 26 %.

Enfin, la moitié des milieux occupés par la pelouse littorale qui s'étend sur un peu plus de 70 ha est pâturable, le reste étant impâturable et pâturé dans des proportions équivalentes.

L'examen de la carte du pâturage ovin révèle que les pâtures s'organisent de façon linéaire, selon trois axes nord, médian et sud qui correspondent aux voies de communication principales et à la localisation des villages. Cette analyse visuelle est confortée par l'analyse spatiale qui révèle que 62 % des milieux pâturés et 42 % des secteurs pâturables se situent effectivement à moins de 100 mètres autour des parcelles bâties. Les prairies mésophiles où s'exerce la plus forte pression de pâturage confirment cette tendance puisque 65% d'entre elles y sont localisées.

3.5. Hypothèses d'entretien des milieux semi-naturels par le pastoralisme

L'ensemble des résultats acquis permet de discuter du rôle de l'élevage ovin traditionnel sur la dynamique de l'occupation des sols de l'île d'Ouessant. Les milieux pâturés dans les années 1990 sont essentiellement localisés dans la partie centrale de l'île alors que le littoral n'est plus concerné par cette activité que de septembre à février, lors de la période de vaine pâture. En conséquence, ces zones risquent d'évoluer rapidement vers des stades d'enfrichement plus prononcés puisque les moutons ne les parcourent que de manière extensive pendant quelques mois de l'année. Par contre, pendant la belle saison, les parcelles situées à proximité immédiate des habitations sont entretenues par la fauche souvent associée au pâturage ovin qui permet le maintien d'un stade herbacé ras.

L'évaluation du cheptel réalisée en juillet 1993 faisait état d'environ 1000 bêtes. Compte tenu de cette information et des statistiques générales relatives à l'emprise spatiale des différents types de milieux, il s'avère que la pression de pâturage sur les secteurs concernés par l'activité (secteurs pâturés et pâturables) est de l'ordre de 2.25 moutons par hectare, alors qu'à l'échelle de l'île, elle est de moins d'un mouton par hectare. Or, pour éviter l'embroussaillage d'un milieu pâturé, le seuil de 2 à 3 brebis avec leur progéniture par hectare est généralement admis (Hester & Baillie, 1998). Dans ce contexte de sous-pâturage, on peut s'interroger sur l'efficacité du pâturage actuel à limiter la progression des broussailles et des fourrés qui représentent les stades les plus aboutis de la dynamique d'enfrichement (Bioret *et al.*, 1994). En effet, le pâturage actuel ne permet que le maintien des zones pâturées alors que les espaces encore pâturables en 1992 sont déjà dans une dynamique d'enfrichement forte caractérisée par des faciès de superposition et des groupements de substitution.

Pour apporter des éléments de réflexion et dans une perspective de gestion des milieux semi-naturels par le pastoralisme, des scénarios d'évolution sont proposés en fonction de la situation observée en 1992, du développement hypothétique du cheptel, du seuil d'entretien admis et de la distance calculée autour des unités d'habitation (ill. 37).

La stabilité numérique du cheptel, soit *1000 moutons*, si elle perdurait, pourrait théoriquement conduire au maintien de la totalité de la prairie mésophile actuellement pâturée (450 ha). En revanche, les secteurs encore accessibles mais qui ne sont plus concernés par l'activité pastorale évolueraient vers des stades de broussailles. Dans cette hypothèse, ces formations coloniseraient 43 % des milieux ouessantins.

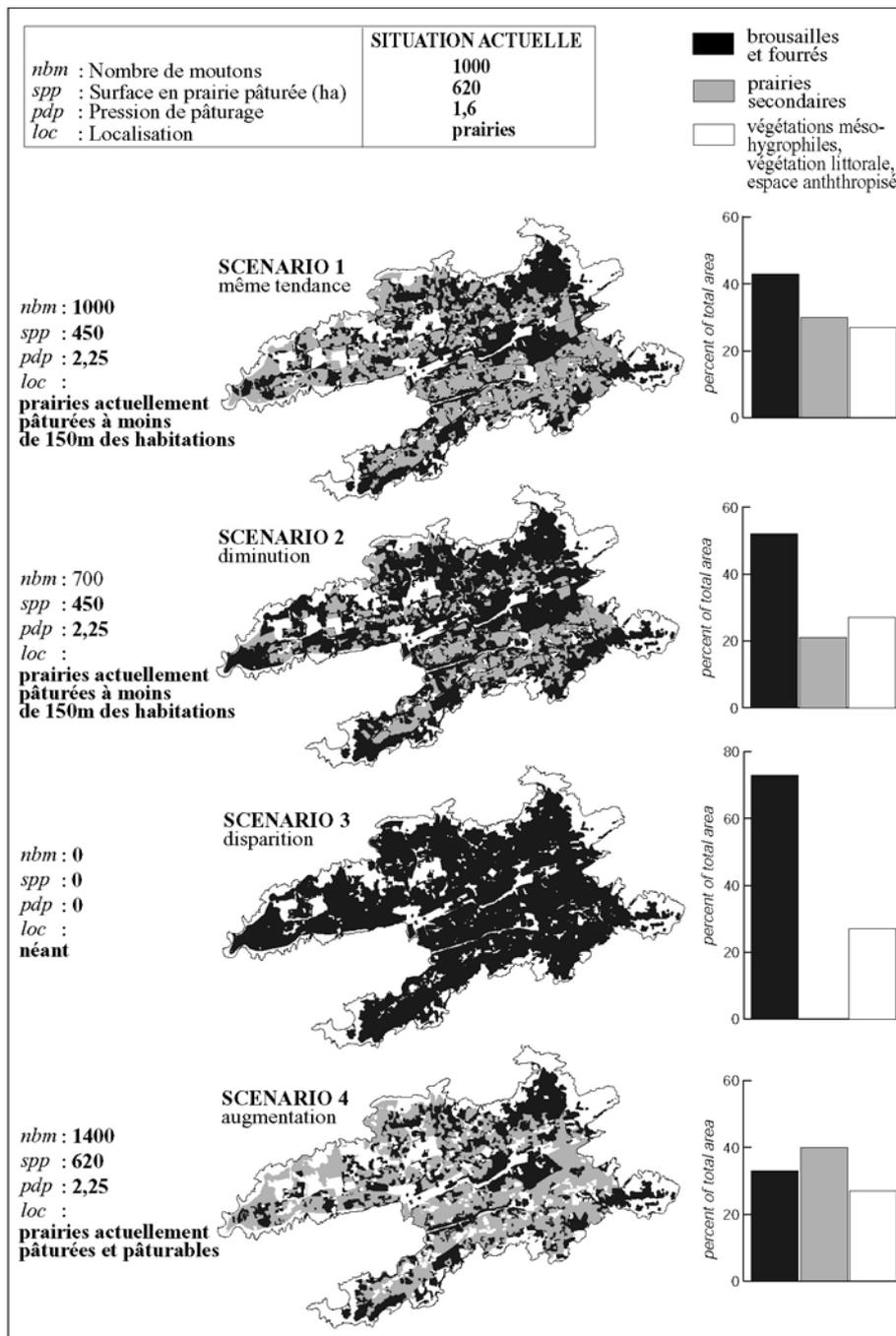


Illustration 37. Les scénarios d'évolution des milieux semi-naturels en relation avec le développement hypothétique du cheptel ovin (d'après Gourmelon *et al.*, 2001).

Si le cheptel déclinait, les deux situations suivantes pourraient survenir. 700 moutons ne permettraient l'entretien que d'environ 300 hectares, qui correspondent approximativement aux prairies mésophiles actuellement pâturées à proximité des habitations. Le reste des milieux pourrait alors évoluer vers des formations de landes littorales, de fourrés à prunelliers (52 % de l'espace) ou de saulaie hygrophile. Avec la disparition de l'activité agro-pastorale, la dynamique des paysages peut s'exprimer selon les potentialités théoriques de la végétation. En affectant chaque formation végétale observée en 1992 au stade dynamique terminal de la

série à laquelle elle appartient, on obtient une végétation potentielle (Pedrotti, 1998) limitée à trois formations principales : lande littorale périphérique, fourré à prunelliers (73 % de l'espace) et saulaie dans les zones humides. En raison de la situation d'insularité, la dynamique actuelle de la végétation tend à être bloquée au stade du fourré à prunellier (Bioret *et al.*, 1990). En effet, l'absence de semenciers et celle d'oiseaux vecteurs de glands (pies et geais) bloque le processus d'installation naturelle de la chênaie potentielle observée sur le continent (Bossema, 1979).

L'impact sur les milieux d'une pression de pâturage plus élevée pourrait se traduire de la façon suivante. 1400 moutons permettraient théoriquement de maintenir en l'état les secteurs pâturés et pâturables en 1992-1993. Au sein des 274 ha pâturables, l'entretien des prairies mésophiles nécessiterait environ 300 moutons supplémentaires. Pour leur restauration, l'action prioritaire à mener concernerait les faciès de superposition à fougère aigle et les groupements de substitution à fougère aigle et ronces qui appartiennent à un stade dynamique plus avancé et marquent le début de la colonisation par les broussailles et les fourrés. Ces deux stades occupant en 1992-1993 moins de 50 ha, une centaine de moutons supplémentaire suffirait à bloquer le processus de fermeture. Dans cette hypothèse, l'embroussaillage des milieux se limiterait à environ 30% de la superficie de l'île.

3.6. Dynamiques actuelles d'embroussaillage

3.6.1. Données et méthodes

En 2002, un nouvel inventaire de la végétation est réalisé sur le terrain et mis en forme dans la base d'information géographique *SIGOuessant*. Les données validées sont fondées sur l'interprétation d'une mosaïque composée d'une trentaine d'images extraites de la BD Ortho (IGN) élaborée à partir de la mission aérienne départementale de l'été 2000. Ne disposant pas de données actualisées relatives aux activités humaines, l'analyse diachronique s'est donc limitée à la comparaison de l'occupation des sols en 1992 et en 2002. En regroupant les unités de végétation observées aux deux dates selon le même schéma, deux nouvelles couvertures sont produites (ill. 32 et 33). Elles décrivent l'occupation des sols en neuf classes : pelouse et lande littorale, prairie mésophile (pâturée ou pâturable), broussailles (y compris les anciens enclos à Ajonc d'Europe et les prairies très enfrichées), fourrés à prunelliers, prairie humide, roselière, saulaie, cultures, et un ensemble regroupant le bâti, les remblais et l'eau libre.

Le calcul d'indices synthétiques est réalisé à partir de ces types d'occupation des sols, de manière à caractériser l'organisation du milieu aux deux dates, sur l'ensemble de l'île (Mendonça-Santos & Claramunt, 2001). Les indices calculés sont : la diversité (H), la dominance (D), le nombre d'éléments (NP) et la taille moyenne des éléments (MPS) (ill. 38). L'indice de diversité (H) donne une indication de la représentativité spatiale de chaque type d'occupation des sols. Il s'apparente à l'« entropie » qui décrit l'état d'ordre spatial des unités. Plus sa valeur est élevée, plus le milieu est diversifié, et plus les classes ont tendance à présenter des fréquences identiques. La dominance (D), normalisée de 0 à 1, traduit la prépondérance d'une classe par rapport aux autres unités. Une valeur de dominance proche de 1 exprime un milieu dominé spatialement par un type d'occupation des sols. Le nombre de taches (NP) et leur taille moyenne (MPS) sont des indices qui caractérisent le milieu en termes de structure horizontale et d'organisation spatiale.

H : diversité	m : nombre de classes
H_{max} : diversité maximale	p_k : surface relative de chaque classe
D : dominance	A : surface totale de l'espace étudié (m ²)
MPS : taille moyenne des polygones d'une classe	NP : nombre de polygones d'une classe

$$H = -\sum_{k=1}^m (p_k) \ln(p_k)$$

$$D = \left(\frac{H_{max} - H}{H_{max}} \right)$$

$$MPS = \frac{A}{NP} \left(\frac{1}{10000} \right)$$

Illustration 38. Les indices synthétiques calculés pour caractériser les changements d'occupation des sols.

De manière à calculer des indices comparables pour les deux couvertures, celle de 2002 a fait l'objet d'un lissage ayant pour but d'atténuer l'effet d'échelle. En effet, la résolution de l'orthophotographie (0.5 mètre) a permis la numérisation d'objets spatiaux de taille inférieure à ceux numérisés en 1992 à partir d'images d'une résolution plus grossière. La surface minimale des objets de 1992 étant de 200 m², ceux de 2002 d'une taille inférieure à cette valeur ont été automatiquement éliminés.

3.6.2. Résultats

Les tendances suivantes sont mises en évidence par l'analyse des deux inventaires de l'occupation des sols (ill. 39 et 40).

Le processus d'enfrichement se poursuit puisque les broussailles gagnent encore des espaces occupés en 1992 par la prairie mésophile. Elles progressent ainsi sur 5% de l'espace insulaire au détriment de la prairie qui régresse d'autant. L'embroussaillage procède par diffusion à partir des lisières des broussailles présentes en 1992 et par densification des espaces embroussaillés de longue date (ill. 41).

En effet, on constate une progression notable des stades évolués dans la dynamique d'embroussaillage des milieux mésophiles et humides. Les fourrés à prunelliers occupent une surface quatre fois supérieure à celle qu'ils occupaient voici 10 ans et surtout sont représentés par quatre fois plus d'unités spatiales (NP=16 en 1992, NP=58 en 2002). De même, la saulaie hygrophile, couvre 2% de l'espace en 2002 contre 0.8% en 1992. Dans ce cas, le même processus de « mitage » est observé. 86 entités (NP) de saulaie se développent sur d'anciennes prairies humides. Enfin, contrairement à l'impression de relance agricole perçue sur le terrain en 2002, l'analyse de l'information révèle une diminution en termes de surface totale (10.6 à 7.7 ha) mais une augmentation très importante du nombre de petites parcelles cultivées (cultures fourragères pour le gibier) puisqu'on en dénombre une vingtaine en 2002 d'une taille moyenne de 0.3 ha (MPS) contre seulement 2 (NP) en 1992 d'une taille moyenne de 5.3 ha (MPS).

île d'Ouessant: occupation des sols en 1992 et 2002

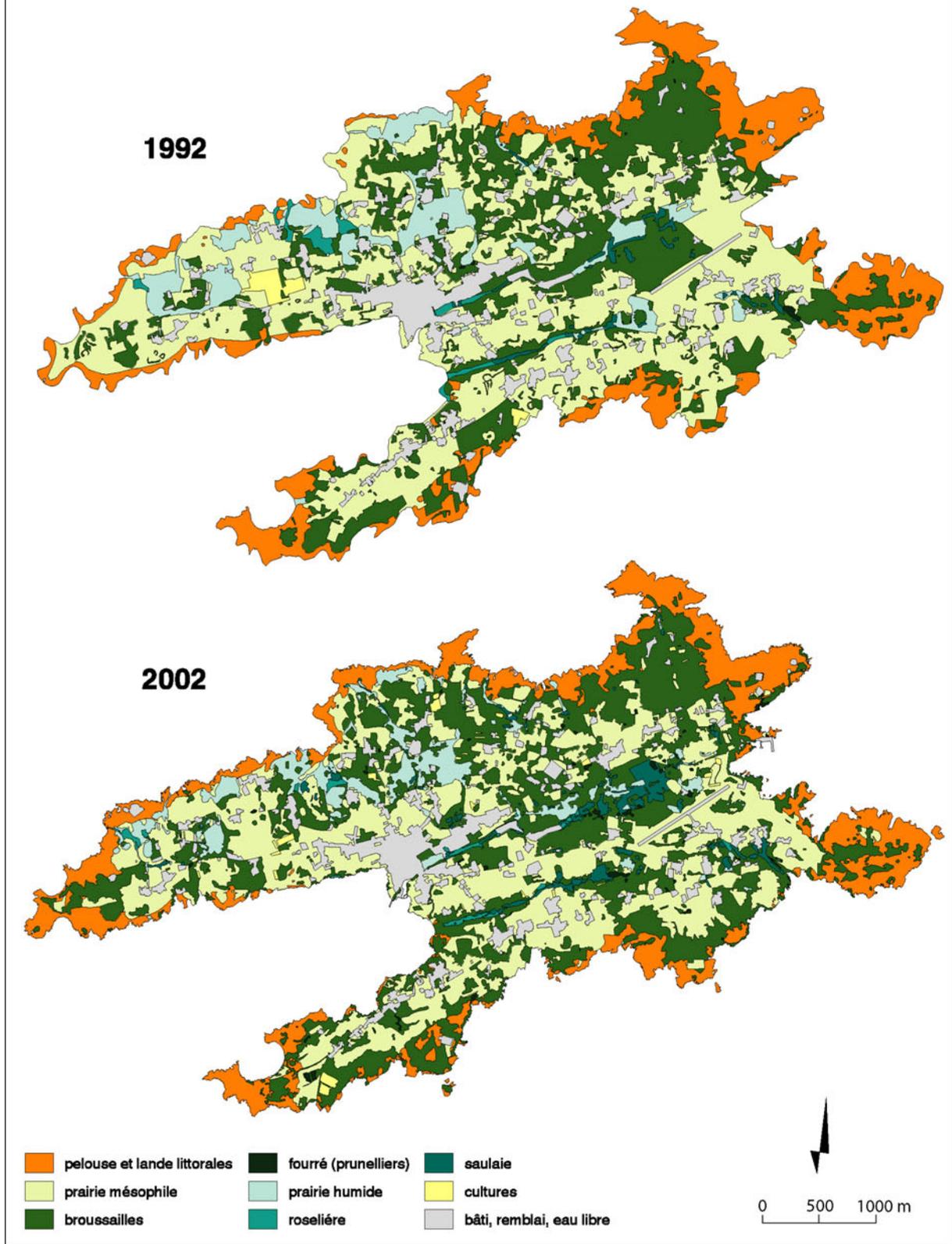


Illustration 39. Les changements d'occupation des sols de l'île d'Ouessant de 1992 à 2002.

Année	1992		2002	
	ha	%	ha	%
formations littorales	254.2	18.2	257.3	18.6
prairie mésophile	583.2	41.7	502.7	36.3
broussailles	423.5	30.3	498.4	35.9
fourrés	1.7	0.1	6.4	0.5
prairie humide	100.2	7.2	75	5.4
roselière	12.1	0.9	7.1	0.5
saulaie	11.7	0.8	31.4	2.3
cultures	10.6	0.8	7.7	0.5

Représentativité spatiale de types d'occupation des sols en 1992 et 2002

Année	1992		2002	
	NP	MPS	NP	MPS
formations littorales	47	5.4	95	2.7
prairie mésophile	87	6.7	129	3.89
broussailles	251	1.68	244	2.04
fourrés	16	0.1	58	0.11
Prairie humide	39	2.56	120	0.62
roselière	10	1.21	17	0.41
saulaie	33	0.35	86	0.36
cultures	2	5.3	21	0.36

Indices caractérisant les différents types d'occupation des sols aux deux dates

Année	Diversité (H)	Dominance (D)
1992	1.351	0.349
2002	1.372	0.339

Indices caractérisant l'occupation des sols en 1992 et 2002

Illustration 40. Les résultats statistiques décrivant les changements d'occupation des sols de l'île d'Ouessant de 1992 à 2002.

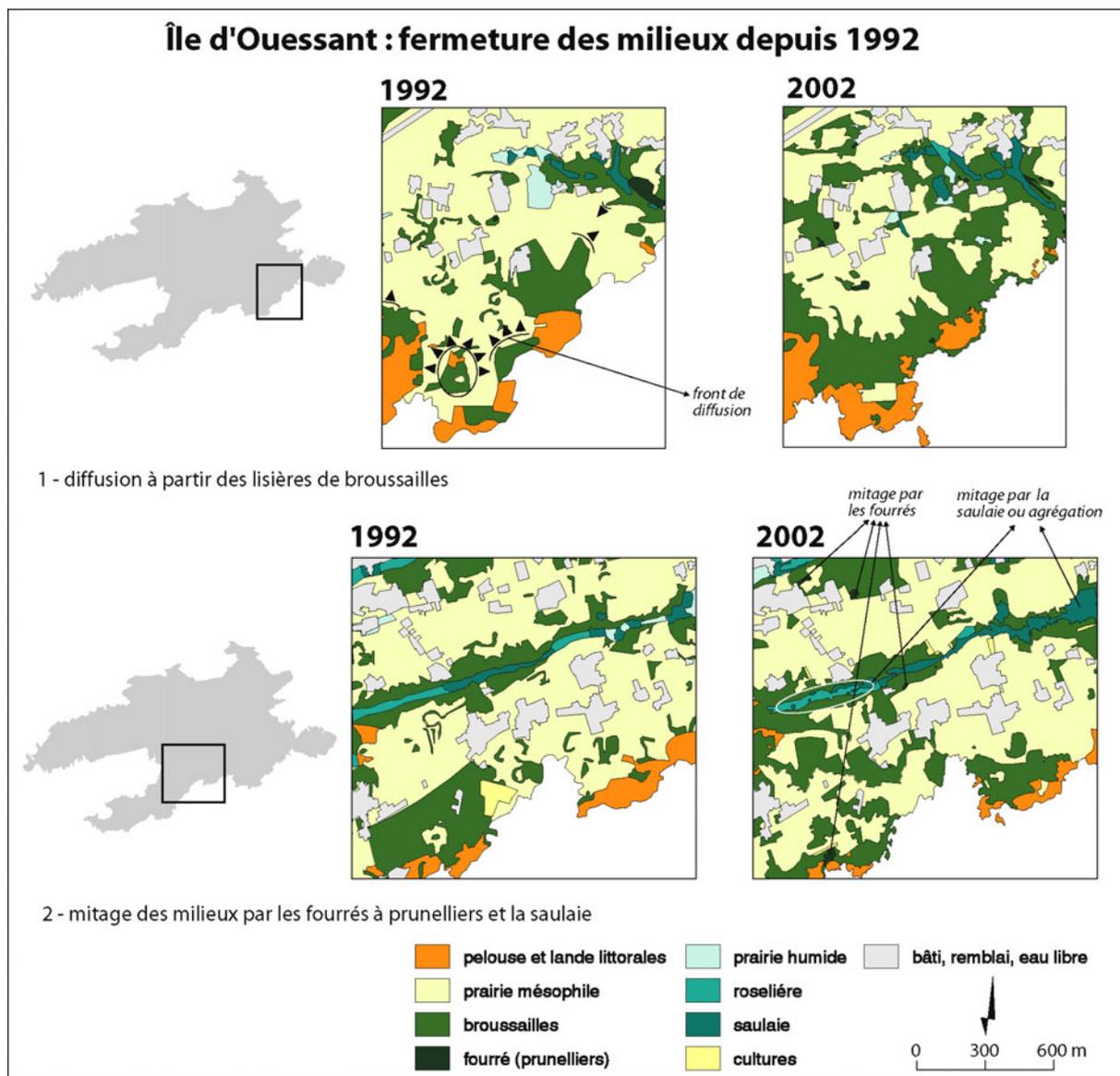


Illustration 41. Les modalités d'embroussaillage des milieux au cours de la dernière décennie.

A l'échelle de l'île, les indices de diversité et de dominance calculés aux deux dates sont équivalents, la diversité étant légèrement supérieure en 2002. Les indices attestent d'une fragmentation croissante de la prairie mésophile et de la prairie humide (en 2002, NP supérieur et MPS plus réduite), également corroborée par la multiplication des petits espaces en saulaie et en fourrés (NP supérieur en 2002 allant de pair avec un MPS équivalent aux deux dates).

La méthodologie employée permet la mise en évidence des tendances spatiales relatives aux dynamiques territoriales sur des pas de temps relativement longs de l'ordre de quelques décennies. Néanmoins, elle est difficilement transposable à des échelles spatio-temporelles plus fines. Le plan de gestion des friches agricoles mis en place par le Parc Naturel Régional d'Armorique implique pourtant un suivi des milieux tous les cinq à dix ans. Dans ce cadre, l'étude des dynamiques des milieux en cours de fermeture doit s'envisager selon une filière méthodologique différente.

3.7. Test méthodologique de cartographie à grande échelle de la végétation terrestre

A des échelles locales, supérieures au 25 000ème, la cartographie de la végétation est classiquement fondée sur la photo-interprétation de clichés aériens et résulte donc d'une démarche anthropocentrique génératrice d'erreurs de positionnement et de classification (Cherrill & McClean, 1995). C'est pour tenter de les pallier que des études récentes ont utilisé les potentialités de l'ortho-photographie numérique et des classifications automatiques pour caractériser finement les milieux terrestres (Kadmon & Harari-Kremer, 1999). Sur des problématiques relatives aux dynamiques paysagères qui impliquent l'analyse de données anciennes, la photographie aérienne constitue une source d'information unique. Cette perspective diachronique est utilisée pour évaluer les changements de la végétation (Carmel & Kadmon, 1998) et pour estimer la progression spatiale de certains phénomènes à haute variabilité spatio-temporelle tels que l'embroussaillage (Simon & Tamru, 1998), l'expansion d'espèces invasives (Mac Cormick, 1999) ou la diminution des ressources forestières (Cameron *et al.*, 2000). Ces recherches, qui s'appuient sur des images acquises à plusieurs décennies d'intervalle (10 à 50 ans) nécessitent des observations répétitives et une très haute résolution spatiale autorisant des synthèses à l'échelle des mesures et des modèles biologiques (Barrette *et al.*, 2000 ; Duvernoy, 1999).

Les analyses menées sur les changements de l'occupation des sols de l'île d'Ouessant mettent en évidence les tendances évolutives des milieux mais ne sont pas adaptées à l'évaluation précise d'un processus dynamique tel que l'embroussaillage, du fait de sa complexité et de la faible extension spatiale des objets concernés. Dans une perspective de gestion des friches agricoles, un suivi à grande échelle des milieux ouessantins se justifie. En réponse à ce besoin, l'intérêt des classifications automatiques d'ortho-images a été testé (Gourmelon, 2002). Afin de réaliser la cartographie de la végétation, la méthode s'appuie sur la production d'ortho-photographies numérisées à partir de clichés anciens⁴ et d'un modèle numérique de terrain, ainsi que sur la mise en œuvre de classifications non dirigées. L'ortho-rectification permet de combiner les deux émulsions disponibles, couleur et infra-rouge, avec le contenu de la base d'information géographique *SIGOuessant* (ill. 42). Les résultats des classifications, estimés par l'indice de validité cartographique (Lefeuvre, 1992), sont globalement équivalents avec ou sans prise en compte de l'infra-rouge, et indiquent des performances moyennes de l'ordre de 70%. Toutefois la détection des formations ligneuses par une méthode de classification par grand type de milieu appliquée à l'image couleur est acceptable (validité de 85%).

Du point de vue de l'acquisition de l'information au sein d'une base géoréférencée, les ortho-images produites offrent un gain en précision lors de la numérisation des contours d'objets par les possibilités d'ajustement du contraste de l'image et du fait de la très haute résolution spatiale possible ; permettant la détection d'objets pas toujours discernables sur un document analogique. Les procédures de classification testées donnent des résultats bruts moyens, mais globalement équivalents à ceux souvent obtenus avec l'imagerie satellitaire (Duhaime *et al.*, 1997). Le test mené conclut à l'absence d'intérêt de la prise en compte de l'infra-rouge, pour la détection de la végétation selon le schéma suivi basé sur les critères physiologiques. Ce constat surprenant peut être lié à la date d'acquisition des photographies (septembre), qui ne correspond pas au maximum de la végétation verte vivante, se traduisant par des contrastes peu élevés entre les différentes physiologies sur l'image infra-rouge (Bonn & Rochon, 1992). La méthode, qui offre la possibilité de s'affranchir de la subjectivité liée naturellement

⁴ 1993 : mission IFN29, couleur et infra-rouge, 1 : 20 000

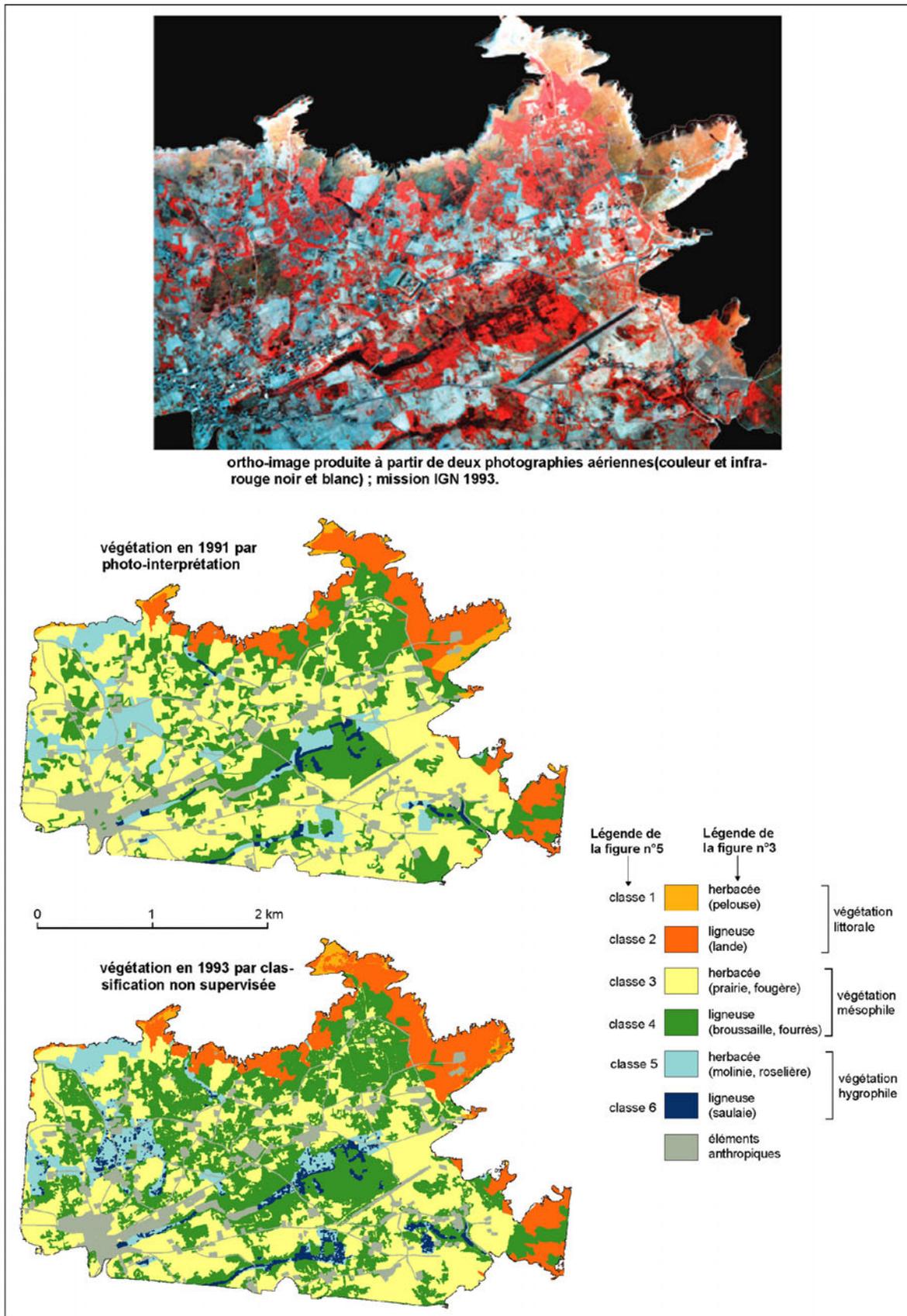


Illustration 42. Un test méthodologique de cartographie automatique à grande échelle de la végétation terrestre (d'après Gourmelon, 2002).

à une méthode manuelle de report cartographique, n'est pas encore opérationnelle et guère portable. Une réflexion sur l'amélioration des classifications par la prise en compte de variables contextuelles (sols, expositions, usages) doit être menée (Duhaime *et al.*, 1997). De même, l'étude soulève le problème de l'estimation des classifications par une référence pas toujours adaptée (Fitzgerald & Lees, 1994). En effet, la méthode suivie de validation d'un produit image par un plan cartographique, révèle certes les erreurs d'affectation de la classification mais également le peu de fiabilité géométrique des entités spatiales sur le document de référence. En conséquence, d'autres méthodes doivent être testées, malheureusement impossibles à mettre en œuvre si la phase de terrain n'est pas réalisée rapidement après la prise de vue aérienne. La méthode des points de contrôle, localisés par GPS, est la solution souvent envisagée. Par type de végétation à identifier, une cinquantaine de points sont repérés, comme le préconise Congalton (1991) pour une typologie de moins de douze classes. La confrontation de ces points avec les états de surface permet d'estimer le nombre d'objets de contrôle correctement classés. Une autre méthode pourrait consister en une validation des états de surface issus du traitement automatique de l'image par une campagne de terrain la plus exhaustive possible.

Ce test méthodologique conclut donc à l'intérêt des classifications automatiques d'orthophotographies numériques pour le suivi de phénomènes dynamiques à haute variabilité spatio-temporelle tels que l'embroussaillage, s'inscrivant sur le long terme et nécessitant la prise en compte de données anciennes. Pour l'élaboration d'une cartographie de la végétation à grande échelle, les conclusions sont plus mitigées essentiellement du fait de la lourdeur de la procédure à mettre en œuvre pour l'obtention de résultats pertinents.

3.8. Conclusion

En reconstituant l'histoire de l'utilisation et de l'occupation des sols de l'île d'Ouessant sur une période de 150 années, cette recherche a permis de mettre en évidence les modalités d'enfrichement d'un espace en déprise et le rôle déterminant que joue une activité traditionnelle, l'élevage ovin extensif, dans l'entretien des espaces semi-naturels. Par la prise en compte de la répartition spatiale et de la nature des pâturages actuels, l'impact du pastoralisme sur les milieux est décrit et permet une projection théorique de leur fermeture en relation avec le développement hypothétique du cheptel ovin. Toutefois la méthodologie employée, si elle permet la mise en évidence des tendances spatiales relatives aux dynamiques territoriales ne peut être transposée à des échelles spatio-temporelles plus fines. En complément, l'étude des dynamiques d'embroussaillage doit s'envisager selon une filière méthodologique impliquant la synergie entre SIG et traitement d'images.

L'ensemble des résultats acquis repose sur la contribution active des SIG. Que ce soit pour la production de connaissances relatives au fonctionnement et à l'évolution des milieux ou pour l'aide à la gestion, la pratique se révèle fructueuse. En effet, de ce seul point de vue, la démarche permet de disposer d'éléments concrets, statistiques et cartographiques, et de réaliser des scénarios d'évolution des milieux qui sont d'un intérêt certain dans la réflexion préalable à la définition d'une politique de gestion.

4. LES DYNAMIQUES A LONG TERME DE LA VEGETATION DES ILOTS MARINS PROTEGES

4.1. Présentation du contexte

En 1995, un programme de cartographie de la végétation est mis en place sur un ensemble représentatif d'îlots atlantiques et méditerranéens en réserve⁵. Il instaure ainsi un suivi à long terme de ces milieux de référence de manière à procurer aux gestionnaires une évaluation précise de la qualité phytocœnotique de la végétation et de les doter de méthodes de suivi et d'analyse pertinentes. Le projet émane du groupe thématique « îlots marins et milieu sous-marin » de la Commission Scientifique de Réserves Naturelles de France qui a identifié, au début des années 1990, un certain nombre de problèmes de gestion communs à ce type d'espace, parmi lesquels la dégradation du tapis végétal en probable relation avec différents facteurs anthropo-zoogènes (ill. 43).

	Banneg	Balaneg	Béniguet
<i>statut de protection</i>	réserve naturelle	réserve naturelle	réserve de chasse et de faune sauvage
<i>superficie (ha)</i>	10	14	60
<i>habitats terrestres dominants</i>	- pelouses aérohalines - végétation des cordons de galets	- pelouses aérohalines - végétation des cordons de galets - végétations saumâtres de berges du loc'h - friches post-culturelles (ptéridaie, roncier)	- pelouses aérohalines - dune vive - pelouse de la dune fixée - végétation des cordons de galets - végétations saumâtres des dépressions arrière-dunaires - friches post-culturelles (ptéridaie, roncier) - végétations rudérales nitrophiles
<i>intérêt naturaliste majeur</i>	Procellariiformes : océanite tempête, puffin des anglais goélands, cormoran huppé	Procellariiformes : océanite tempête, puffin des anglais goélands	limicoles : huîtrier pie, grand gravelot, sternes, goélands
<i>lapins</i>	disparition depuis 1993	présence	présence
<i>goélands (tendances démographiques)</i>	GA, GB : forte diminution GM : stabilité	GA, GB : forte diminution GM : stabilité	GA : forte diminution GB : stabilité GM : stabilité
<i>usages anciens</i>	présence de goémoniers en été jusque dans les années 30, pâturage	ferme et exploitation agricole jusqu'au milieu du 20 ^{ème} siècle, pâturage présence de goémoniers en été	ferme et exploitation agricole jusqu'au milieu du 20 ^{ème} siècle, pâturage gestion par la fédération des chasseurs jusqu'en 1980
<i>usages actuels</i>	réserve intégrale	accès autorisé en été	accès réglementé, présence humaine (surveillance) de mai à août
<i>friches post-culturelles</i>	absence	présence	présence
<i>modalités de gestion</i>	- non intervention sur la totalité de l'îlot	- limitation localisée de l'enrichissement ; - non intervention sur une grande partie de l'îlot	- gestion des friches pour la reconstitution de pelouses aérohalines ; - non intervention en dehors des anciennes cultures
<i>naturalité</i>	importante sur toute la surface	importante à l'extérieur des zones anciennement cultivées	importante à l'extérieur des zones anciennement cultivées
<i>processus dynamiques</i>	dégénération-régénération	dégénération-régénération succession secondaire	dégénération-régénération succession secondaire
GA : goéland argenté, GB : goéland brun, GM : goéland marin			

Illustration 43. Caractéristiques et problématiques de trois îlots étudiés : Banneg, Balaneg et Béniguet en mer d'Iroise (d'après Bioret, 2002).

⁵ L'accès y est interdit ou réglementé.

Dans ce contexte, un inventaire permettant d'évaluer la qualité phytocœnotique de la végétation terrestre est programmé sur le long terme. Il concerne un échantillonnage d'îlots représentatifs du réseau : archipels de Molène et des Sept-Îles (Bretagne), Îles Lavezzi et Cerbicale (Corse) (ill. 44 et 45).

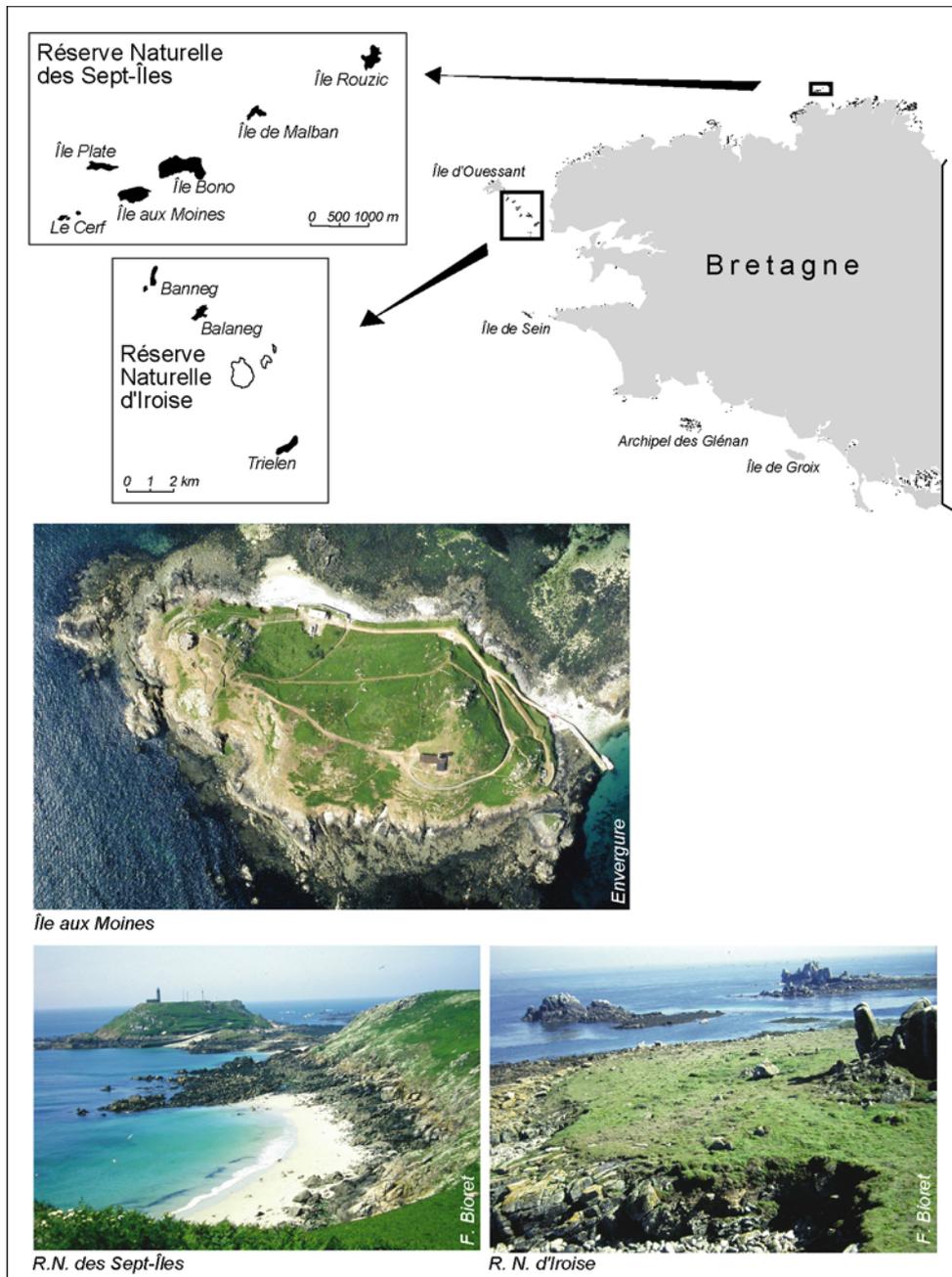


Illustration 44. Les îlots marins (Manche-Atlantique) concernés par le programme de suivi à long terme de la végétation.

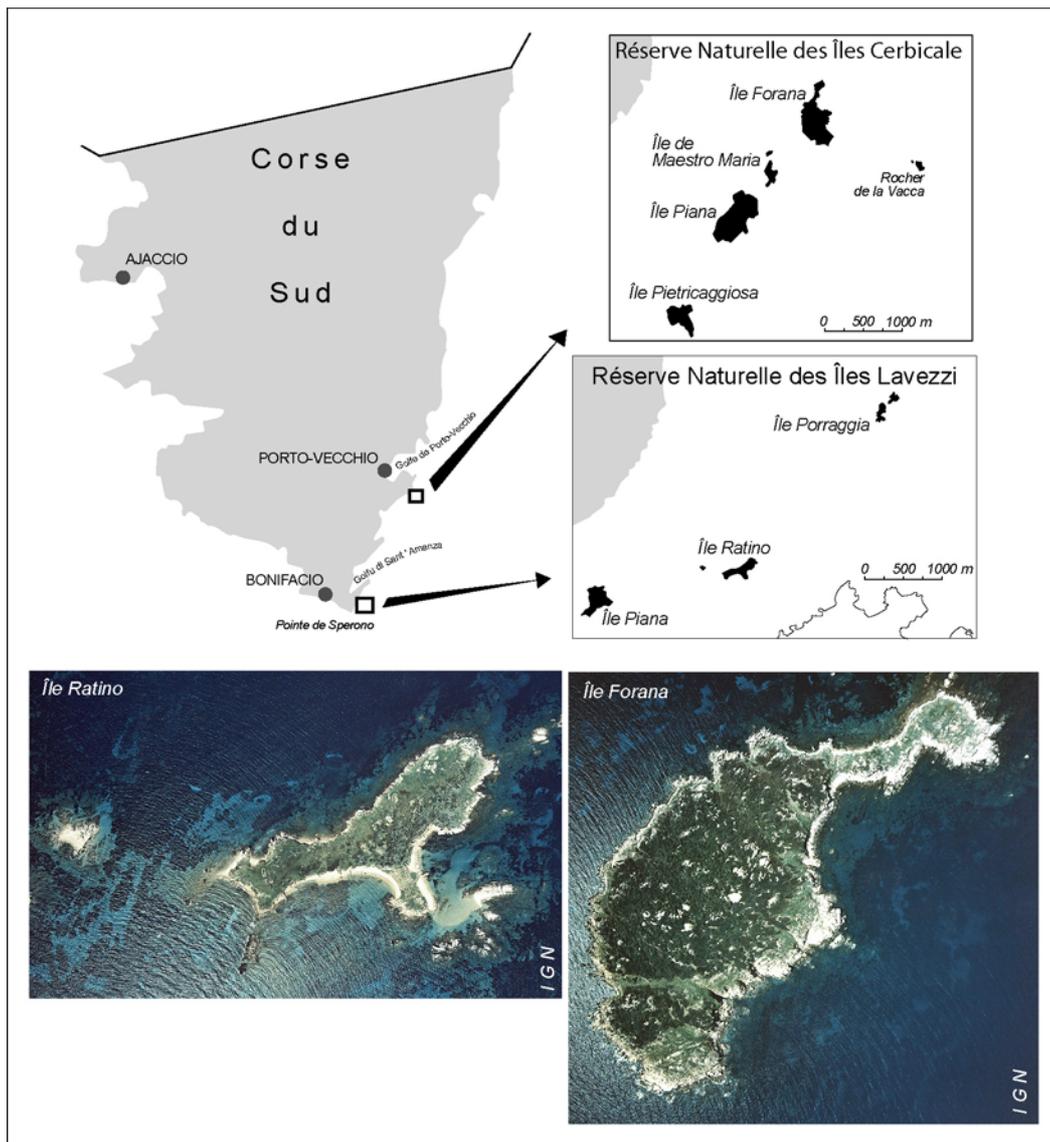


Illustration 45. Les îlots marins (Méditerranée) concernés par le programme de suivi à long terme de la végétation.

En raison de la taille restreinte des espaces (inférieure à 70 hectares), de la finesse des processus dynamiques en cause et de la fréquence des suivis, calquée sur la mise à jour des plans de gestion révisés tous les cinq ans, l'échelle d'analyse retenue est fine (1 : 5 000 - 1 : 3 000) et la nomenclature phytosociologique est utilisée pour qualifier les unités de végétation (ill. 46). Intégrant la notion de série de végétation⁶, elle permet d'exprimer les changements du tapis végétal en tenant compte des paramètres biotiques et physiques du milieu, ainsi que des types de végétation associés à différents stades de leur évolution progressive ou régressive (Ozenda, 1982, 1986). Les dynamiques de la végétation provoquées par la surfréquentation des populations animales caractérisent un processus de dégénération (Pedrotti, 1997) alors que celles dues à l'enrichissement correspondent à une succession secondaire (Falinski, 1998). Combinés, ces deux phénomènes conduisent à une échelle de dégénération en quatre stades (Bioret *et al.*, 1988) (ill. 46).

⁶ Dans chaque série de végétation, il existe un stade en équilibre avec les conditions naturelles (groupement initial) et des stades évolutifs qui en dérivent : les groupements de superposition et de substitution, caractérisés par une dégradation croissante.

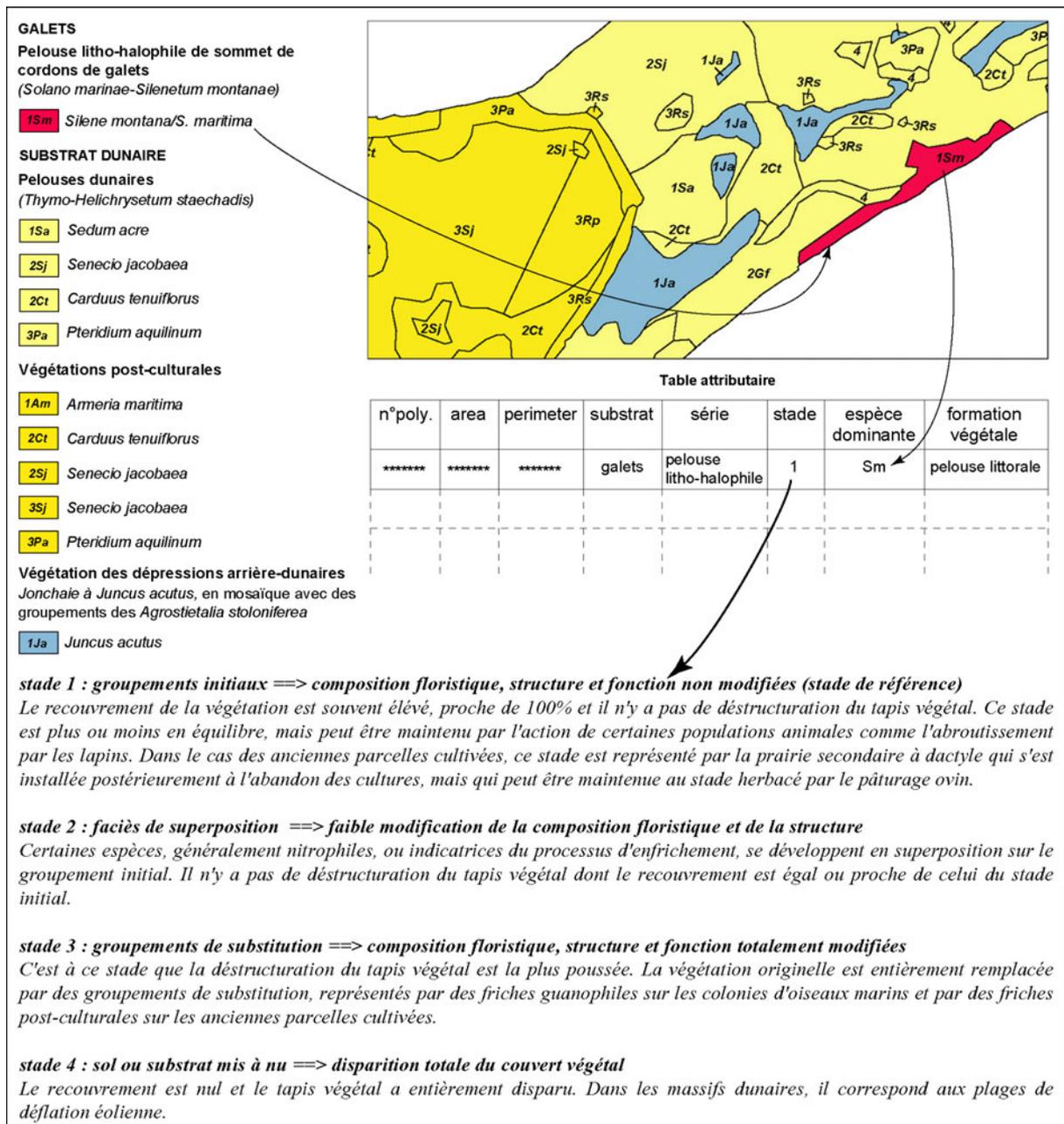


Illustration 46. Base d'information géographique et classification phytosociologique.

Dans le cadre du programme *Life Archipels et îlots marins de Bretagne* (1999-2003), une étude complémentaire est menée sur l'îlot de Béniguet (ill. 43 et 44), géré par l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS). Il est inclus dans la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise, et fait l'objet, dans le cadre du programme Mab de l'UNESCO, d'un suivi scientifique programmé depuis la fin des années 1980. Concernant la végétation terrestre, des inventaires localisés sont réalisés tous les six ans, selon la classification phytosociologique (Bioret *et al.*, 1995). Ils permettent de décrire les modifications du tapis végétal, occasionnées par différents facteurs anthropo-zoogènes (Bioret *et al.*, 1988). Cet îlot d'une soixantaine d'hectares fut cultivé jusque dans les années 1980 par la Fédération départementale des chasseurs du Finistère et l'enfrichement post-culturel se traduit aujourd'hui par un embroussaillement des milieux susceptible de perturber localement les

habitats de certaines populations d'oiseaux nicheurs tels que les huîtriers pies *Haematopus ostralegus* et divers goélands *Larus sp.*, à l'origine de l'actuel classement en réserve (Yésou *et al.*, 1993). Les populations de goélands et de lapins participent à la modification de la végétation par effets mécaniques (piétinement, grattage, abrouissement) et chimiques (enrichissement du sol par déjections et autres apports organiques). Dans le cadre du programme Life, le gestionnaire de Béniguët avait deux objectifs prioritaires : la mise au point des techniques de lutte contre l'embroussaillage et la restauration des pelouses littorales qui constituent un habitat naturel d'intérêt communautaire figurant à l'annexe I de la directive européenne Habitats-Faune-Flore⁷. En parallèle, le suivi de la dynamique de la végétation, engagé depuis dix ans devait se poursuivre afin d'analyser les changements de la végétation sur un pas de temps significatif. Tout en fournissant des informations utiles aux choix de gestion sur l'île, cette analyse devait contribuer aux recherches en cours concernant le fonctionnement des îlots marins protégés atlantiques et méditerranéens (Bioret & Gourmelon, 2003).

Sur ces îlots marins protégés, les dynamiques du tapis végétal constatées lors du suivi scientifique mis en œuvre témoignent de changements importants des habitats, pouvant entraîner des perturbations pour l'avifaune nicheuse d'intérêt patrimonial, elle-même en partie à l'origine du processus. La problématique abordée concerne donc les relations faune-flore dans un contexte de modification des pratiques humaines et de gestion conservatoire.

4.2. Données et méthodes

4.2.1. Données et production d'informations géoréférencées

L'inventaire phytocœnotique est basé sur des relevés phytosociologiques (Bioret, 1989). Puis lors de la phase de terrain, chaque unité de végétation est replacée dans une série dynamique regroupant les différents stades d'une succession écologique, elle-même liée à un type de substrat (Bioret *et al.*, 1995). Cet état de référence a été mené sur l'ensemble des îlots concernés par ce programme à des dates différentes : en 1990 pour les îlots de la mer d'Iroise, en 1995 pour la Réserve Naturelle des Sept-Îles et en 1996 pour celle des Bouches de Bonifacio. Dans tous les cas, les cartes des unités de végétation résultant des inventaires ont été réalisées par la prospection systématique de l'ensemble des sites et le report de chaque unité de végétation repérée sur les photographies aériennes de l'IGN agrandies à l'échelle d'investigation retenue (ill. 47).

⁷ L'objectif des expérimentations mises en place sur Béniguët était de restaurer une végétation originelle de pelouse littorale représentant deux types d'habitats d'intérêt communautaire figurant à l'annexe I de la directive européenne Habitats-Faune-Flore : la pelouse aérohaline à Fétuque et Armérie, correspondant à l'association végétale du *Dauco gummiferi-Armerietum maritimae* (habitat 1230 Falaises avec végétation des côtes atlantiques) et la pelouse de la dune fixée à Thym serpollet, correspondant à l'association végétale du *Thymo drucei-Helichrysetum staechadis* (habitat prioritaire 2132 dune fixée de *Euphorbio-Helichryson*).

	IROISE	SEPT-ÎLES	BOUCHES DE BONIFACIO
1990	Mission IGN F0317-0417, 1985, 1 : 30 000, noir et blanc		
1995-1996	Mission IGN IFN29, 1993, 1 : 20 000, couleur	Mission IGN FD22-56, 1993, 1 : 30 000, couleur	Mission IGN FD2A-2B, 1996, 1 : 25 000, couleur (îles Maestro Maria, Pietricaggiosa, Porraggia, Ratino, Piana).
2000-2002	Mission départementale IGN, BD-Ortho, 2000, résolution spatiale de 50 centimètres, couleur Survols en ULM, 2000, 1 : 3 000, couleur	Mission départementale IGN, BD-Ortho, 1998, résolution spatiale de 50 centimètres, couleur Survols en ULM, 2001, 1 : 3 000, couleur	Mission spéciale IGN 2000, 1 : 3 000-1 : 4 000, couleur (îles Forana, Piana et de la Tonnara) levés au GPS des unités de végétation des îles Ratino et Bruzzi, 2002

Illustration 47. Les données photographiques utilisées dans le cadre du suivi à long terme des îlots marins protégés.

Compte tenu de la qualité souvent médiocre des clichés, la délimitation directe des unités de végétation n'a été possible que dans quelques rares cas, les séries de végétation et les stades dynamiques qui les caractérisent n'ayant pas de signature visible sur les photographies. Il a donc été indispensable de réaliser des prospections exhaustives sur le terrain. Pour les mises à jour ultérieures, seuls les unités de végétation et les stades dynamiques ont été identifiés. Des photographies acquises à basse altitude en ULM ont été utilisées quand les produits de l'IGN n'étaient pas disponibles lors des campagnes de terrain (Béniguet) ou quand ils étaient de mauvaise qualité (archipel des Sept-Îles). Sur les îlots corses des Bruzzi et de Ratino, une autre méthode a été testée en 2002. Elle s'appuie sur l'acquisition des données géospatiales par un GPS différentiel d'une précision décimétrique qui permet de s'affranchir de la photo-interprétation. Dans ce cas, la délimitation des unités de végétation est réalisée directement sur le terrain.

Les documents issus de la photo-interprétation validée sur le terrain, ont ensuite été numérisés et mis en forme dans la base d'information géographique. La mise en cohérence des données, des points de vue géométrique et sémantique a conduit, pour les inventaires successifs, à la production de couvertures géoréférencées dans le système de projection cartographique Lambert 2 (système géodésique NTF, ellipsoïde de Clarke 1880), calées par la BD Ortho de l'IGN lorsqu'elle était disponible, c'est-à-dire pour les archipels des Sept-Îles et de Molène. Dans ce cas, les données acquises en 2000 et en 2002 ont été intégrées à la base d'information géographique, à partir de la numérisation à l'écran sur fond d'ortho-photographies de l'IGN. En tant qu'information géographique de référence, ce type de support permet à l'utilisateur d'associer des données de différentes origines et de positionner dans l'espace ses propres informations. Les données antérieures (1990 et 1995-1996) ne disposant pas de ce type de référence, disponible sur le Finistère depuis 2000 et sur les Côtes d'Armor depuis 1998, leur intégration dans la base d'information géographique impliquait une démarche fondée sur le traitement de documents analogiques (clichés et cartes de l'IGN agrandis). La comparaison entre les couvertures produites par ces deux méthodes a mis en évidence des décalages importants des couvertures anciennes par rapport à l'information de référence, correspondant sur le terrain à plusieurs mètres (encart 9). L'objectif étant de combiner et d'analyser l'ensemble des informations, il a donc été nécessaire de recalibrer les états antérieurs sur la référence de l'IGN. Mais cette opération s'est avérée impossible, dans la mesure où les entités

repérées sur les clichés anciens (unités de végétation) peuvent avoir disparu ou s'être transformé sur l'ortho-photographie, de même que le trait de côte a pu évoluer. Il a donc été nécessaire de rectifier géométriquement les photographies aériennes anciennes, à l'origine des inventaires réalisés dans le passé, de manière à s'appuyer sur des amers fixes visibles sur les clichés, tels que des coins de muret ou de ruine, des roches isolées sur l'estran. Dans tous les cas, la qualité du recalage s'est avérée satisfaisante avec une marge d'erreurs moyennes inférieure à 1.4 mètres. Ensuite, les couvertures vectorielles décrivant la végétation en 1990 et 1995-1996 ont été ajustées géométriquement à leurs sources, recalées sur l'information de référence de l'IGN.

ENCART 9. Les problèmes d'intégration de données pour les Sept-Îles

Concernant les données acquises en 2002, leur intégration à la base d'information géographique a posé un certain nombre de problèmes, liés à la mauvaise qualité des images de référence servant de fond de plan dans le SIG (BD Ortho de l'IGN de 1998) et aux distorsions géométriques des clichés acquis lors du survol en ULM, utilisés lors de l'inventaire de terrain (2002). La méthode a consisté à rectifier géométriquement les images produites par la numérisation des clichés ULM en utilisant des points d'appui repérés sur les ortho-images IGN (Gourmelon, 2002). Mais vu le décalage temporel entre ces deux survols, la mauvaise restitution graphique des ortho-images IGN et du peu d'éléments fixes (routes, bâti) existant sur les îlots, la collecte de points d'appui bien répartis sur l'ensemble des images à rectifier n'a pas toujours été possible. De plus, le relief accentué, notamment sur les îlots de Rouzic, de Bono et sur l'île aux Moines a gêné la correction des images ULM, qui nécessiterait la mise en œuvre d'une procédure d'ortho-rectification à l'aide d'un MNT de grande précision. Après superposition à l'écran des données de référence (IGN) et des images ULM rectifiées et projetées en Lambert 2, il apparaît en effet sur ces dernières des décalages locaux importants (de plusieurs mètres). De manière à s'affranchir au mieux de ce problème, la numérisation à l'écran des contours des unités de végétation repérés sur les clichés aériens et le terrain a utilisé les deux sources en privilégiant le repérage de tous les éléments discernables sur les ortho-images IGN, complétés par ceux visibles uniquement sur les clichés ULM rectifiés.

Sur l'archipel des Sept-Îles, les données datant de 1995 avaient été intégrées dans la base d'information géographique selon une démarche fondée sur le traitement de documents analogiques (clichés et cartes de l'IGN agrandis), l'information géographique de référence n'étant pas disponible à cette date. La superposition graphique entre les couvertures produites en 1995 et 2002 à partir de sources différentes a confirmé des décalages importants. Pour cette raison, la combinaison des couvertures diachrones pour réaliser une analyse spatiale des dynamiques du tapis végétal, a impliqué un repositionnement des données anciennes sur les plus récentes.

Pour les îlots corses, en l'absence de produits géospatiaux de référence (BD Topo et BD Ortho de l'IGN), la méthode d'intégration des données dans la base d'information géographique s'est appuyée sur la rectification géométrique des photographies aériennes numérisées en utilisant une procédure classique fondée sur la recherche de points de contrôle, repères homologues sur l'image à rectifier et sur un document de référence (cartes topographiques de l'IGN à 1 : 25 000) ou localisés sur le terrain grâce au GPS. Les images rectifiées et projetées dans le système Lambert 2 ont ensuite été utilisées en fond d'écran pour la délimitation des unités de végétation repérées sur les photographies aériennes et validées sur le terrain. Concernant les îles Bruzzi et Ratino, une méthode différente a été testée en 2002. Elle est fondée sur les levés sur le terrain de tous les contours des unités de végétation à l'aide d'un GPS différentiel, leur transfert dans le SIG, puis leur mise en forme en couches thématiques cohérentes des points de vue spatial et sémantique impliquant la correction des erreurs de levés, la projection en Lambert 2 et la description attributaire des entités de surface.

Dans tous les cas, les couvertures thématiques élaborées sur l'ensemble des îlots du réseau sont de type surfacique et disponibles dans le système de projection cartographique Lambert 2 (système géodésique NTF, ellipsoïde de Clarke 1880). Dans la mesure du possible, elles sont calées par l'information géographique de référence de l'IGN. Quelle que soit la date d'acquisition, ces couvertures sont décrites par les attributs suivants hérités de la classification phytosociologique : série de végétation, type de substrat, stade dynamique, espèce végétale dominante, formation végétale (ill. 46).

4.2.2. Analyse spatiale des changements

De manière à mettre en évidence les dynamiques végétales entre deux inventaires successifs, l'analyse de l'information s'appuie sur une fonction géométrique d'algèbre de cartes. Ce type d'approche a été mis en œuvre sur deux îlots de la Réserve Naturelle d'Iroise (Banneg, Balaneg) à partir des deux inventaires réalisés en 1990 et 1996, sur l'îlot de Béniguet qui dispose de trois inventaires successifs (1990, 1996, 2000), sur la Réserve Naturelle des Sept-Îles (1995 et 2002) et sur l'îlot de Ratino dans l'archipel des Lavezzi (1996 et 2002). Dans tous les cas, la procédure d'analyse, réalisée au sein du SIG, implique les étapes suivantes, illustrées par le cas théorique de trois inventaires successifs (A, B, C).

- Des couvertures initiales (A, B, C) sont extraites autant de couvertures dérivées n'incluant que le thème relatif au stade dynamique de la végétation, codé en quatre classes : groupement initial (1), stade de superposition (2), groupement de substitution (3), substrat mis à nu (4) (Bioret *et al.*, 1988).
- Ces couvertures dérivées sont fusionnées deux à deux, par une procédure d'union géométrique. Il en résulte deux couvertures combinées (A-B et B-C), contenant des objets décrits par les attributs des deux couvertures dérivées ; respectivement les stades dynamiques de A et B, et les stades dynamiques de B et C.
- L'utilisation d'opérateurs de comparaison ($=$, $>$, $<$) sur les classes de ces attributs permet de générer une information inédite, relative aux changements intervenus entre les deux dates. Trois situations synthétiques sont prises en compte : la stabilité, la dégénération (Pedrotti, 1997) et la régénération qui correspond au concept de restauration (Aronson *et al.*, 1993). Une entité spatiale possédant des valeurs équivalentes pour les stades dynamiques (A-B et B-C) est considérée comme stable. Une entité dont la valeur du stade dynamique de la couverture la plus ancienne est supérieure à l'autre, est considérée en voie de régénération (valeur de A $>$ valeur de B, valeur de B $>$ valeur de C). A l'inverse, une entité dont la valeur du stade dynamique de la couverture la plus ancienne est inférieure à l'autre, est considérée en cours de dégénération (valeur de A $<$ valeur de B, valeur de B $<$ valeur de C).
- Sur ce critère synthétique, des cartes traduisant les changements de la végétation intervenus dans la période considérée sont produites. Elles aident à l'interprétation de l'évolution du milieu, en relation avec différents processus tels que la dynamique des populations de goélands nicheurs, l'embroussaillage des anciennes parcelles cultivées, et la végétalisation de certains secteurs anciennement mis à nu par la déflation éolienne ou en accrétion.

En parallèle, des matrices de transition sont réalisées pour exprimer graphiquement les changements intervenus dans la végétation, entre deux dates successives d'inventaire (Turner, 1987 ; Mendonça-Santos & Claramunt, 2001).

4.3. Résultats

Plusieurs types de résultats sont acquis dans le cadre de ces programmes, contribuant globalement à une meilleure connaissance des dynamiques de la végétation d'espaces littoraux protégés. La méthode étant identique sur l'ensemble des îlots du réseau, nous prendrons l'exemple des résultats concernant l'îlot de Béniguet.

4.3.1. Les dynamiques spatiales sur l'îlot de Béniguet

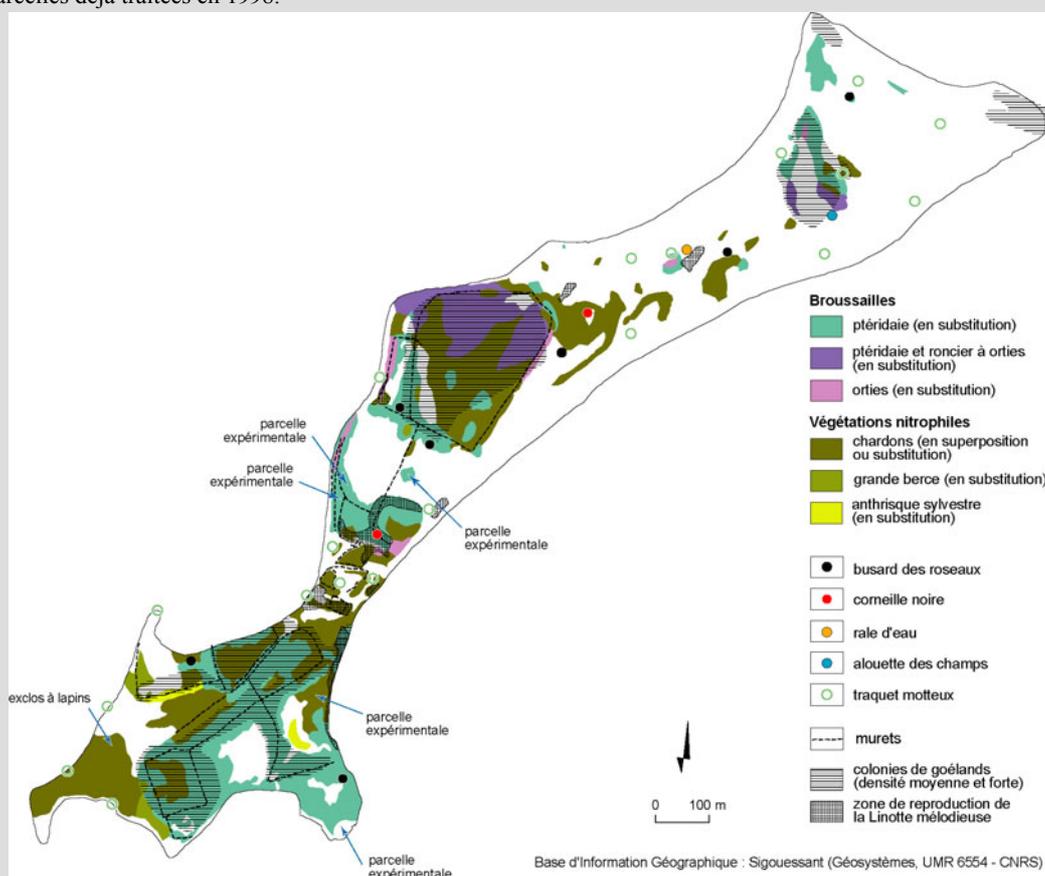
Concernant Béniguet (ill. 43 et 44), la base d'information géographique *Basîlots* a été mise en œuvre dans deux volets du programme Life : la mise au point du plan d'expérimentation sur les friches (encart 10) et l'analyse diachronique de la dynamique du tapis végétal de 1990 à 2000.

ENCART 10. La recherche des sites d'expérimentation sur les friches agricoles.

Les parcelles expérimentales ont été choisies sur le terrain en juillet 1999 et aussitôt mises en place. Le SIG a contribué à leur localisation par la production d'une carte élaborée à partir d'une requête spatiale simple visant à la recherche d'un site répondant à des critères thématiques ou spatiaux spécifiques (Joerin, 1995). Ces parcelles devaient en effet concerner un type particulier de végétation, broussailles ou végétations nitrophiles, et être localisées le plus loin possible des colonies de goélands nicheurs et en dehors des sites ponctuels de nidification d'oiseaux considérés comme sensibles à l'échelle de la réserve : goéland brun, busard des roseaux, alouette des champs, traquet motteux, linotte mélodieuse (Yésou *et al.*, 1999). Pour y parvenir, les données contenues dans la base d'information géographique *Basîlots* ont été mises à jour par l'intégration des données relatives aux sites de nidification relevés en 1998 lors d'une campagne de localisation menée au GPS différentiel. Les données les plus récentes concernant la végétation (1996) et l'emprise des colonies de goélands (1997) ont été mobilisées, de manière à en extraire l'information répondant aux critères requis :

- sélection des éléments de végétation correspondant à différents types de broussailles (formations à fougère aigle, orties et ronciers, chardons, grande berce, anthrisque sylvestre) ;
- sélection des nids d'espèces territoriales et des colonies d'espèces grégaires au sein ou à proximité des formations végétales sélectionnées ;
- exclusion des parcelles de végétation sélectionnées contenant un ou plusieurs nids ou situées en contiguïté avec des sites de nidification.

A l'issue de cette requête spatiale, une carte des sites potentiels d'expérimentation a été produite. Elle a permis de localiser les zones où les opérations pouvaient être mises en œuvre sans générer un quelconque dérangement vis à vis des oiseaux présents sur le site. A partir de ce document, des parcelles ont été mises en place sur des végétations de fougère à orties, chardon, et fougère à ombellifères. Les expérimentations estivales ont ensuite consisté en une fauche des parcelles identifiées, à la mise en place d'un exclos à lapins et à goélands et au renouvellement du traitement, notamment herbicide, sur deux parcelles déjà traitées en 1998.



Source : Bioret & Gourmelon, 2002

L'analyse des dynamiques de la végétation a mis en évidence les tendances suivantes. Du point de vue des principales formations végétales, entre 1990 et 1996 le fait marquant est la stabilité des pelouses littorales qui occupent aux deux dates des superficies équivalentes de l'ordre de 38%. Les broussailles progressent de 6% et les végétations nitrophiles diminuent de 4%. De 1996 à 2000, la tendance s'inverse puisque les pelouses littorales diminuent de 28% alors que les broussailles et les végétations nitrophiles progressent respectivement de 12% et de 18% (ill. 48 et 49).

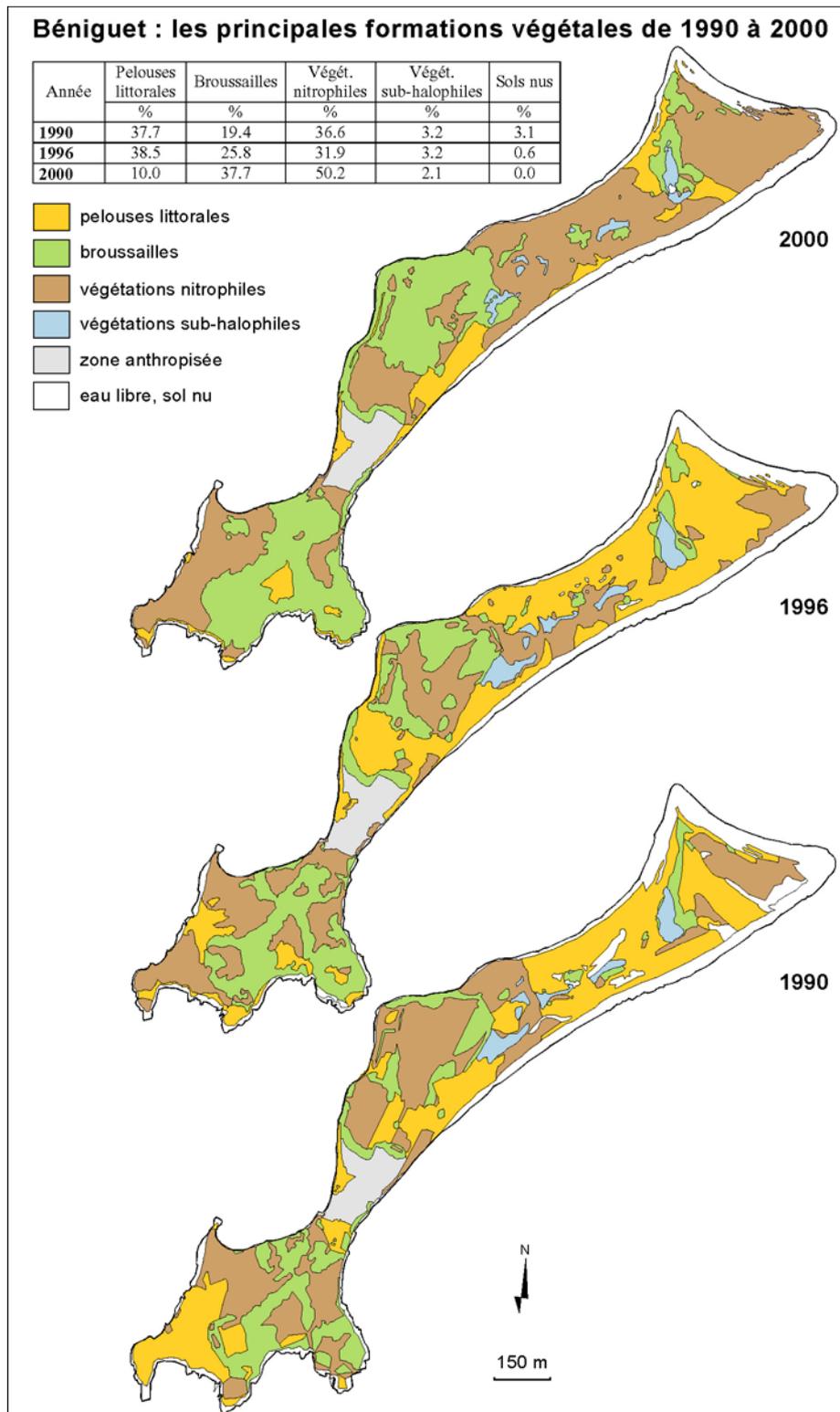


Illustration 48. Béniguet : les principales formations végétales de 1990 à 2000 (Bioret & Gourmelon, 2003).

Année	Pelouses littorales		Broussailles		Végét. nitrophiles		Végét. sub-halophiles		Sols nus	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
1990	19.6	37.7	10.1	19.4	19.0	36.6	1.7	3.2	1.6	3.1
1996	20.3	38.5	13.6	25.8	16.8	31.9	1.7	3.2	0.3	0.6
2000	5.3	10.0	20.0	37.7	26.6	50.2	1.1	2.1	0	0

Représentativité spatiale des principales formations végétales de 1990 à 2000

Année	Diversité (H)	Dominance (D)
1990	1.269	0.211
1996	1.219	0.242
2000	1.024	0.363

Indices caractérisant la végétation de 1990 à 2000

Année	Pelouses littorales		Broussailles		Végét. Nitrophiles		Végét. sub-halophiles		Sols nus	
	NP	MPS	NP	MPS	NP	MPS	NP	MPS	NP	MPS
1990	29	0.675	37	0.272	56	0.339	8	0.207	9	0.173
1996	33	0.611	34	0.394	71	0.238	7	0.252	8	0.03
2000	22	0.242	50	0.4	39	0.683	11	0.099	0	0

Indices caractérisant les différents types de végétation aux trois dates

Illustration 49. Les données quantitatives associées aux trois inventaires de la végétation réalisés sur l'îlot de Béniguet (d'après Gourmelon *et al.*, 2003).

Entre 1990 et 1996, le bilan des tendances dynamiques est marqué par une stabilité qui concerne plus de la moitié de la surface : 25% pour les groupements initiaux et les stades de superposition, et pour 30% les stades de dégradation plus élevés (3 et 4) (ill. 50 et 51). La dégénération affecte 26% de l'espace, incluant 14% de superficies présentant une dégénérescence faible (des groupements initiaux vers les stades de superposition) et 12% une dégénération forte caractérisée par l'apparition de groupements de substitution ou de substrats mis à nu. Le processus de restauration de la végétation concerne 17% de la surface, dont 9% concernent la régénération des groupements initiaux et 8% une régénération partielle se traduisant par une apparition des groupements de substitution sur d'anciens sols mis à nu ou par une restauration des stades de superposition. Entre 1996 et 2000, 66% de la surface sont stables. Cette stabilité concerne pour 30% les groupements initiaux et les stades de superposition, et pour 36% le groupement de substitution. La dégénération affecte 22% de l'espace, incluant 15% de milieux présentant une dégénération faible (du groupement initial vers le stade de superposition) et 7% une dégradation forte caractérisée par l'apparition de groupements de substitution. Le processus de régénération de la végétation concerne 12% de la surface, dont 4% présentent une régénération sous la forme de la restauration des groupements initiaux, et 8% une régénération partielle se traduisant par une apparition des stades de superposition.

L'analyse spatiale de la dynamique végétale de l'île de Béniguet, sur la période considérée, met en évidence deux processus marquants : la disparition des espaces de substrats mis à nu par revégétalisation progressive, et la diminution significative des surfaces de pelouses littorales, surtout depuis 1996, au profit des broussailles ou des végétations nitrophiles. Globalement, les changements sont importants, et peuvent trouver leur origine dans différents processus naturels ou anthropiques, qu'il s'agisse de l'extension de l'enfrichement, de la revégétalisation de secteurs dénudés, ou de l'impact des colonies de goélands.

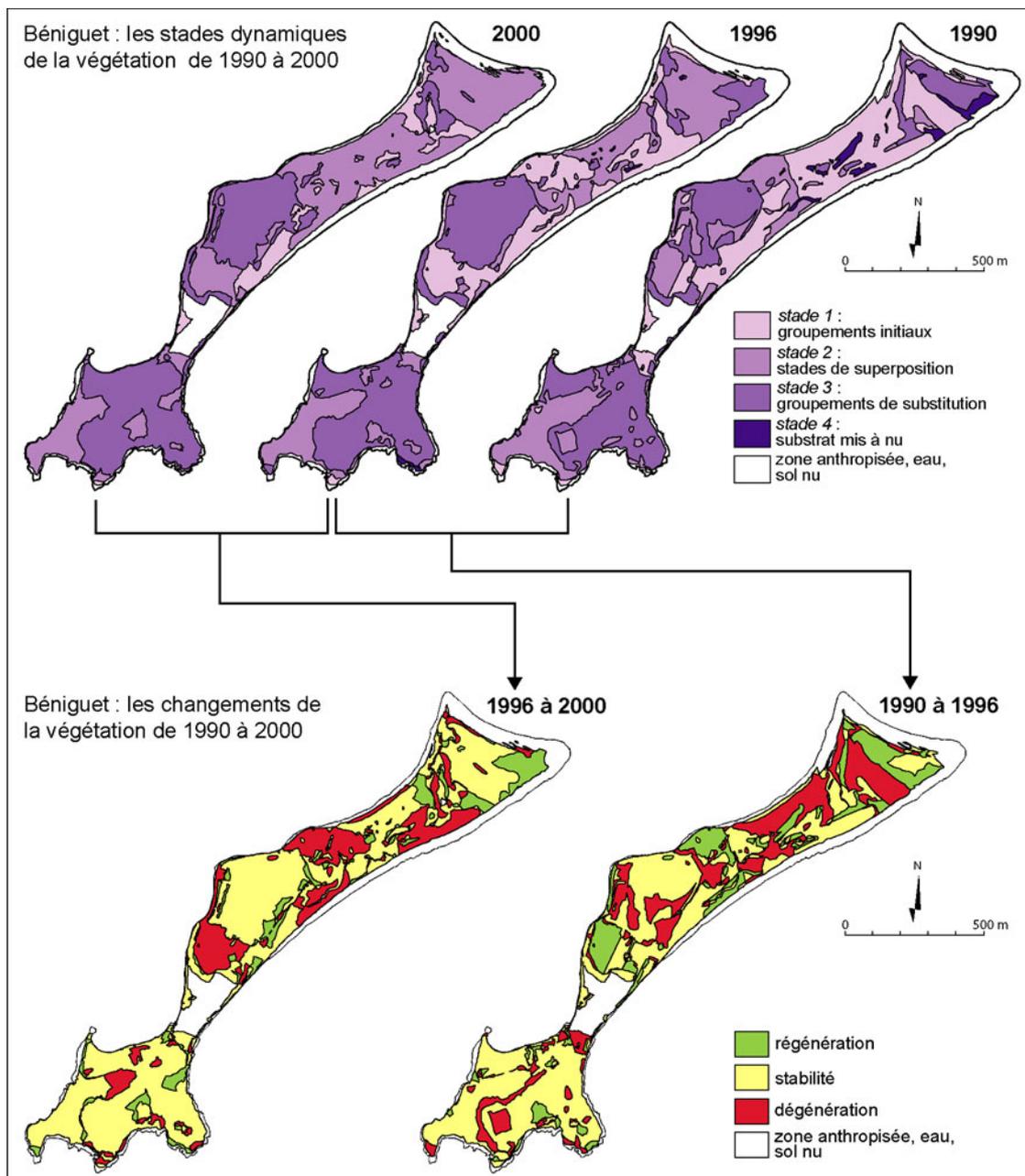


Illustration 50. Les stades dynamiques de la végétation de 1990 à 2000 et la synthèse des changements sur l'îlot de Béniguet (d'après Gourmelon *et al.*, 2003).

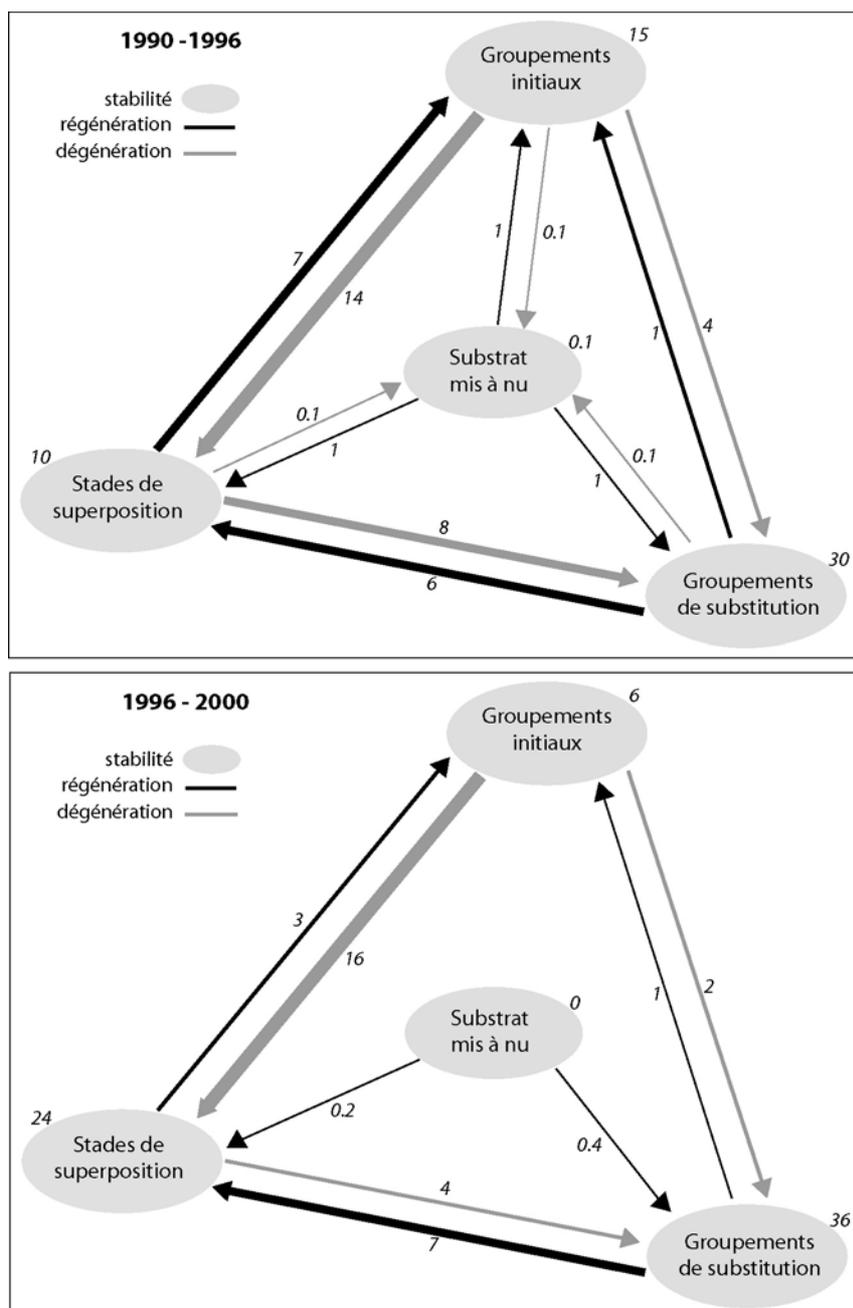


Illustration 51. Les matrices de transition exprimant les changements intervenus entre 1990-1996 et 1996-2000 sur l'île de Béniguet (d'après Gourmelon *et al.*, 2003).

- En ce qui concerne le processus d'enfrichement, si en 1990, les broussailles se cantonnaient aux abords des murs ceinturant les anciennes parcelles cultivées, ce n'est plus le cas en 1996. A partir de ces noyaux d'embroussaillage, les broussailles ont fortement progressé jusqu'à envahir totalement certains anciens champs. L'accessibilité et l'impact visuel sont altérés. Friches et broussailles sont en nette expansion, surtout dans la partie méridionale de l'île et au niveau des habitations. Dans ce secteur, seul un promontoire, à la pointe sud de l'île, est encore occupé par la pelouse littorale en 1996. Les dépressions arrière-dunaires, situées dans la partie nord de l'île, et caractérisées par des végétations hygrophiles plus ou moins saumâtres, ne présentent pas de variations de

surface entre 1990 et 1996, alors qu'ensuite, elles subissent un important embroussaillage.

- Le processus de revégétalisation concerne deux situations différentes. Les tempêtes de l'hiver 1989-1990, ont provoqué plusieurs brèches dans le cordon dunaire de la côte orientale de l'île, ce qui eut pour conséquence l'invasion de certains secteurs par la mer, entraînant localement la disparition totale du tapis végétal et une modification de la nature granulométrique du substrat. Six ans plus tard, ces secteurs mis à nu sont en cours de végétalisation par une végétation pionnière vivace caractéristique des hauts de grèves de galets. Au Nord de l'île, ce processus se produit très régulièrement à la partie sommitale du cordon de galets, au fur et à mesure de son accrétion. En effet, la stabilisation progressive des galets permet leur colonisation par une végétation pionnière.
- L'évaluation quantitative de l'impact des populations de goélands nicheurs sur le tapis végétal s'avère ardue. En effet, les données récoltées classiquement par la méthode des transects ne sont pas directement utilisables (ill. 52).

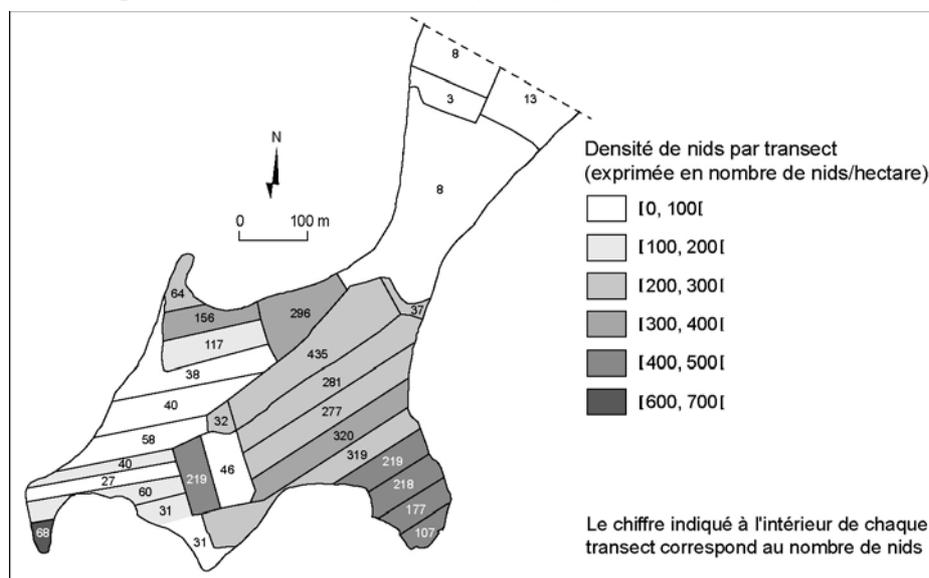


Illustration 52. La méthode des transects pour l'évaluation des populations de goélands de l'île de Béniguet (d'après Gourmelon *et al.*, 2003).

La densité des animaux y est supposée homogène, ce qui n'est pas le cas dans la réalité, les colonies ayant des contours parfois très sinueux sans aucune corrélation avec les mailles des transects. En 1997 et 2001, deux inventaires ont permis de cartographier l'emprise spatiale des colonies de goélands, en fonction de classes de densité. De même que la combinaison des stades dynamiques de la végétation de 1996 et de 2000 a été réalisée pour produire la synthèse des changements intervenus entre ces dates, les données relatives aux colonies de goélands en 1997 et 2001 ont fait l'objet d'une procédure de combinaison. La couche résultante, combinée à la couche synthétique des changements de la végétation donne des résultats peu convaincants (ill. 53).

En effet, il s'avère qu'une pression moindre de la population ne se traduit pas par une restauration simultanée de la végétation, pas plus qu'une pression croissante ne s'exprime par une dégradation significative. Donc, s'il existe une relation entre l'état du tapis végétal et la présence des goélands, elle reste à démontrer en tenant compte du fait que les conséquences éventuelles sur la structure et la composition du tapis végétal ne sont probablement perceptibles qu'au bout d'un certain laps de temps, et que les densités de

goélands présentent d'importantes variations interannuelles. Un suivi des effectifs de goélands nicheurs selon ces méthodes (transect, contour des principales colonies) et avec un pas de temps équivalent à celui du suivi de la végétation semble donc inapproprié à l'analyse des relations entre ces deux paramètres. La localisation annuelle d'un échantillon de nids pourrait être une solution à envisager (Gibbs *et al.*, 1999), de manière à fournir des données pertinentes à l'évaluation quantitative de l'impact des colonies sur la végétation et à la modélisation de l'habitat potentiel d'espèces d'intérêt patrimonial (Herr & Queen, 1993).

DYNAMIQUE DES MILIEUX (%)	PRESSION DE LA POPULATION DE GOELANDS (DE 1997 A 2001)		
	équivalente	inférieure	supérieure
restauration	0.6	3.5	2
stabilité	32.5	36.7	15.9
dégradation	1.6	4.9	2.3

Pression des colonies de goélands *versus* changements de la végétation. Les valeurs sont exprimées en pourcentage de surface concernée par les colonies

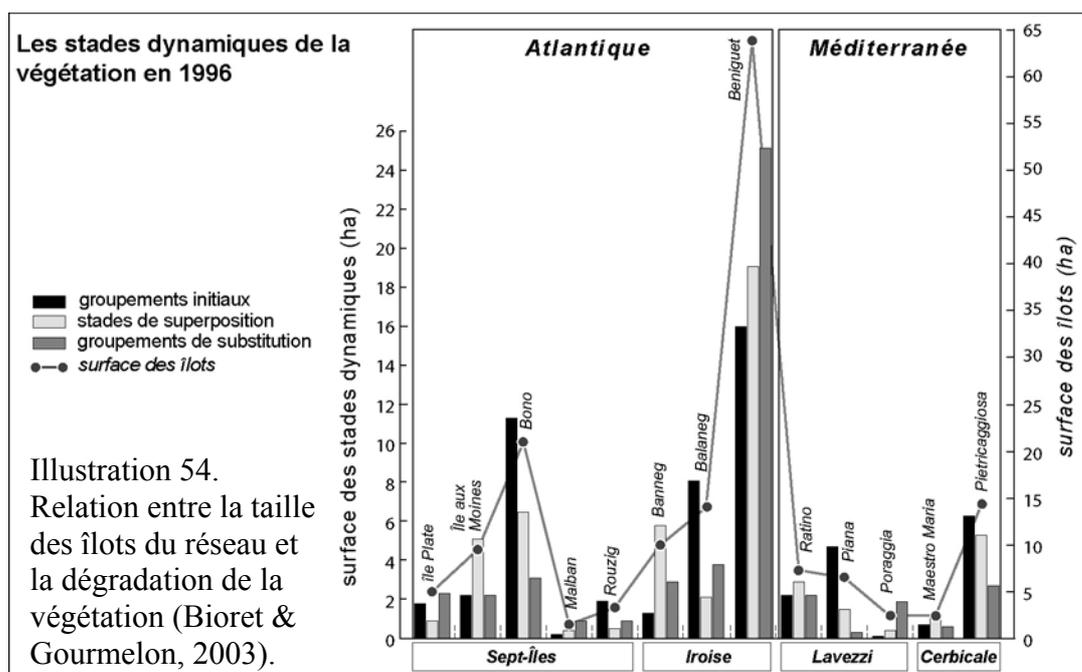
Illustration 53. Les résultats de l'analyse combinée changements de la végétation *versus* pression des colonies de goélands (d'après Gourmelon *et al.*, 2003).

4.3.2. Bilan régional de l'état phytocœnotique des îlots marins en réserve

En adoptant la même méthode que celle utilisée pour l'analyse des dynamiques végétales de Béniguet, différents résultats sont produits sur l'ensemble des îlots en réserve. Ainsi, des approches comparatives peuvent être menées dans la perspective d'établir une relation avec les facteurs zoogènes présents sur les différents îlots.

Analyse comparée des situations en 1996.

Le seul inventaire commun à l'ensemble des îlots du réseau date de 1996. L'étude des cartes et des recensements ornithologiques permet de dresser les constats suivants (ill. 54).



Sur les plus petits îlots du réseau, qui présentent parallèlement peu de séries dynamiques, la pression des oiseaux marins nicheurs se traduit par une proportion importante des

groupements de substitution par rapport aux autres stades dynamiques. C'est le cas de Malban et de l'île Plate aux Sept-Îles et de Porragia aux Lavezzi. A l'inverse, les plus grands îlots présentent, sur des superficies importantes, des groupements initiaux et de superposition ; à l'exemple de Piana aux Lavezzi, où ils occupent 96% de la surface végétalisée en 1996. Sur les îlots qui disposent d'estimations relatives aux effectifs de couples nicheurs, une relation qualitative peut être établie entre l'état du tapis végétal et les colonies d'oiseaux présentes. Ainsi, sur Piana, l'appartenance de seulement 4% de la végétation aux groupements de substitution totale est corrélée à la stabilité des populations de goélands nicheurs depuis une dizaine d'années.

Analyse des dynamiques sur les îlots de la mer d'Iroise et des Sept-Îles.

Sur les îlots de Banneg, Balaneg et Béniguet, deux inventaires sont disponibles (1990 et 1996). En adoptant la méthode de regroupement des différentes unités de végétation appartenant au même stade de dégradation, quelles que soient leurs séries d'appartenance, la synthèse des changements survenus entre ces deux dates est analysée. Sur ces îlots, on constate une amélioration générale de l'état du tapis végétal, avec un gain significatif des groupements initiaux et une diminution des groupements de superposition et de substitution, néanmoins pondérés sur Béniguet. Le bilan des tendances dynamiques de la végétation donne les résultats suivants (ill. 55):

- Sur Balaneg, la stabilité concerne 62% de la végétation, la régénération 33% et la dégradation 5% ;
- Sur Banneg, la stabilité concerne un tiers de la surface, la régénération touche 42% et la dégradation affecte environ 25% ;
- Sur Béniguet, la stabilité concerne 55% de la végétation, la régénération s'exprime sur environ 20% alors que la dégradation touche 25%.

Dans le même temps, les situations concernant les populations de goélands et de lapins sont diverses sur ces trois îlots. Ainsi sur Balaneg, les effectifs de goélands nicheurs sont stables, alors que sur Banneg ils décroissent et qu'au contraire sur Béniguet, ils augmentent (Bioret, 2002). Quant à la population de lapins, elle est décimée sur l'île de Banneg en 1993 par le virus VHD, elle décroît sur Balaneg et augmente sur Béniguet. Ce constat pourrait laisser supposer que l'amélioration de l'état de la végétation des îlots de Banneg et de Balaneg est à attribuer à la disparition du lapin, qui en retour, favorise le développement des ronciers (Bioret *et al.*, 1995). Une restauration moindre de la végétation de Béniguet pourrait être liée à la forte dynamique démographique de l'avifaune nicheuse, qui profite peut-être de l'installation des goélands présents antérieurement sur l'îlot de Banneg (Yésou *et al.*, 1999).

Sur les Sept-Îles, les inventaires successifs réalisés en 1995 et 2002 mettent en évidence les tendances suivantes (ill. 56) :

- Sur Rouzic, dont la végétation est plutôt stable (51%), on note toutefois une nette augmentation de la surface mise à nu (stade 4) qui est à mettre en relation avec l'extension vers le Sud de la colonie de fous de Bassan, et la mise à nu d'un nouveau site de prélèvement de matériaux herbacés à l'Est de l'îlot ;
- Sur Malban, la régénération de la végétation sur 58% de la surface est à attribuer à la régression des groupements de substitution ;

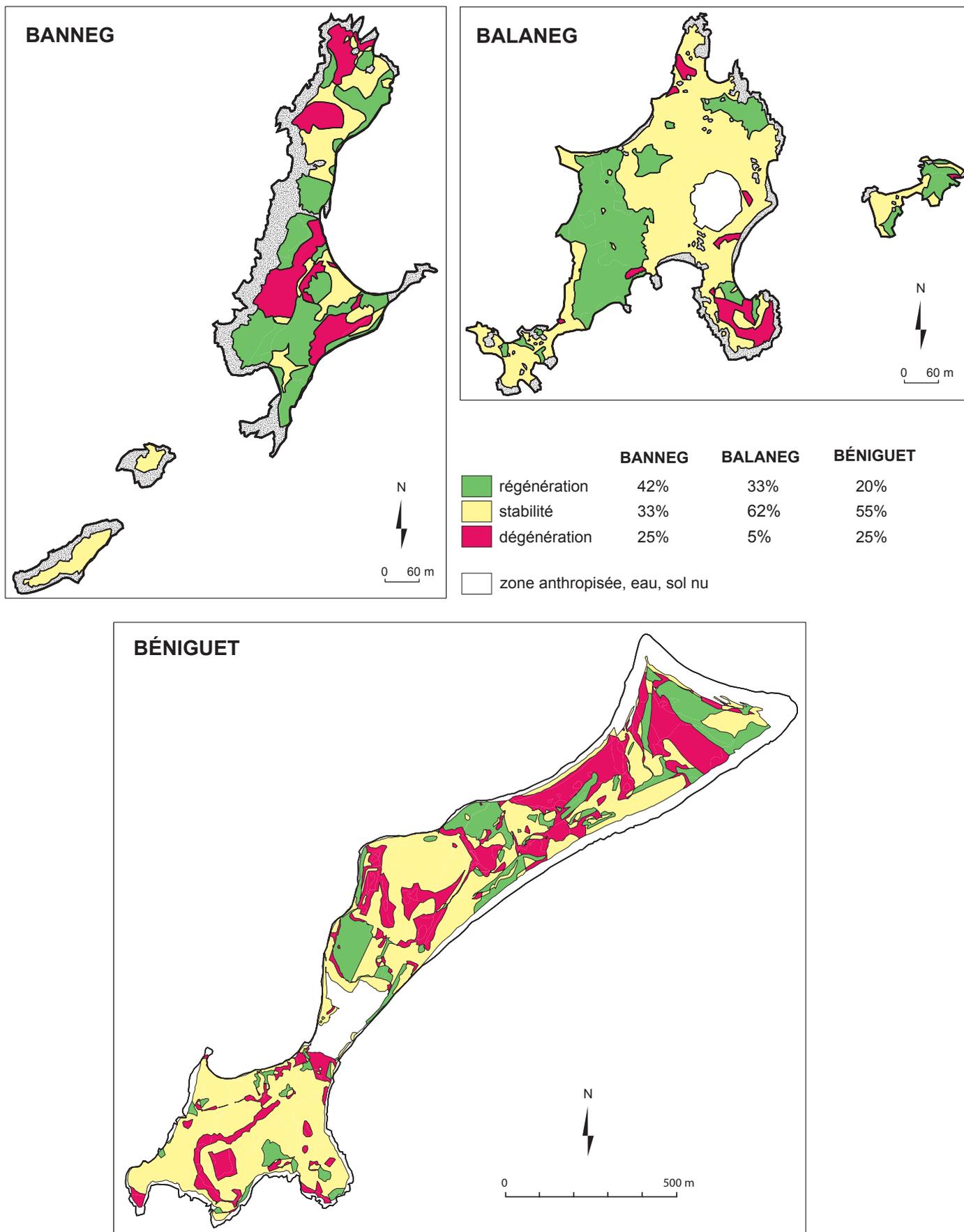


Illustration 55. Dynamique des milieux sur les îlots de la mer d'Iroise (1990-1996) (d'après Bioret & Gourmelon, 2003 ; Gourmelon et al., 2003).

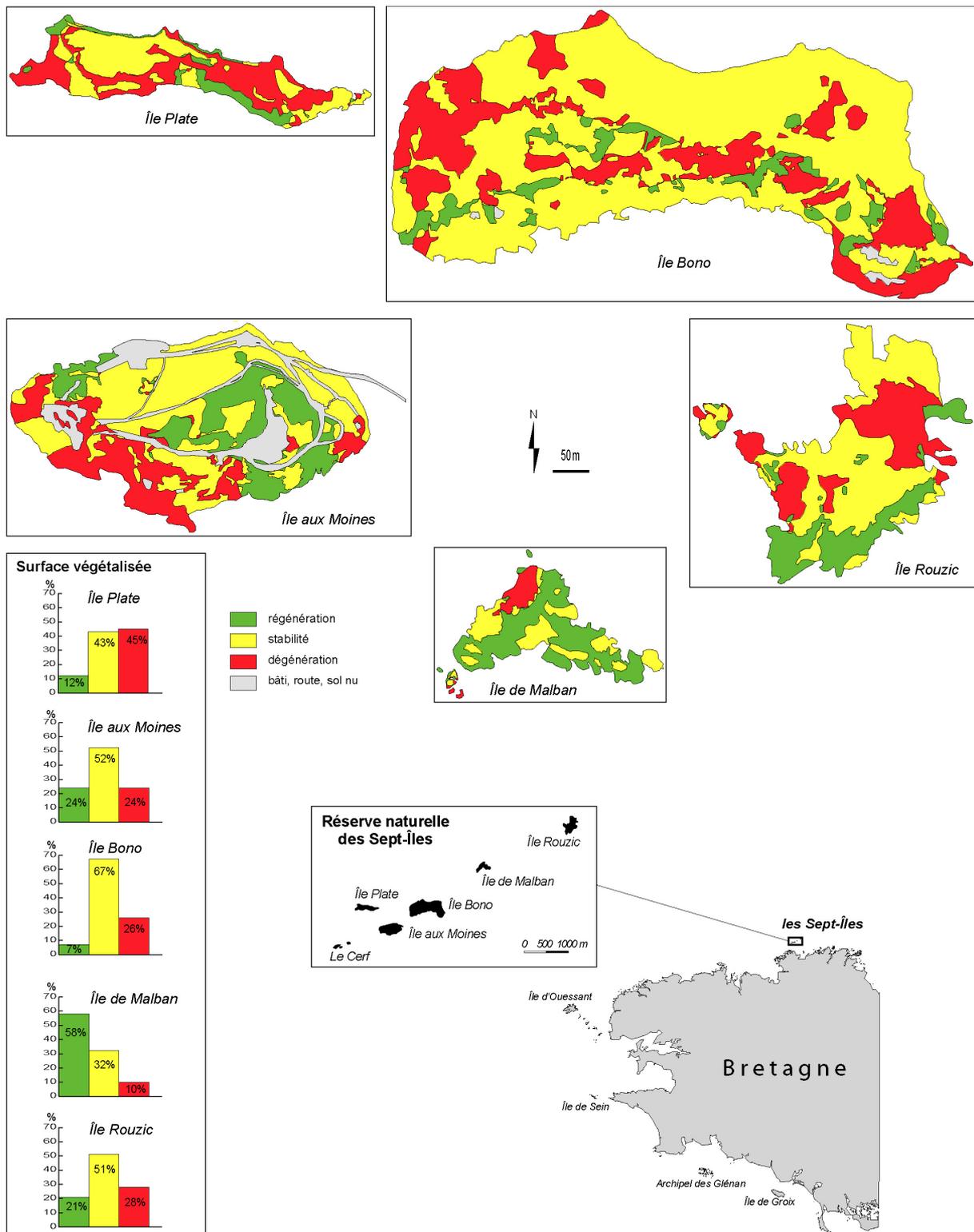


Illustration 56. Dynamique des milieux sur les îlots de l'archipel des Sept-Îles (1995-2002) (d'après Bioret & Gourmelon, 2003).

- Sur Bono, dont la végétation est la plus stable de l'archipel (67%), la tendance est néanmoins à la baisse des stades 1 et 2, et à l'augmentation du stade 3, notamment dans la moitié sud de l'îlot, dans les sites de nidification des goélands ;

- Sur l'île aux Moines, qui présente les mêmes tendances que l'île Rouzic, les stades de superposition ont fortement progressé au détriment des stades 1 et 3, surtout dans la partie centrale de l'île ;
- L'île Plate présente une dégénération forte (45%) qui se traduit par une importante diminution des groupements initiaux au profit des stades de substitution et de superposition. Cette tendance dynamique est la conséquence d'une fermeture des milieux, notamment de la pelouse à dactyle en stade initial située au centre et au Sud de l'îlot qui a fortement régressé. On peut s'interroger sur la relation existant entre ce processus dynamique et l'éradication des rats menée en 1994 par l'INRA.

Synthèse des tendances dynamiques sur l'ensemble du réseau.

La comparaison des états successifs de la végétation, entrepris dans un contexte national de suivis à long terme des îlots marins protégés permet de mettre en évidence différentes tendances diachroniques. En affectant à chaque îlot du réseau la tendance dynamique majoritaire, il apparaît clairement des situations diverses d'un ensemble géographique à l'autre et à l'intérieur d'un même archipel (ill. 57). Ces résultats synthétiques sont facilement

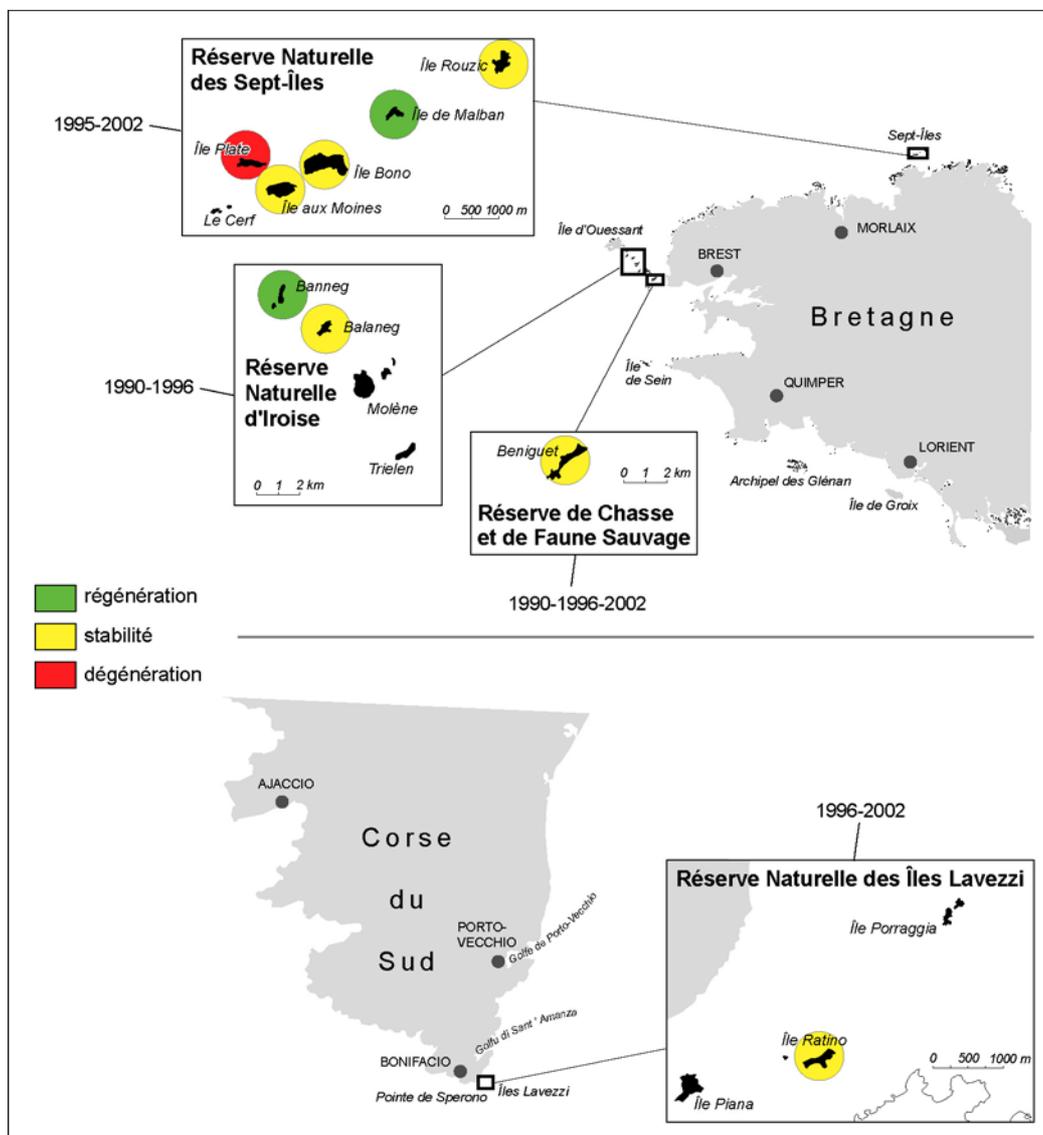


Illustration 57. Synthèse des changements constatés lors du suivi de la végétation des îlots marins protégés.

interprétables par les gestionnaires qui peuvent établir des relations de cause à effet avec les conditions anthropo-zoogènes constatées sur le terrain. Ils permettent également de mettre en évidence des espaces « sensibles » dont l'évolution spatio-temporelle préoccupante du point de vue de la qualité du tapis végétal justifierait un suivi plus précis et d'éventuelles mesures de gestion.

4.4. Conclusions

Le suivi à long terme instauré sur les îlots marins protégés depuis une dizaine d'années permet de dresser des inventaires spatiaux et diachroniques de leur végétation terrestre. Ils contribuent à une meilleure connaissance du fonctionnement écosystémique de ces milieux de référence. Grâce à l'effort de mise en cohérence de la nomenclature, des échelles spatiales et du traitement numérique de l'information géographique, des comparaisons diachroniques et synchroniques sont également réalisées au sein du réseau atlantique et méditerranéen et un outil commun d'évaluation des changements sur le long terme est proposé. De plus, par des synthèses cartographiques accessibles aux non-phytosociologues, la démarche adoptée apporte aux gestionnaires des éléments de réflexion pouvant contribuer efficacement à leur prise de décision et peut être utilisée pour évaluer l'impact des mesures de gestion.

Le recours à la géomatique a contribué significativement aux résultats acquis, en particulier au niveau de l'analyse des changements spatio-temporels. Les tendances dynamiques mises en évidence par différentes méthodes spatiales témoignent de la complexité des processus qui façonnent la physionomie des milieux semi-naturels et dont la compréhension justifie de recourir à des méthodes d'analyse basées sur la modélisation en complément des investigations menées au sein du SIG. Néanmoins, la démarche adoptée soulève un certain nombre de problèmes méthodologiques relatifs aux risques de propagation d'erreurs dans un SIG multi-temporel (Cheylan *et al.*, 1994 ; Cherrill & Mc Clean, 1995). En effet, l'introduction des données dans un système géoréférencé et l'analyse combinée de plusieurs états imposent de disposer d'informations acquises sur la base de données de référence dont l'actualité et l'échelle spatiale soient pertinentes avec les mesures de terrain et avec les modèles biologiques. Si l'intérêt des suivis à long terme des espaces protégés est indiscutable, pour tirer profit de l'effort réalisé en termes de collecte et d'analyse des données, il est indispensable d'évaluer la pertinence de l'utilisation de méthodes géomatiques adaptées à l'étude de processus environnementaux impliquant des observations à grande échelle, telles que la géodésie spatiale, la photogrammétrie et la télédétection, qui ont connu depuis peu des avancées tout à fait significatives.

5. L'HABITAT DU GRAND DAUPHIN EN MER D'IROISE

5.1. Présentation du contexte

De nombreuses recherches témoignent de l'intérêt des systèmes d'information géographique pour la mise en œuvre de stratégies conservatoires (Clark & Slusher, 2000). Ainsi, aux Etats-Unis, le programme GAP (Gap Analysis Program) de l'USGS (United States Geological Survey) propose une méthode d'évaluation des habitats d'intérêt patrimonial au sein du réseau des espaces protégés. Cette approche est basée sur la complémentarité de la télédétection, des SIG et de la modélisation (Scott *et al.*, 1993 ; Davis *et al.*, 1990). En dix ans, les diverses applications du programme ont conduit à identifier des espaces d'intérêt majeur non pris en compte dans le zonage des réserves existantes, en se basant essentiellement sur la notion d'habitat potentiel⁸ et sur la prise en compte des zones de connexion biologique (Wiens, 1996).

Sur une problématique de compréhension du fonctionnement de l'écosystème marin et d'aide à la gestion d'un espace protégé, le projet *Tursiops* (programme européen Interreg IIC) a été mené en se basant sur la constitution d'un réseau d'étude des grands dauphins côtiers (Liret *et al.*, 2003). En rassemblant les compétences de trois équipes scientifiques⁹, ce projet avait pour objectif de contribuer à la réflexion sur la gestion des espaces naturels côtiers par une approche comparative des relations écologiques entre les grands dauphins de la façade atlantique européenne et leur environnement (ill. 58).

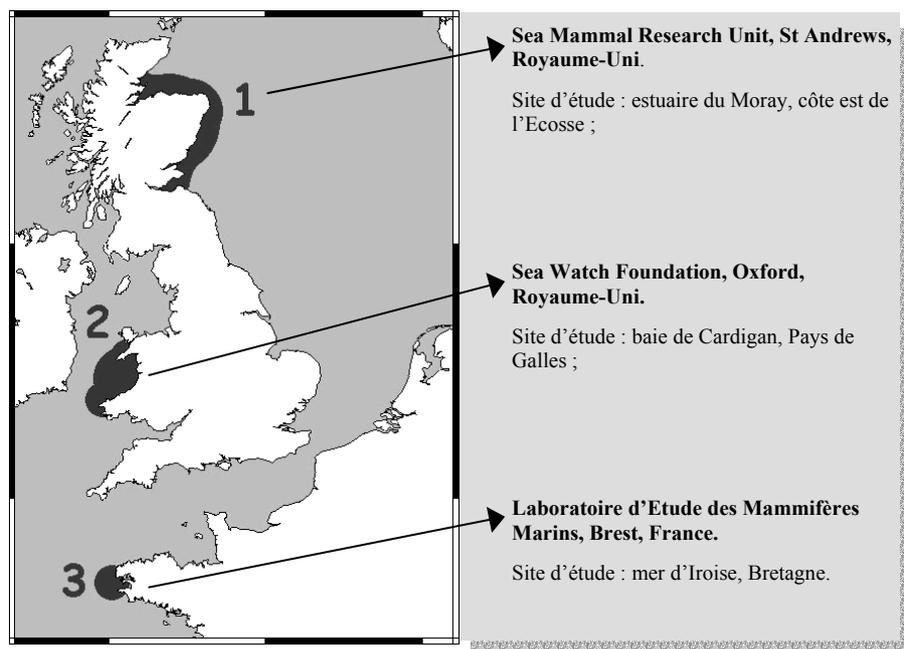


Illustration 58. Les sites du réseau européen *Tursiops* (d'après Liret *et al.*, 2003).

⁸ L'habitat est un ensemble indissociable constitué d'une part d'un compartiment stationnel caractérisé par un certain nombre de variables telles que les conditions climatiques, la nature et les propriétés physico-chimiques du substrat, ... correspondant au biotope, et d'autre part d'une communauté d'organismes vivants (faune et flore), correspondant à la biocénose (Bioret, 2002). L'habitat potentiel est donc défini comme une zone présentant des caractéristiques environnementales favorables pour les animaux.

⁹ Sea Mammal Research Unit (Région Highland, Ecosse), Sea Watch Foundation (Pays de Galles), laboratoire d'Etude des Mammifères Marins et laboratoire Géomer (Région Bretagne, France).

Dans ce contexte, l'approche engagée prévoyait la mise en œuvre d'une base d'information géographique permettant de rassembler l'ensemble des données disponibles sur les trois sites et susceptibles d'être utilisées dans l'analyse de l'espace actuellement fréquenté par le grand dauphin et dans la modélisation de son habitat potentiel. La première étape de ce projet a donc consisté à dresser l'inventaire des données disponibles sur les trois sites. Présenté sous la forme d'un catalogue normalisé (norme européenne ENV12657), alimenté par des métadonnées descriptives, il a révélé des situations différentes quant à la disponibilité des données environnementales exploitables dans le cadre d'une approche comparative des habitats du grand dauphin le long de la façade atlantique européenne (ill. 59). Il apparaît, en effet, que seule l'équipe française dispose à ce jour d'une base d'information géographique structurée (*Iroise*), permettant de mener à bien une application pilote concernant les deux groupes sédentaires présents au large des côtes finistériennes.

PARAMETRES ENVIRONNEMENTAUX	COTE EST DE L'ECOSSE	BAIE DE CARDIGAN	MER D'IROISE
<i>Paramètres physiques</i>			
Bathymétrie	Toute la zone	SAC	Toute la zone
Courants de marée	Toute la zone	<i>nd</i>	Toute la zone
Houle	<i>nd</i>	<i>nd</i>	Un point de relevé
Température de surface	Estuaire du Moray	Toute la zone	Toute la zone
Salinité de surface	Estuaire du Moray	<i>nd</i>	<i>nd</i>
Sédimentologie sous-marine	Toute la zone	SAC	Toute la zone
Faciès biosédimentaire	<i>nd</i>	<i>nd</i>	Toute la zone
<i>Paramètres biologiques</i>			
Qualité de l'eau	<i>nd</i>	<i>nd</i>	Plusieurs points de relevé
Productivité primaire	<i>nd</i>	Toute la zone	Archipel de Molène
Faune	Toute la zone	<i>nd</i>	<i>nd</i>
Cétacés	Toute la zone	Toute la zone	<i>nd</i>
Grand dauphin	Toute la zone	SAC	Archipel de Molène et île de Sein
<i>Paramètres anthropiques</i>			
Activités humaines	Estuaire du Moray	<i>nd</i>	Archipel de Molène et île de Sein
Statistiques de pêche	<i>nd</i>	<i>nd</i>	Toute la zone

nd : donnée non disponible

Illustration 59. Résultat de l'inventaire de données réalisé dans le cadre du réseau *Tursiops* (d'après Liret *et al.*, 2003).

Le grand dauphin (*Tursiops truncatus*) fréquente toute l'année l'espace côtier de la mer d'Iroise dont il est une des espèces emblématiques (ill. 60). Son étude, menée par le laboratoire d'Etude des Mammifères Marins (Océanopolis, Brest) depuis 1990, inclut le mode

d'utilisation de l'espace côtier par les populations résidentes, leur répartition spatio-temporelle, ainsi que la caractérisation de leur habitat et du degré d'interactions avec les activités humaines. Les résultats acquis sur la base d'un suivi régulier ont mis en évidence, d'une part la présence de deux groupes résidents, l'un de vingt individus aux abords de l'île de Sein et l'autre d'une trentaine d'animaux dans l'archipel de Molène, et d'autre part l'existence de secteurs préférentiels au sein de leur domaine de fréquentation (Liret, 2001). Ils sont en accord avec les observations réalisées sur d'autres groupes de grands dauphins côtiers, qui suggèrent également des relations entre leur présence et certaines caractéristiques environnementales (Wilson *et al.*, 1997 ; Baumgartner, 1997). Ces hypothèses ont justifié la recherche présentée et le recours à un SIG pluridisciplinaire.

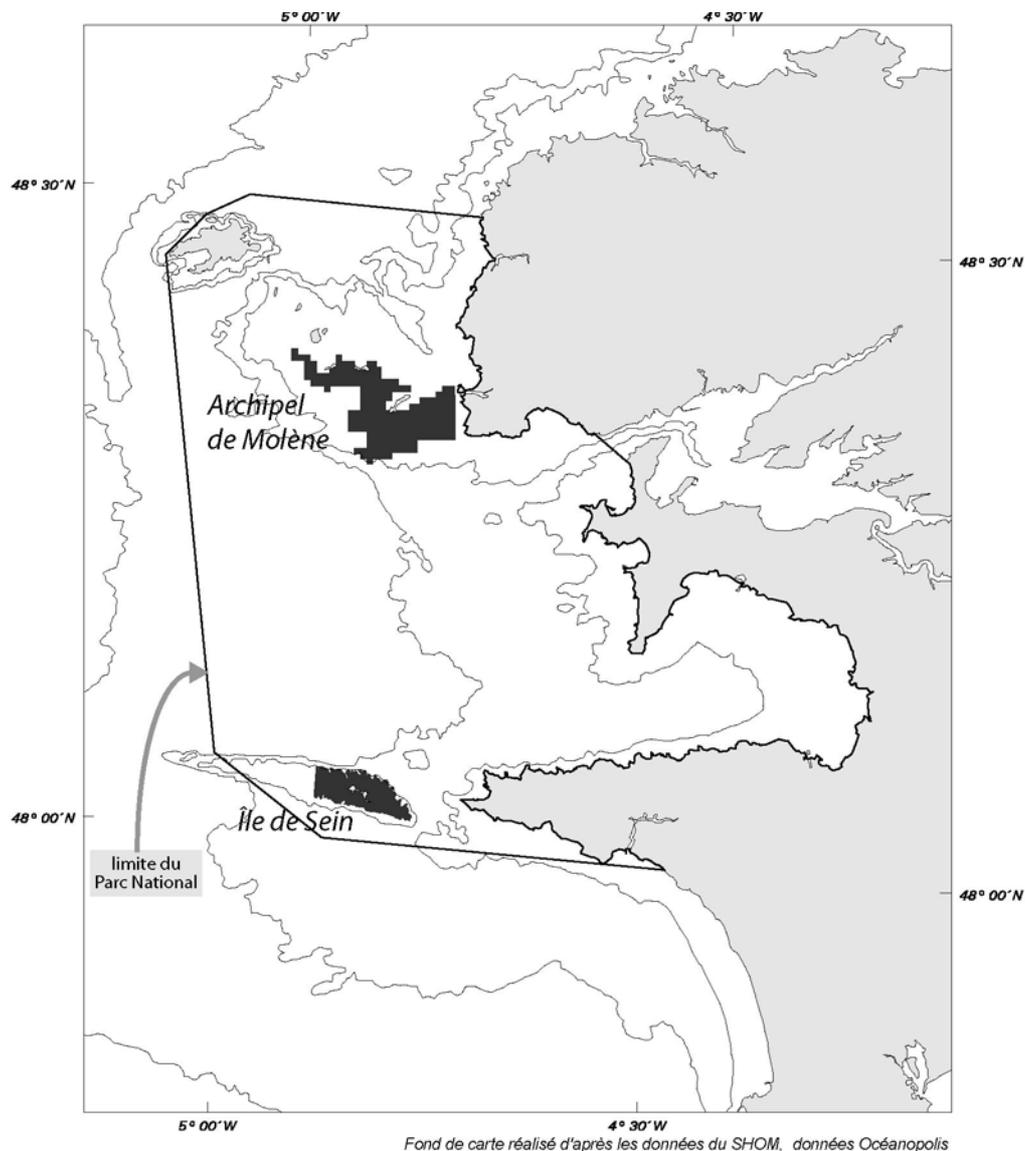


Illustration 60. La localisation des deux groupes de grands dauphins résidant en mer d'Iroise (d'après Liret *et al.*, 2003).

A l'échelle locale, la problématique est d'analyser les relations qui existent entre la distribution géographique des grands dauphins présents autour de l'île de Sein et les paramètres environnementaux disponibles, de manière à répondre à l'hypothèse d'un éventuel déterminisme spatial du groupe. Dans une seconde étape, une analyse régionale du relief sous-marin de la mer d'Iroise est réalisée dans la perspective de caractériser les deux sites fréquentés par *T. truncatus* et selon une approche transposable au réseau européen *Tursiops*.

5.2. Paramètres bathymétriques et courantologiques des sites préférentiels

La zone d'étude se situe aux abords immédiats de l'île de Sein, limités par l'isobathe des 10 mètres (de 48°02'N à 48°04'N en latitude et de 4°54'W à 4°48'W en longitude). Cet espace côtier est inclus dans le périmètre du Parc Naturel Régional d'Armorique et est actuellement concerné par le projet de création d'un parc national marin en Iroise (ill. 60). L'objectif de la recherche est d'analyser par des procédures spatiales et statistiques les relations existant entre le groupe de grands dauphins et les deux uniques paramètres environnementaux disponibles localement : la bathymétrie et les courants de marée.

5.2.1. Données et production d'informations géoréférencées

Les données relatives à la répartition spatiale des grands dauphins de l'île de Sein ont été collectées entre 1994 et 1996 selon la méthode de l'échantillonnage instantané¹⁰. Chaque observation inclut la date, l'heure, la position géographique du groupe et son activité (prospection alimentaire, repos et déplacement). Ces données sont ensuite reportées sur un quadrillage de la zone d'étude, réalisé à partir de la carte marine du secteur à 1 : 20 000 (SHOM, 1977). Le nombre d'observations par élément de surface, représentant sur le terrain un carré d'environ 200 mètres de côté, renseigne ainsi sur son intensité d'utilisation par les dauphins. La numérisation des données au sein de la base d'information géographique *Iroise* est réalisée manuellement en mode vectoriel. Le référentiel cartographique utilisé est le Lambert 2 (système géodésique NTF, ellipsoïde de Clarke 1880). Chaque polygone, correspondant à un élément du quadrillage d'origine est décrit par les attributs suivants : surface, périmètre, numéro de cellule. Ce numéro de cellule fait le lien avec divers fichiers de données utilisés selon la problématique. Ainsi, en ce qui concerne le rôle de la bathymétrie dans la répartition spatiale du groupe, une synthèse des données d'observation acquises entre 1994 et 1996, est réalisée. La couche d'information résultante inclut, dans ce cas, le nombre d'observations (tous types d'activités, prospection alimentaire, repos, déplacement) (ill. 61) et le pourcentage de roches émergées. Pour l'analyse des courants, les observations, associées à un moment de la marée, sont divisées en deux lots en fonction des deux coefficients, puis regroupées par heure de marée. Pour chaque classe, des fréquences relatives d'observation indiquant l'intensité d'utilisation des mailles sont calculées globalement et par activité.

¹⁰ L'échantillonnage instantané est une méthode de terrain qui consiste à enregistrer à des moments précis, définis par un intervalle de temps régulier, différents paramètres concernant les animaux observés (Liret, 2001). Dans cette étude, les données sont acquises toutes les cinq minutes.

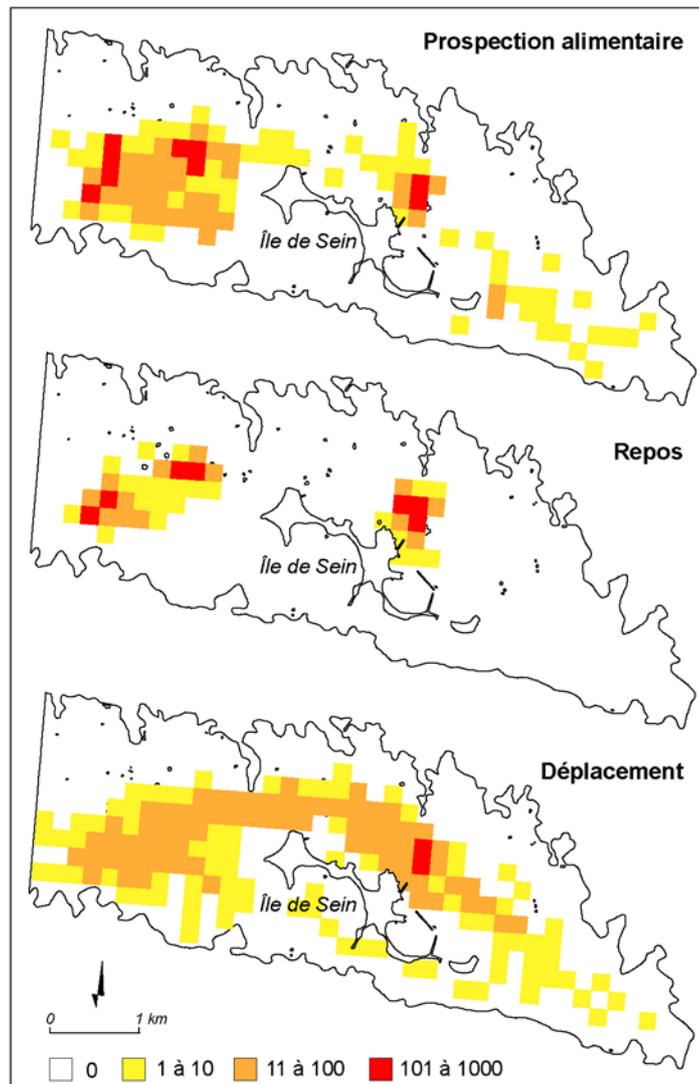
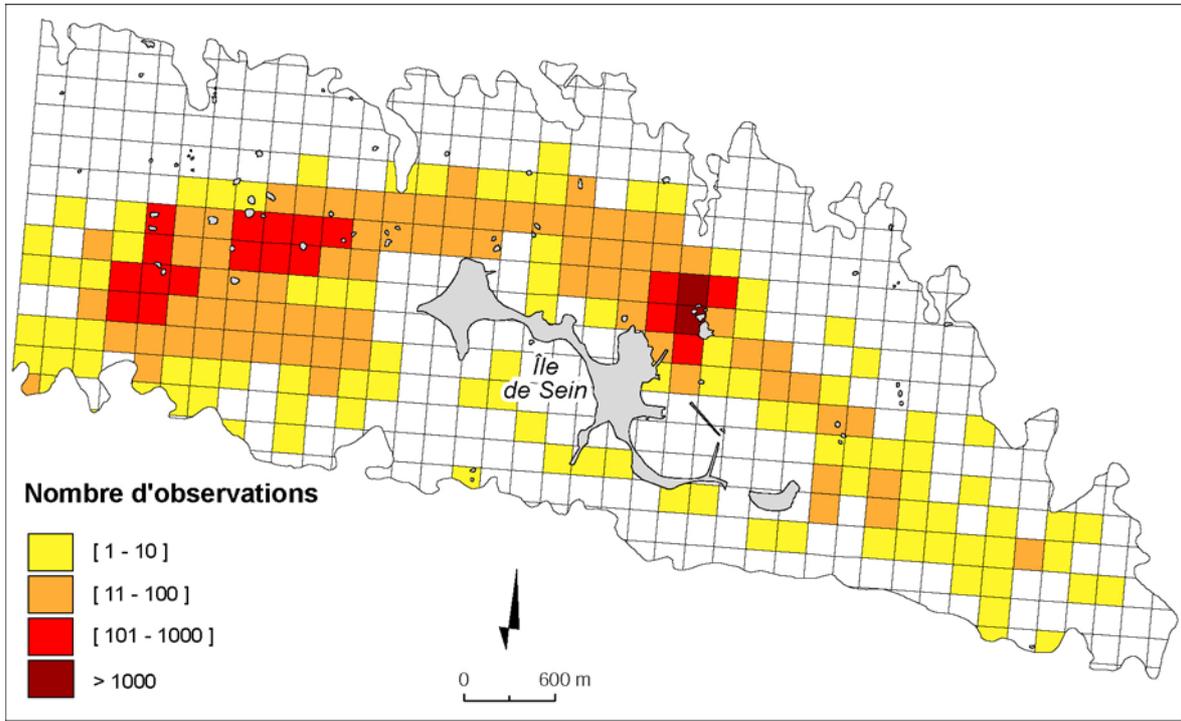


Illustration 61. La couche d'information résultant de l'intégration des données d'observation du groupe résidant aux abords de l'île de Sein (1994-1996) (d'après Liret *et al.*, 2000).

Les sondes bathymétriques ont été fournies¹¹ par le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) sous forme numérique. Aux 26 159 sondes disponibles sur la zone d'étude dans la Base de Données Bathymétriques (BDBS), sont associées les coordonnées géographiques, la profondeur d'une précision décimétrique et la date d'acquisition. Ces sondes sont stockées dans une couverture d'entités ponctuelles qui fait l'objet d'une projection cartographique en Lambert 2 (ill. 62). Elles servent à calculer un Modèle Numérique de Terrain qui est ensuite utilisé pour décrire la morphologie des fonds sous-marins selon différents critères ainsi que la hauteur d'eau dans un cycle de marée.

L'intensité et la direction du courant de marée sont issues de l'atlas numérique des courants, réalisé par le SHOM à partir d'une modélisation bidimensionnelle validée par des mesures *in situ* (ill. 63). Ce modèle, produit à l'aide du logiciel Télémac (LNH-EDF, SOGREAH), permet de calculer les valeurs de courant de surface pour deux coefficients de marée, morte eau moyenne (coefficient 45) et vive eau moyenne (coefficient 95), sans prise en compte du vent, de la houle, et des effets très locaux au voisinage de la côte (SHOM, 1994). La stratification verticale du courant pouvant être considérée comme négligeable dans les zones peu profondes, ces données de surface sont adaptées à l'étude de l'habitat côtier du grand dauphin en mer d'Iroise. Dans la base d'information géographique *Iroise*, les courants sont stockés sous forme d'une couverture de points. Chaque point, qui correspond au centre d'une maille de 100 mètres de côté, possède 52 attributs, décrivant à chaque heure de deux marées de coefficients 45 et 95 (deux fois 13 états successifs), la vitesse (en nœuds) et la direction du courant (en degrés par rapport au Nord géographique).

5.2.2. Méthodes d'analyse

A partir des données extraites de la BDBS du SHOM, un Modèle Numérique de Terrain est calculé. Plusieurs méthodes d'interpolation locales, destinées à restituer le plus fidèlement possible le détail de la configuration du fond sont testées : la triangulation de Delaunay (TIN), la méthode de l'inverse des distances, le module Topogrid d'Arc Info, la fonction Splines et le krigeage (Matheron, 1970). La zone à interpoler est divisée en deux lots, un échantillon de base et un échantillon test ; les valeurs du premier étant utilisées pour interpoler celles du second (Arnaud & Emery, 2000). C'est la triangulation de Delaunay¹²

¹¹ L'obtention de ces données résulte d'une convention de prêt entre le producteur et les utilisateurs.

¹² La méthode TIN (*Triangulate Irregular Network*) est basée sur la connexion linéaire des points échantillonnés pour former un réseau triangulaire, ou triangulation de Delaunay. Deux méthodes d'interpolation sont proposées par le logiciel Arc Info. La première est une interpolation linéaire fournissant une restitution grossière ou « pyramidale », caractérisée par des discontinuités abruptes, surtout dans les secteurs décrits par peu de données. La seconde, basée sur un polynôme de 5^{ème} degré (méthode d'Akima), considère que les variations de surface sont progressives et permet de produire des surfaces plus lissées. Compte tenu de leur caractère relativement simpliste, ces méthodes ne conviennent que lorsque les données disponibles présentent une densité suffisante et surtout lorsqu'elles prennent en compte les éléments structurants du relief et les discontinuités brutales, qui peuvent être intégrés aux données d'entrée sous forme de couvertures d'arcs. Enfin, l'interpolation linéaire respecte strictement la donnée d'entrée, contrairement à la méthode d'Akima qui tend à introduire des anomalies (Le Berre *et al.*, 2002).

DONNEES BATHYMETRIQUES

Aperçu du lot de données

Résumé : La Base de Données Bathymétriques du SHOM (BDDBS) regroupe les sondes bathymétriques provenant de l'ensemble des levés effectués sur le littoral métropolitain entre 1816 et nos jours. Dans le secteur de l'Iroise, il comprend 1225000 sondes pour lesquelles la position (x, y), la profondeur et l'âge sont renseignés.

Nom du producteur : SHOM
Type d'entité spatiale : Points (sondes bathymétriques)
Format : Fichiers numériques (fichiers ASCII)
Objectifs de la production : Elaboration de la carte marine
Echelle de la donnée : 1/500 à 1/100 000 selon secteurs

Qualité du lot de données

Généalogie : Scan des minutes de sondes bathymétriques, reconnaissance de caractères / saisie numérique des sondes, correction, validation et intégration à la BDDBS. Les données numériques récentes proviennent des levés par sondeur multi-faisceau et sont directement intégrées à la BDDBS.

Exactitude du positionnement : 10 m

Système de référence spatial

Nom du système de référence : WGS84
Nom de l'ellipsoïde : WGS84
Nom de la projection cartographique : Géographique
Nom du niveau de référence verticale : Zéro hydrographique (niveau des plus basses mers de vive-eau)

Emprise géographique et temporelle

Nom de la zone couverte par le lot de données : Littoral de la France Métropolitaine
Etat d'avancement du travail : Quelques lacunes en mer d'Iroise (abords de l'île d'Ouessant et de l'archipel de Molène)
Extension temporelle : Données recueillies depuis 1816, acquisition en cours

Définition des données

- **Nom de l'attribut :** Profondeur
Définition de l'attribut : Profondeur en mètres par rapport au niveau de basse mer de vive-eau
- **Nom de l'attribut :** Age
Définition de l'attribut : Année du levé bathymétrique

Organisme de diffusion

Nom de l'organisme : SHOM
Adresse de l'organisme : 13 rue du Chatellier, 29200 Brest, France
Nom du contact : Y. Pastol (02 98 22 17 35) Pastol@shom.fr
Conditions d'utilisation : Convention d'utilisation de la donnée à définir

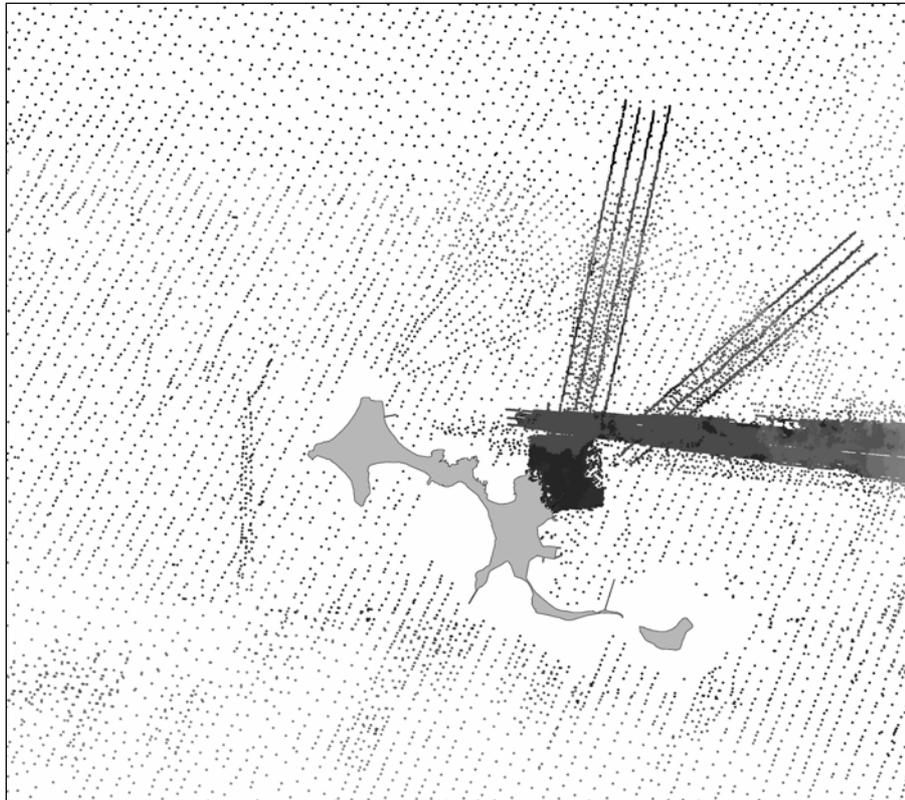


Illustration 62. Les données bathymétriques du SHOM (d'après Le Berre, 1999, modifié).

COURANTS DE MAREE

Aperçu du lot de données

Résumé : Atlas numérique provenant de la modélisation bidimensionnelle des courants liés à la marée
Nom du producteur : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)
Type d'entité spatiale : Grille
Format : Fichiers numériques (format ASCII)
Objectifs de la production : Aide à la navigation
Echelle de la donnée : Résolution du maillage de 100 m (Ile de Sein) à 670 m (modèle général de la mer d'Iroise)

Qualité du lot de données

Généalogie : Modélisation numérique bidimensionnelle des courants liés à la marée (logiciel Télémac), validation par comparaison avec les données in situ disponibles, généralisation et constitution de l'atlas numérique

Système de référence spatial

Nom du système de référence : Europe 50
Nom de l'ellipsoïde : International 1924
Nom de la projection cartographique : Mercator
Nom du niveau de référence verticale : Zéro hydrographique

Emprise géographique et temporelle

Nom de la zone couverte par le lot de données : Littoral de la France Métropolitaine
Etat d'avancement du travail : Atlas disponible pour la mer d'Iroise (réactualisation prévue)

Définition des données

Nom de l'attribut : Vitesse
Définition de l'attribut : Vitesse du courant à chaque heure d'un cycle de marée (coefficients 45 et 95) = 26 attributs
Nom de l'attribut : Direction
Définition de l'attribut : Direction du courant à chaque heure d'un cycle de marée (coefficients 45 et 95) = 26 attributs

Organisme de diffusion

Nom de l'organisme : Service Géodésie-Géophysique, SHOM
Adresse de l'organisme : 13 rue du Chatellier, 29200 Brest, France
Nom du contact : B. Simon Simon@shom.fr
Conditions d'utilisation : Convention d'utilisation de la donnée à définir

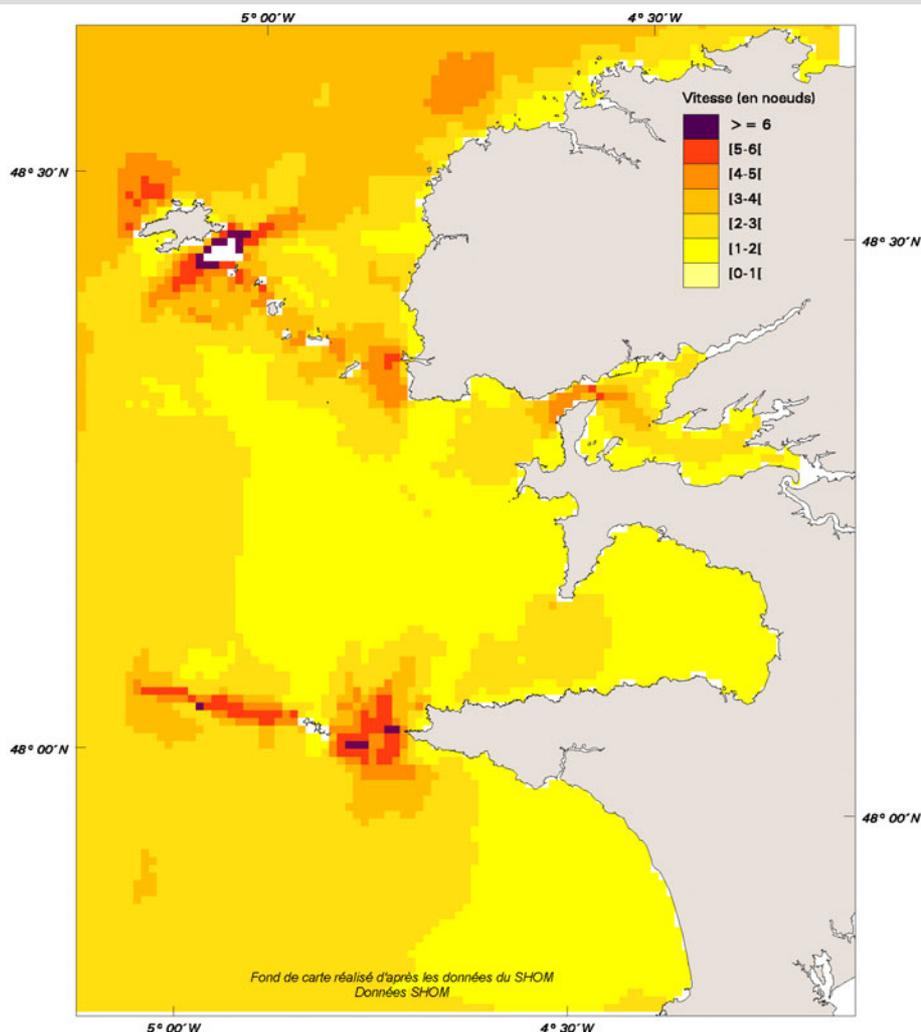


Illustration 63. Les données courantologiques du SHOM (d'après Le Berre, 1999, modifié).

sur laquelle est appliquée une interpolation bilinéaire qui donne les résultats les plus satisfaisants. Elle est mise en œuvre afin d'aboutir à deux modèles bathymétriques en mailles carrées respectivement de 50 et 100 mètres de côté. Les profondeurs, la valeur et l'orientation des pentes sont calculées à partir de ces deux modèles (ill. 64). En associant ces différentes grilles aux observations du groupe (présence/absence affectée aux centroïdes des mailles), on teste la modélisation¹³ aux deux résolutions de manière à choisir celle qui est la plus adaptée à l'analyse de l'habitat. C'est le modèle calculé à 50 mètres de résolution qui produit les résultats les plus cohérents (valeur de l'AIC la plus faible).

Une fois la résolution établie, trois nouvelles variables sont produites à partir des grilles de profondeur, de pente et d'orientation. Elles mettent en œuvre une fonction de voisinage et concernent le critère d'hétérogénéité spatiale, décrit en écologie comme un élément pouvant intervenir dans la distribution spatiale de nombreuses espèces animales et végétales (Bushing, 1997). L'hétérogénéité, qui correspond à la variabilité locale, est calculée sur les trois variables issues du MNT. Il en résulte trois grilles géoréférencées décrivant le critère d'hétérogénéité de chaque cellule par un indicateur. Plus la valeur de l'indicateur croît, plus l'hétérogénéité par rapport à la variable testée augmente. A partir du MNT interpolé à 50 mètres de résolution, les hauteurs d'eau sont également calculées en appliquant les valeurs cumulées successives (2%, 7%, 15%, 25%, 37%, 50%) à chaque demi-heure de marée et en les soustrayant de la hauteur d'eau de la pleine mer, définie d'après le niveau de référence de la marée dans le port de l'île de Sein (<http://www.shom.fr>).

L'analyse du domaine vital¹⁴ du groupe repose sur une méthodologie associant l'analyse spatiale et l'analyse statistique multivariée (ill. 65). La première étape du traitement repose sur la mise en œuvre d'une opération strictement géométrique qui constitue le premier niveau de l'analyse spatiale. La procédure suivie a pour objectif de produire un tableau de données qui combine l'ensemble des variables : observation des dauphins, profondeur, pente, orientation des pentes et critères d'hétérogénéité. Ensuite, ce tableau est extrait de la base d'information géographique pour être traité par des procédures statistiques, de type « analyse de variance ». Les variables dépendantes correspondent aux observations de grands dauphins, toutes activités confondues ou par activité. Chacune d'entre elles est analysée en fonction des variables explicatives décrivant le relief sous-marin de l'aire d'étude. Différentes procédures statistiques sont utilisées afin de mettre en évidence les paramètres intervenant sur la répartition spatiale du grand dauphin de l'île de Sein selon deux approches : sur l'ensemble de la zone d'étude d'une part, et d'autre part, sur l'espace utilisé par les grands dauphins, qualifié de domaine vital.

¹³ La modélisation est réalisée avec le logiciel SAS, plus performant dans la modélisation de type « régression logistique », plutôt qu'avec le module Grid d'Arc Info. La sélection du modèle est basée sur la valeur de l'AIC (Akaike's Information Criterion). Plus cette valeur est faible, plus le modèle est représentatif des données.

¹⁴ Le domaine vital correspond à l'espace géographique où se déroulent les fonctions biologiques essentielles d'une population.

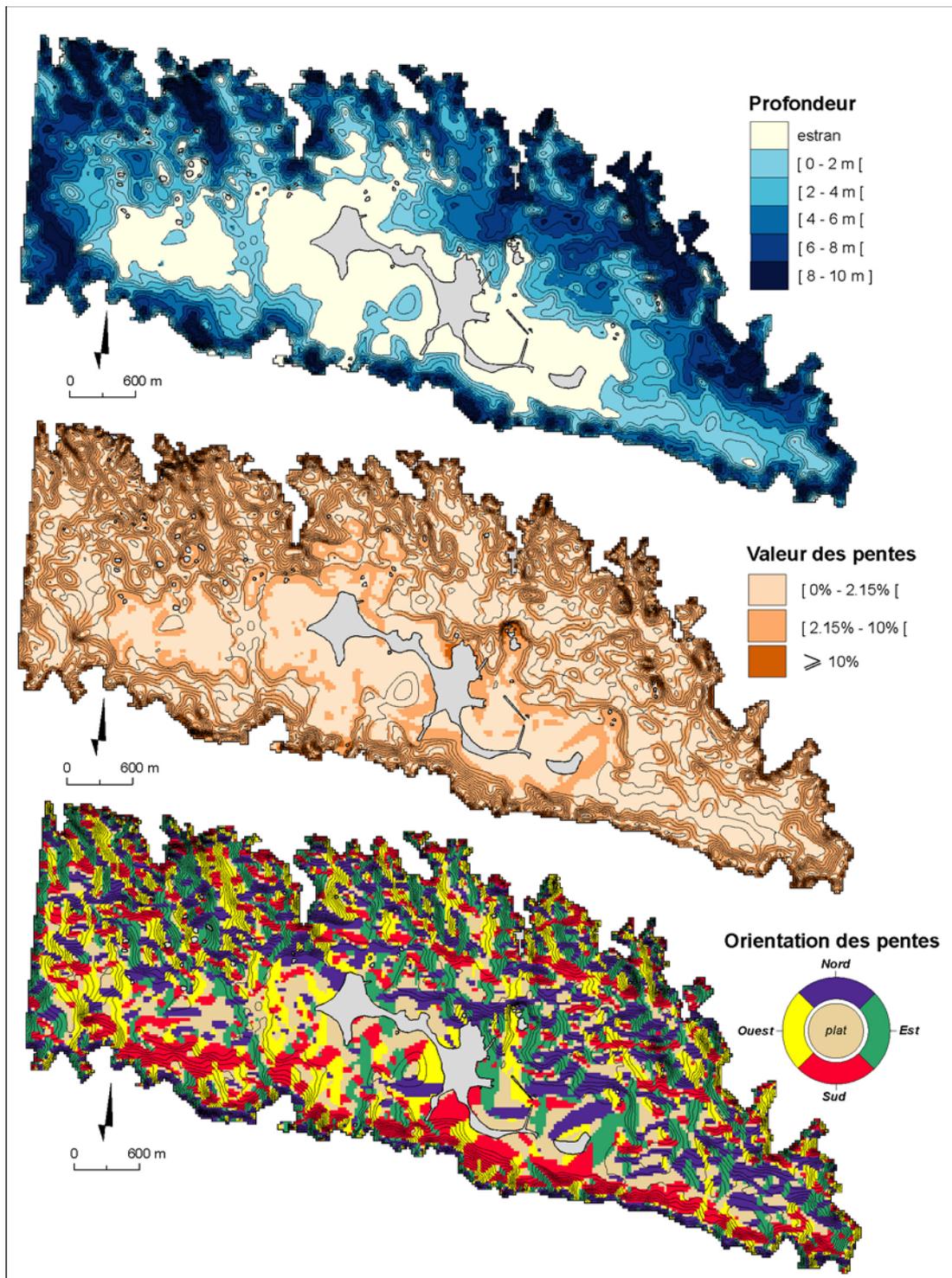


Illustration 64. Les variables extraites du MNT aux abords de l'île de Sein (d'après Liret *et al.*, 2000).

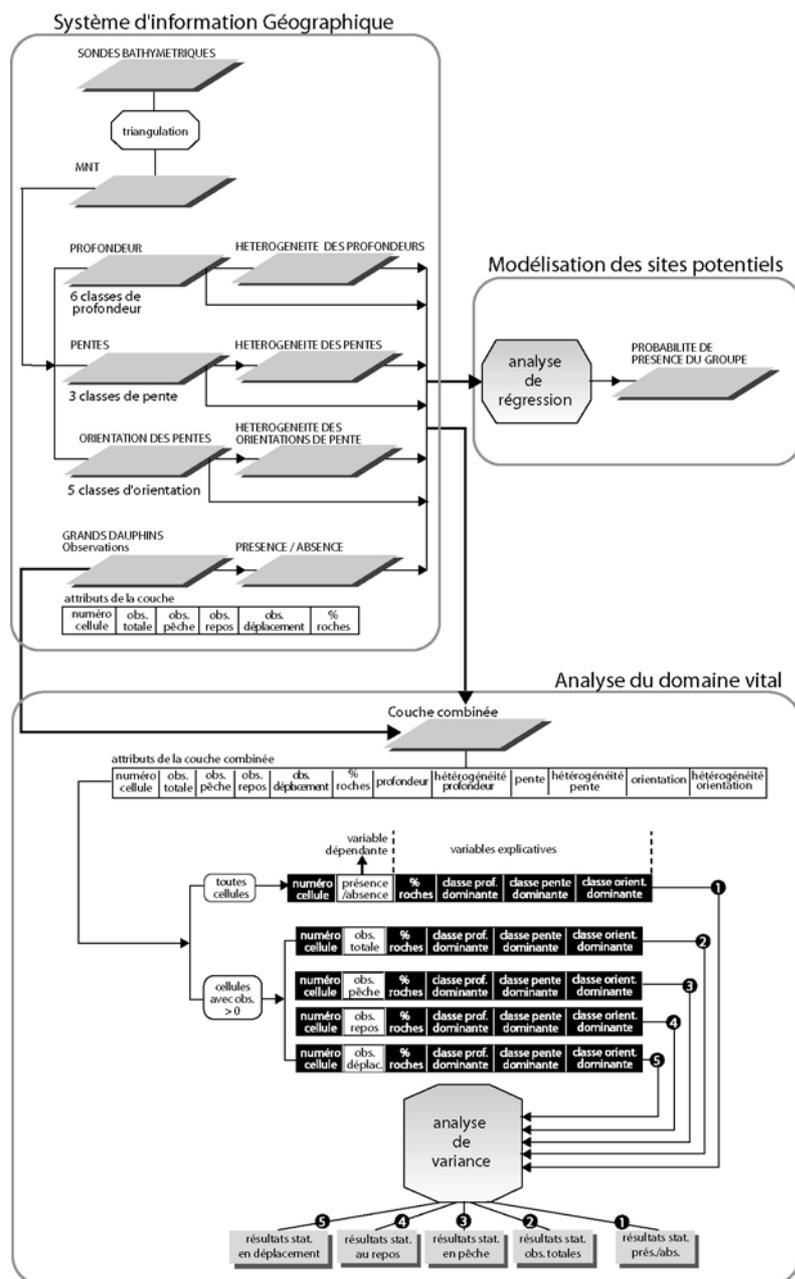


Illustration 65. La méthode utilisée pour l'étude du domaine vital et la modélisation de l'habitat potentiel du grand dauphin (d'après Gourmelon *et al.*, 2000).

En parallèle, de manière à produire une évaluation spatiale de l'habitat potentiel du grand dauphin et à tester une approche méthodologique susceptible d'être appliquée à un contexte géographique et thématique plus large, une modélisation basée sur une fonction de probabilité de type logistique est mise en œuvre (ill. 65). Ce type de modèle est utilisé pour tester les relations existant entre la présence d'une espèce dans un lieu donné et les caractéristiques environnementales du site, et pour produire une évaluation spatiale de l'habitat potentiel de l'espèce (Bian & West, 1997 ; Moses & Finn, 1997 ; Pereira & Itami, 1991). En d'autres termes, le modèle obtenu fournit la probabilité qu'une variable dépendante dont la distribution spatiale ne peut être que partiellement connue soit fonction de variables dites « indépendantes », selon la formule mathématique suivante :

$$\text{Logit } \{ \text{Probabilité } (Y=0/X) \} = a + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n$$

Y : population absente (Y=0) ou présente (Y=1)

X₁ ... X_n : variables environnementales prises en compte (profondeur, valeur et orientation des pentes, critères d'hétérogénéité spatiale)

a : constante calculée par le modèle

b₁... b_n : coefficients associés aux variables environnementales, calculés par le modèle.

Une couverture d'entités ponctuelles¹⁵ régulièrement distribuées dans l'aire d'étude et décrivant la présence ou l'absence du groupe (1/0) est utilisée en tant que variable dépendante. Un nombre équivalent de présences et d'absences est requis pour ne pas biaiser le calcul du modèle. Le modèle de régression logistique utilise les grilles décrivant les fonds sous-marins en tant que variables indépendantes (profondeur, valeur et orientation des pentes, hétérogénéités correspondantes). Les coefficients qui en résultent sont ensuite réintroduits dans la base d'information géographique, où ils servent au calcul d'une grille inédite contenant la probabilité de présence de la variable dépendante exprimée par un pourcentage, selon la formule :

$$P_x = p(d=1/x) = 1 / (1 + \{ \exp[(a + b_1X_1 + \dots + b_nX_n)] \})$$

P : probabilité de présence du groupe

d : présence ou l'absence du groupe (0 ou 1),

X₁ ... X_n : variables environnementales prises en compte (profondeur, valeur et orientation des pentes, critères d'hétérogénéité spatiale)

a : constante calculée par le modèle

b₁... b_n : coefficients associés aux variables environnementales, calculés par le modèle.

En ce qui concerne le rôle du courant de marée sur la distribution spatiale des animaux, la méthode repose sur la mise en forme des données courantologiques, leur analyse combinée avec les observations du groupe et la représentation cartographique des résultats (ill. 66). A partir des trois critères, hauteur d'eau, vitesse et direction du courant, 78 grilles sont calculées à chaque heure de la marée (soit pour la vitesse, 13 grilles associées à une marée de coefficient 45 et 13 grilles associées à une marée de coefficient 95, et autant pour la direction et la hauteur d'eau). Ces grilles horaires sont mises en relation avec les données d'observation dans un tableau qui associe à chaque numéro de cellule d'observation, les trois paramètres hydrodynamiques, à chaque heure de la marée et pour les deux coefficients. Les observations de grands dauphins, correspondant à des valeurs de fréquence relative toutes activités confondues et par activité, sont associées aux identifiants des mailles d'observation et corrélativement aux paramètres hydrodynamiques. Dans un premier temps, les données hydrodynamiques sont exploitées afin de mettre en évidence la relation entre le cycle du courant de marée et celui de la hauteur d'eau. Les classes d'heure de marée utilisées sont exprimées par rapport à la hauteur, or un décalage est observé avec l'intensité et la direction du courant. Cette étape permet ensuite d'étudier la relation entre la répartition des dauphins, toutes activités confondues et par activité, et l'intensité du courant au cours d'un cycle de marée, ayant constaté que leur occupation de l'espace était davantage liée aux courants qu'aux hauteurs d'eau (Liret, 2001).

¹⁵ Cette couverture est fournie par les identifiants des polygones carrés de la couverture vectorielle décrivant les observations du groupe aux abords de l'île de Sein.

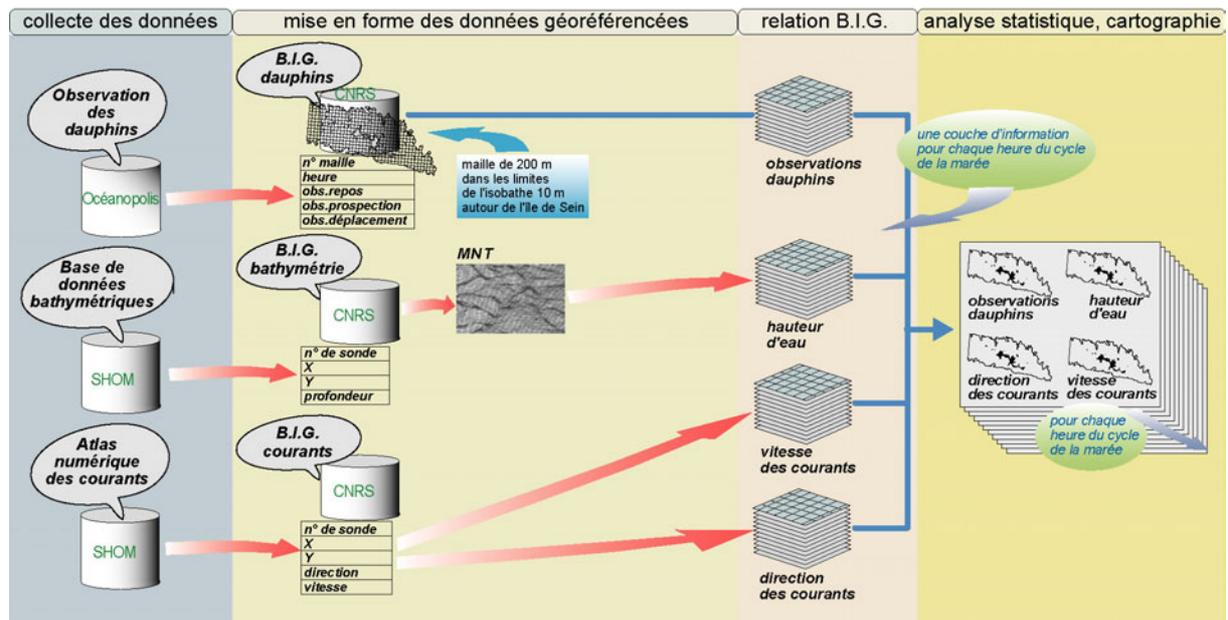


Illustration 66. La méthode utilisée pour analyser le rôle des courants de marée dans la distribution des grands dauphins (d'après Gourmelon *et al.*, 2002).

5.2.3. Résultats

Trois types de résultats sont produits au cours de cette recherche : la caractérisation de l'habitat du grand dauphin aux abords de l'île de Sein du point de vue de la morphologie sous-marine (Gourmelon *et al.*, 2000), la cartographie des sites potentiels et la mise en évidence du rôle des courants de marée sur la distribution du groupe (Gourmelon *et al.*, 2002).

Concernant la **caractérisation de l'habitat physique**, parmi les variables testées, les résultats statistiques indiquent que seules la profondeur et la pente présentent une différence significative entre l'espace avec observation de dauphins et celui sans. Les différentes classes de profondeur sont approximativement équivalentes hors de la surface exploitée par le groupe (Liret *et al.*, 2000). Néanmoins, il s'avère que les dauphins utilisent préférentiellement un espace extrêmement côtier allant de l'estran à 6 mètres de profondeur. En ce qui concerne la pente, les proportions des deux classes sont presque identiques au sein du domaine vital des dauphins par rapport au reste de la zone d'étude où une inclinaison comprise entre 2.15% et 10% est représentée majoritairement.

Dans une seconde étape, l'analyse avait pour but de rechercher les paramètres intervenant sur l'intensité de l'utilisation de la zone par le groupe. L'analyse statistique a donc été menée sur les mailles comprenant au moins une observation du groupe de grands dauphins au cours des deux années. L'intensité d'utilisation de chaque maille est prise en compte, toutes activités confondues et pour chaque activité ainsi que les caractéristiques du relief sous-marin et le pourcentage de roches émergées dans une maille d'observation. Les résultats obtenus indiquent clairement que seul le pourcentage de roches intervient sur l'intensité de fréquentation (ill. 67). Pour l'activité de repos, la valeur de la pente intervient également sur le choix des sites ; les animaux utilisant préférentiellement des secteurs dont la pente est supérieure à 10%. En ce qui concerne le déplacement, les zones utilisées ont une profondeur comprise entre 2 et 4 mètres d'une part, et entre 8 et 10 mètres d'autre part. Par contre, aucune interaction entre les trois variables ne fournit de résultats significatifs.

		Variables dépendantes			
		Ensemble des activités	Prospection alimentaire	Repos	Déplacement
Variables explicatives	Profondeur (BA)	NS	NS	NS	0.0257 [2;4m], [8;10m]
	Hétérogénéité de la profondeur	NS	NS	NS	NS
	Pente (DG)	NS	NS	0.0053 >10%	NS
	Hétérogénéité des pentes	NS	NS	NS	NS
	Orientation des pentes (OR)	NS	NS	NS	NS
	Hétérogénéité de l'orientation des pentes	NS	NS	NS	NS
	% de roches émergées	0.0001	0.0007	0.0110	0.0123
	BA * OR	NS	NS	NS	NS
	BA * DG	NS	NS	NS	NS
	DG * OR	NS	NS	NS	NS
	BA * DG * OR	NS	NS	NS	NS

NS : variable non significative (p > 0.05)

Illustration 67. Les résultats de l'analyse statistique pour l'analyse du domaine vital du grand dauphin (d'après Gourmelon *et al.*, 2000, modifié).

Sur le thème **des sites potentiels**, le modèle de régression logistique fournit les coefficients suivants qui sont utilisés pour le calcul de la probabilité de présence du groupe :

$$P = 1.443 + (\text{var1} \times -0.151) + (\text{var2} \times -0.017) + (\text{var3} \times -0.001) + (\text{var4} \times -0.154) + (\text{var5} \times -0.073) + (\text{var6} \times 0.114)$$

var1 : profondeur var4 : hétérogénéité de la profondeur
var2 : pente var5 : hétérogénéité de la pente
var3 : orientation var6 : hétérogénéité de l'orientation

Sur l'ensemble du site, les valeurs estimées par le modèle sont comprises entre 0 et 87% (ill. 68). La cartographie permet d'identifier les secteurs de la zone d'étude possédant les caractéristiques en partie à l'origine de la répartition spatiale des dauphins. Ces espaces, inclus dans la zone d'étude, peuvent être qualifiés de sites potentiels pour le groupe de l'île de Sein (ill. 68a). Parmi les secteurs identifiés, aux zones préférentielles mises en évidence lors du suivi des animaux s'ajoutent des micro-espaces au sein desquels aucune observation n'a été réalisée à ce jour. Ce modèle, transposé à l'archipel de Molène, sans prise en compte des données d'observation locales, donne des résultats peu significatifs (ill. 68b), les zones prédites ne coïncidant pas avec les sites actuellement fréquentés.

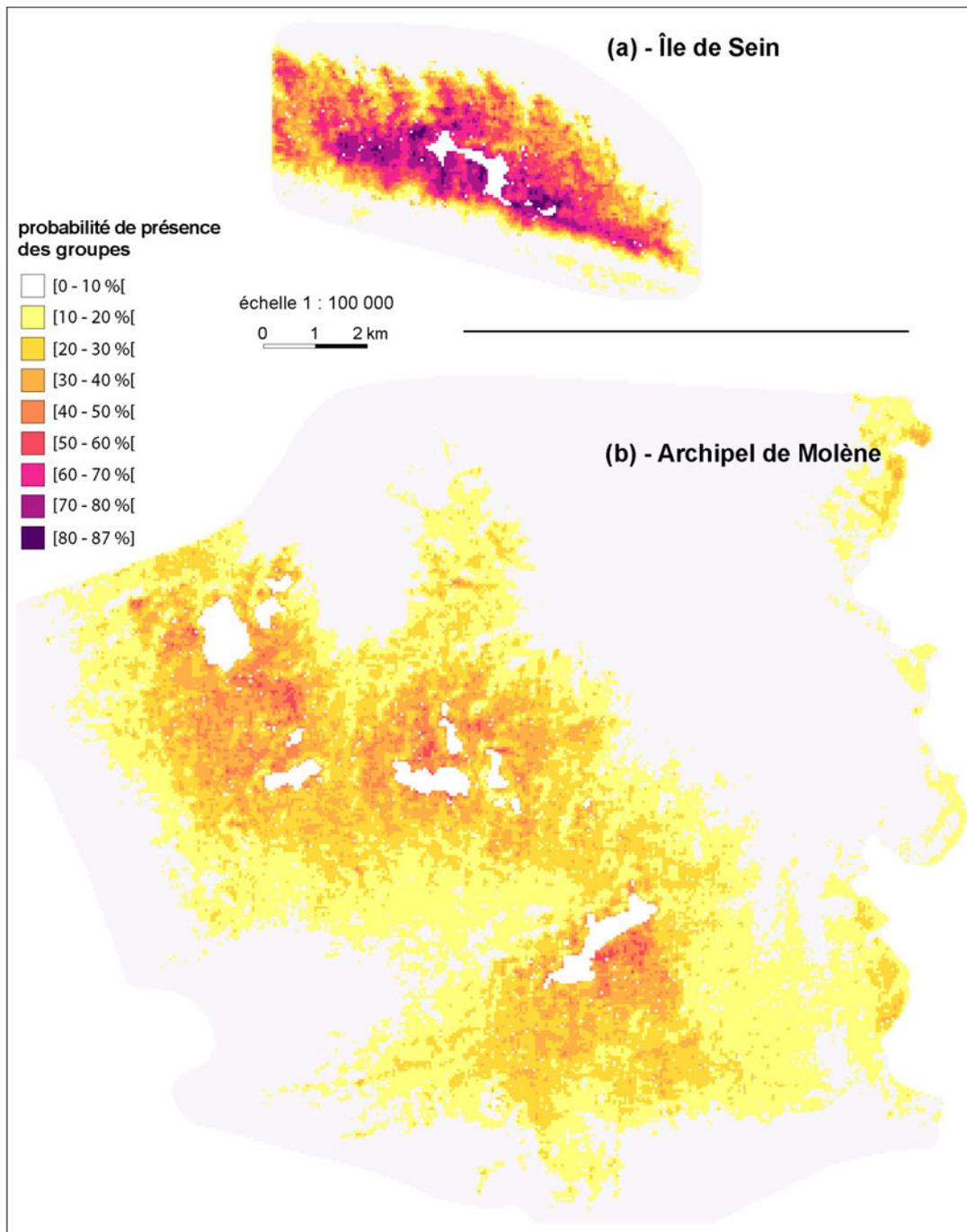


Illustration 68. Modélisation de l'habitat potentiel du grand dauphin en ne tenant compte que du relief sous-marin. 68a : aux abords de l'île de Sein. 68b : extrapolation à l'archipel de Molène.

Concernant **l'influence des courants de marée et de la hauteur d'eau** sur la distribution du groupe, la première analyse concerne la présence ou l'absence du groupe de grands dauphins, toutes activités confondues, sans prise en compte de l'intensité d'utilisation de l'espace. Les résultats montrent qu'aux deux coefficients (45 et 95), sur l'ensemble du cycle de courant de marée, les espaces fréquentés par le groupe présentent des tendances équivalentes. Le nombre de mailles utilisées est supérieur au cours de la marée descendante, indiquant que le groupe est présent sur une surface plus importante. Il apparaît également qu'à chaque heure de la marée, les grands dauphins utilisent seulement une partie de la zone d'étude dont les

caractéristiques hydrodynamiques moyennes sont représentatives de celles de l'ensemble du site. De manière à préciser ces relations, une analyse complémentaire est menée, qui tient compte des fréquences relatives d'observation du groupe par maille (ill. 69). En début de marée montante, l'intensité moyenne par maille est supérieure pour le déplacement et la prospection alimentaire, ces deux activités étant concentrées sur des secteurs délimités, comme des chenaux de transit entre sites préférentiels pour le déplacement. Ensuite, la recherche de nourriture reste une activité prépondérante au sein de quelques mailles au même titre que le repos, et au détriment du déplacement. La situation bascule au cours de la marée descendante : l'intensité de fréquentation d'un nombre limité de cellules est remarquable, surtout pour l'activité de repos alors que la prospection alimentaire présente une fréquence relative faible disséminée sur une surface plus importante.

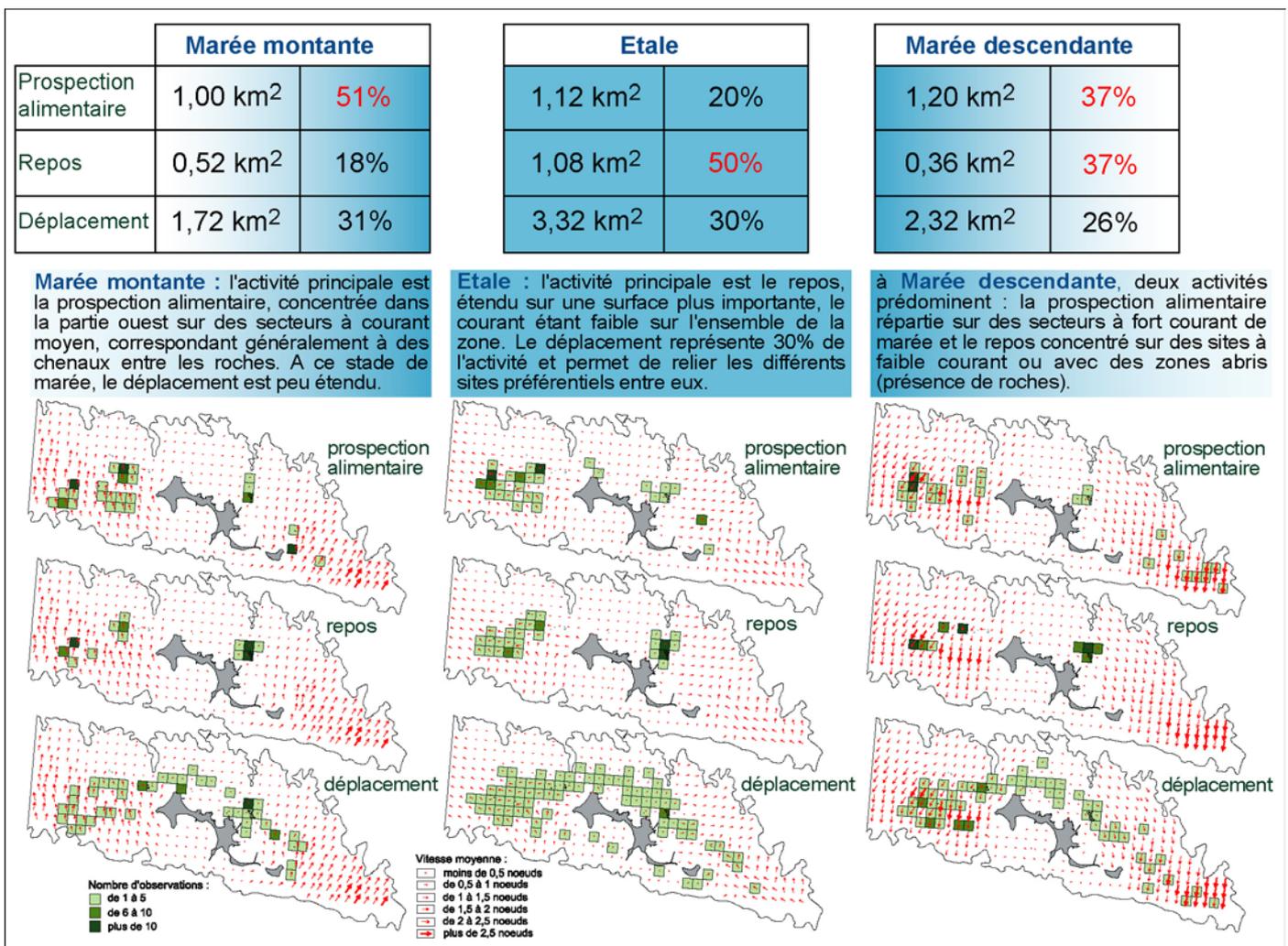


Illustration 69. Influence des courants de marée sur l'activité du groupe de grands dauphins aux abords de l'île de Sein (Gourmelon *et al.*, 2002).

5.3. Vers une approche régionale de l'habitat potentiel du grand dauphin en mer d'Iroise

Le rôle du relief sous-marin et des courants de marée sur la répartition spatiale des grands dauphins côtiers étant établi localement, la recherche est élargie dans une seconde étape à l'ensemble de la mer d'Iroise. La caractérisation physique de l'habitat du grand dauphin à cette échelle a pour objectif de fournir un élément potentiellement utilisable dans un contexte

de gestion durable de la diversité marine au sein du parc national marin en cours de création, et de proposer une démarche transposable à d'autres espaces côtiers.

5.3.1. Données et méthodes

L'approche méthodologique est fondée sur la classification des données relatives au relief sous-marin pour fournir une description synthétique des fonds pouvant expliquer la distribution spatiale des deux groupes de dauphins côtiers résidant en mer d'Iroise (Le Berre *et al.*, 2002). Comme pour l'analyse menée sur le site de l'île de Sein, un MNT est calculé par interpolation locale, à partir des données bathymétriques contenues dans la BDBS du SHOM. Pour l'ensemble de la mer d'Iroise, 1 200 000 sondes acquises entre 1816 et 1993 et de densité variable selon les secteurs sont traitées (ill. 70).

Les tests comparatifs menés sur les différentes méthodes d'interpolation conduisent à retenir, dans ce cas, la méthode de l'inverse des distances¹⁶ pour calculer le MNT de la mer d'Iroise à une résolution spatiale de 300 mètres. Elle produit en effet des estimations généralement satisfaisantes puisque les erreurs supérieures à 10 mètres sont marginales et que l'erreur moyenne est centrée sur zéro. Pour procéder à la classification des fonds de la mer d'Iroise, trois paramètres topométriques sont calculés à partir du MNT : la profondeur en raison de son caractère déterminant dans la répartition verticale des animaux, la pente qui caractérise l'intensité du relief et l'hétérogénéité de l'orientation des pentes qui permet de distinguer les fonds réguliers et irréguliers (ill. 71). La méthode de classification par maximum de vraisemblance basée sur le calcul de la distance bayésienne repose sur des paramètres indépendants et normalisés, structurés en mode raster.

5.3.2. Résultats

La classification retient les critères suivants :

- Trois catégories de profondeurs, faibles (moins de 25 mètres), intermédiaires (60 mètres) et importantes (plus de 80 mètres), ressortent nettement. L'important gradient de profondeur occupé par les classes de pente forte est en partie à l'origine des classes de profondeurs intermédiaires.
- Deux ensembles de pente variable s'individualisent : les fonds à pente faible (inférieure à 1 %) et les fonds à pente forte (supérieure à 2 %). Les valeurs les plus importantes (plus de 4 %) caractérisent les tombants, qui sont bordés dans leur partie la plus profonde par des zones de déclivité légèrement plus faible de l'ordre de 2 %.

¹⁶ La méthode de l'inverse des distances (encore appelée IDW ou inverse distance weighted), est basée sur le calcul de la moyenne des valeurs des données d'entrée, auxquelles est affecté un poids inversement proportionnel à leur distance à la cellule à estimer. Ainsi, plus un échantillon est proche de la cellule dont on cherche à calculer la valeur, plus son influence est importante. Les valeurs interpolées étant toujours comprises entre la valeur maximale et la valeur minimale du jeu de donnée, IDW est une fonction de lissage. Son utilisation est conseillée lorsque les données disponibles sont denses et uniformément réparties dans l'espace. En effet, cette méthode ne tient compte que de la distance entre le point à estimer et les données d'entrée, sans tenir compte de leur répartition spatiale. Elle a, par conséquent, tendance à surpondérer les groupements de données, alors que celles-ci sont en partie redondantes.

- Les valeurs les plus faibles d'indice d'hétérogénéité correspondent aux fonds les plus réguliers, tandis que les valeurs les plus fortes caractérisent des fonds irréguliers. Lorsque les fonds sont plats, on admet que l'hétérogénéité de l'orientation n'est pas significative.

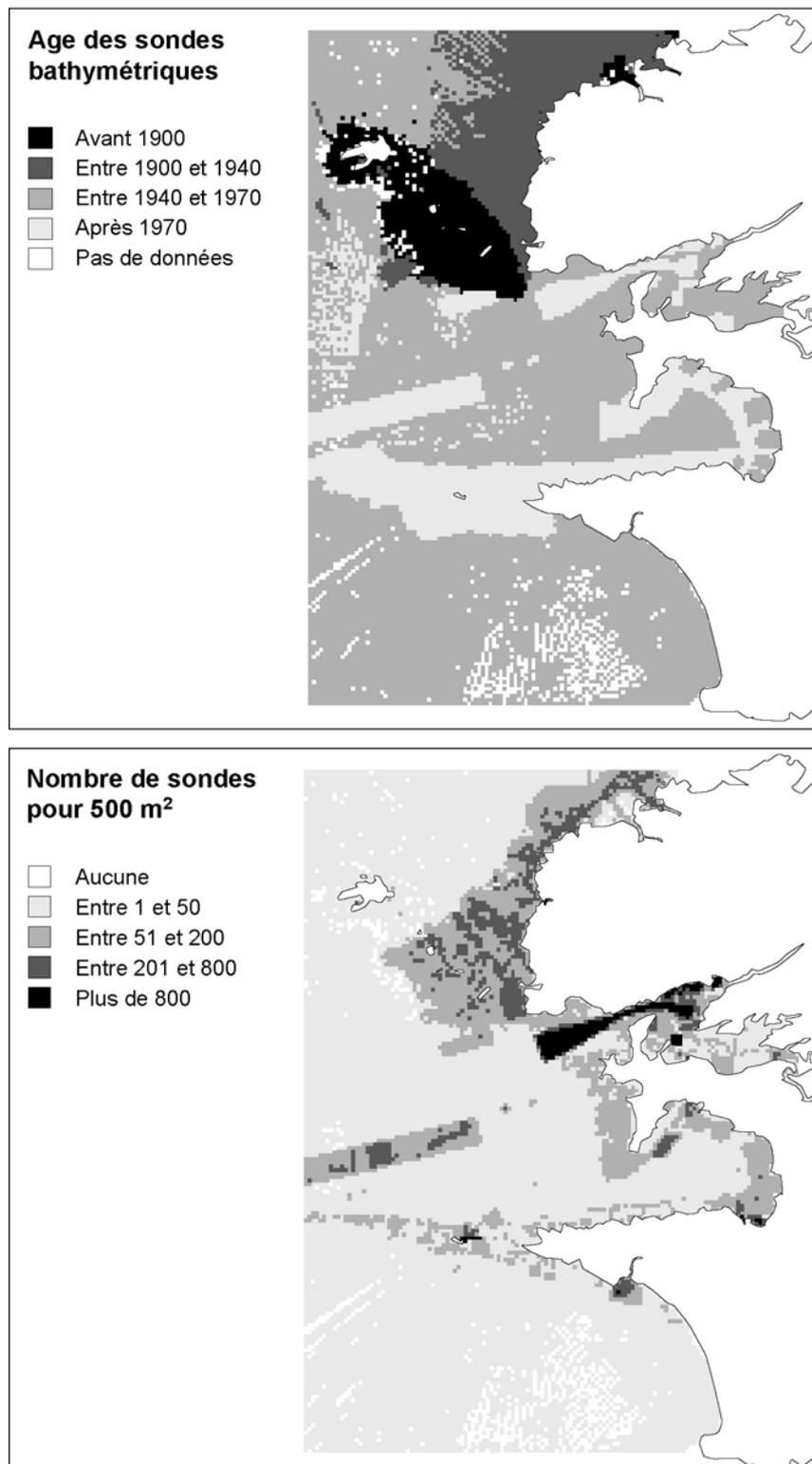


Illustration 70. Age et densité des sondes bathymétriques du SHOM en mer d'Iroise (d'après Le Berre *et al.*, 2002).

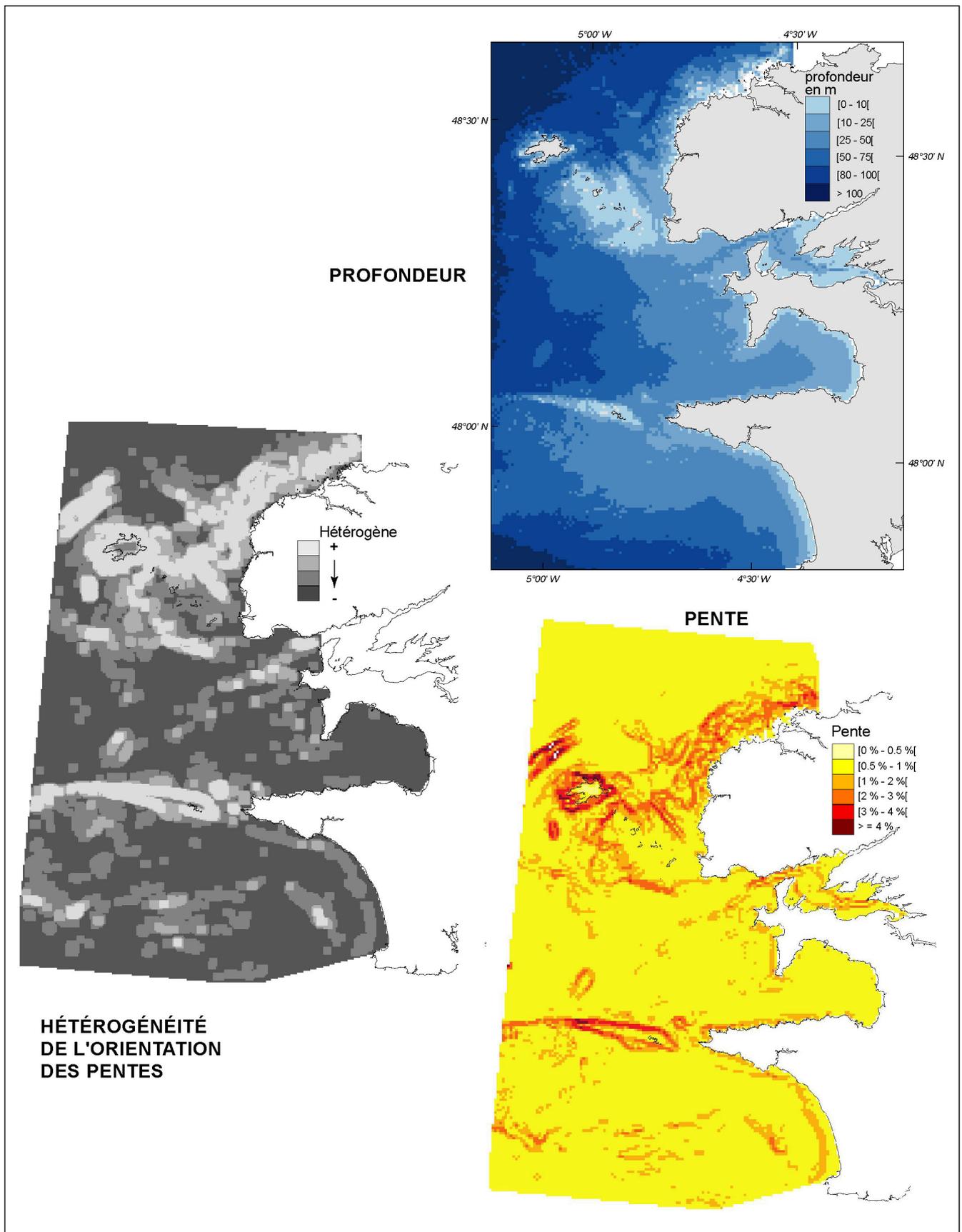


Illustration 71. Variables utilisées pour la classification des fonds sous-marins de la mer d'Irlande (d'après Le Berre, 1999, modifié).

Par le regroupement de certaines classes, une typologie en cinq catégories de fonds est proposée (ill. 72).

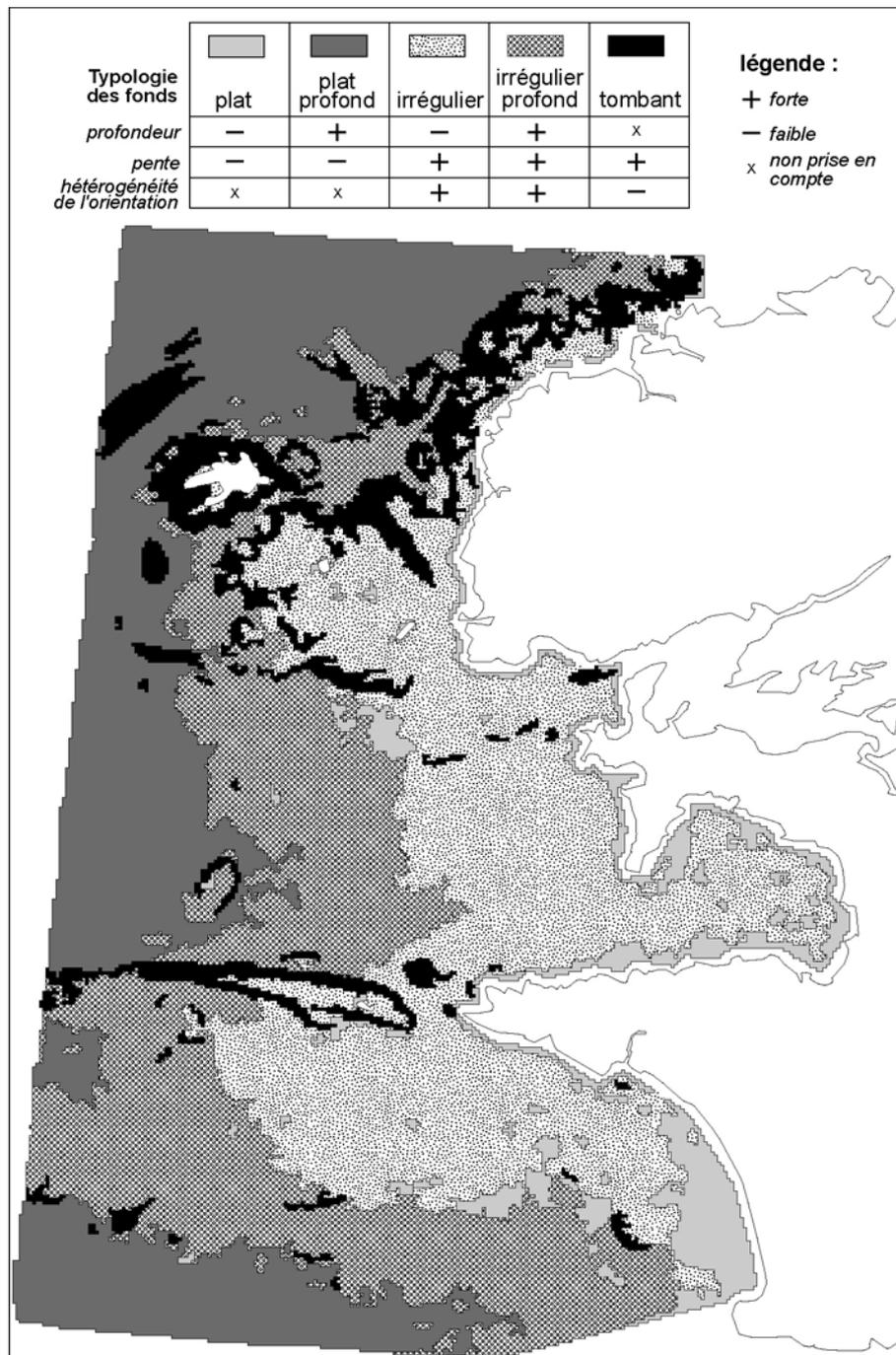


Illustration 72. La classification des fonds sous-marins de la mer d'Iroise (d'après Le Berre *et al.*, 2002).

Elle permet de distinguer deux domaines de profondeurs caractéristiques (0-40 mètres et plus de 80 mètres), séparés par des tombants. Ces derniers sont particulièrement marqués au Nord de la zone, où ils débutent dès le littoral et dans lequel des profondeurs importantes sont rapidement atteintes. L'archipel de Molène, délimité au Nord, à l'Ouest et au Sud par des tombants et à l'Est par le continent, s'individualise nettement au sein de cet ensemble. Dans la partie sud, la transition entre les domaines peu profonds et profonds est plus progressive.

Entre les fonds plats des baies de Douarnenez et d'Audierne et ceux du large, elle est marquée par des fonds irréguliers plus que par des tombants, qui apparaissent néanmoins par endroits en baie d'Audierne. La chaussée de Sein ressort distinctement des fonds environnants par rapport auxquels elle apparaît surélevée. Ses rebords abrupts et continus sont chapeautés par un étroit plateau irrégulier, de pente et de profondeur faibles.

En mer d'Iroise, l'archipel de Molène et la chaussée de Sein sont fréquentés par des groupes sédentaires de grands dauphins côtiers. Les caractéristiques morphologiques de ces deux sites correspondent à l'environnement physique généralement décrit pour l'espèce, constitué de hauts fonds, plats ou irréguliers (0.5-20 mètres), délimités par des tombants pouvant constituer les barrières géographiques contraignant les animaux à l'intérieur d'un espace (Irvine *et al.*, 1981 ; Klinowska, 1991 ; Norris & Dohl, 1980). Sur la chaussée de Sein, comme dans l'archipel de Molène, cette limite correspondrait à l'isobathe des 20 mètres, frontière rarement franchie par les individus (Liret, 2001).

5.4. Conclusions

Si les résultats présentés ne constituent qu'une approche limitée de l'habitat du grand dauphin en mer d'Iroise, ils confirment néanmoins l'existence de secteurs privilégiés au sein de leur zone de fréquentation, caractérisés par la présence de roches émergées et par une topographie sous-marine particulière. Parmi les variables testées, la profondeur et la pente influencent significativement l'intensité d'utilisation de la zone. Au sein de cet espace, le groupe fréquente préférentiellement certains sites caractérisés par la présence de roches émergées. Selon leur activité, ils tiennent également compte de la profondeur lors du déplacement ou de l'inclinaison de la pente pour le repos. L'analyse menée conclut également au rôle du courant de marée sur la répartition spatiale et le comportement des animaux. Les principaux résultats mettent en évidence une répartition spatiale réduite du groupe qui n'occupe qu'une petite surface de la zone côtière comprise à l'intérieur de l'isobathe des 10 mètres, quel que soit le coefficient de marée. Au sein de ces zones, le courant influence l'intensité d'utilisation des sites selon le type d'activité du groupe. Au cours de la marée montante, les trois activités sont concentrées sur un espace réduit à forte intensité d'occupation, de manière successive avec d'abord le déplacement et la prospection alimentaire, puis le repos. Cette dernière activité présente la même tendance, mais de manière plus accentuée au cours de la marée descendante.

Le test mené pour modéliser l'habitat potentiel fournit des résultats peu significatifs. Toutefois, l'intérêt de la démarche est indiscutable à condition de disposer de paramètres environnementaux pertinents des points de vue thématique et scalaire, ce qui n'est pas le cas actuellement en mer d'Iroise. A l'échelle locale, les deux seules données disponibles sont celles qui ont été utilisées dans l'analyse : le relief sous-marin et les courants de marée. Or, ces facteurs jouent probablement un rôle indirect sur la répartition spatio-temporelle des grands dauphins. La disponibilité en ressources halieutiques est certainement un facteur majeur à prendre en compte, toutefois extrêmement difficile à appréhender du point de vue spatial. Dans ce contexte, ce type d'approche dont l'intérêt scientifique et opérationnel est certain, ne peut s'envisager qu'à moyen terme et à plus petite échelle.

A une échelle régionale, la classification des données issues de l'analyse du MNT montre la spécificité de la morphologie des deux sites fréquentés par le grand dauphin en mer d'Iroise. Appliquée aux autres sites du réseau *Tursiops*, cette démarche pourrait fournir des éléments

intéressants pour l'étude comparative de l'habitat des grands dauphins côtiers de la façade atlantique européenne.

6. CONCLUSION

Depuis une dizaine d'années, un SIG est mis en place sur la mer d'Iroise. Il s'inscrit dans la démarche de suivi à long terme de l'écosystème, recommandée par le programme Mab de l'UNESCO et susceptible d'être mise en œuvre sur le littoral finistérien dans le cadre du projet d'Observatoire du Domaine Côtier de l'IUEM. Deux bases d'information géographique spécifiquement consacrées aux espaces côtiers de l'Iroise sont utilisées sur des problématiques, des milieux et des échelles spatio-temporelles variées, témoignant par la diversité des applications menées, l'intérêt de la démarche entreprise.

Sur les îles habitées, la recherche présentée s'inscrit dans les problématiques abordées par le programme international *Land Use and Land Cover Changes* de l'IGPB. L'ensemble des résultats acquis repose sur les capacités d'analyse des SIG. Que ce soit pour la production de connaissances relatives au fonctionnement et à l'évolution des milieux ou pour l'aide à la gestion, la pratique se révèle fructueuse. En effet, de ce seul point de vue, la démarche permet de disposer d'éléments concrets et de réaliser des scénarios d'évolution des milieux qui sont d'un intérêt certain dans la réflexion préalable à la définition d'une politique de gestion.

Concernant les îlots marins protégés, la démarche vise à proposer au niveau national, une méthode d'évaluation des changements des milieux afin de procurer un outil synthétique aux gestionnaires et pouvant servir à l'élaboration de comparaisons entre différents sites d'un réseau d'espaces protégés. Le recours à la géomatique contribue significativement aux résultats acquis, en particulier au niveau de l'analyse des changements spatio-temporels intervenus au cours de la dernière décennie sur le tapis végétal d'un ensemble représentatif d'îlots marins en réserve.

Conformément aux objectifs du programme américain GAP de l'USGS et dans le cadre du projet européen *Tursiops*, l'étude des caractéristiques environnementales de l'habitat d'une espèce indicatrice de la qualité du milieu marin est menée. Les résultats acquis sur le grand dauphin, même s'ils sont partiels, permettent de préciser certaines caractéristiques physiques du domaine vital des animaux, de réaliser une synthèse de la morphologie des fonds sous-marins susceptibles d'expliquer la distribution des groupes résidant en mer d'Iroise et de proposer une approche par modélisation de l'habitat potentiel. L'analyse menée exploite les capacités de mise en forme, de modélisation spatiale et de cartographie des SIG et la synergie de ces systèmes avec les outils d'analyse statistique.

Au vu des résultats présentés, la démarche géomatique entreprise au sujet de la mer d'Iroise paraît fructueuse tant dans le domaine de la connaissance du fonctionnement et de l'évolution de l'écosystème que dans celui de l'aide à la gestion de la zone côtière. Néanmoins, il apparaît que l'utilisation du système est limitée sur certaines problématiques du fait de l'indisponibilité de nombreuses données et de méthodes d'analyse peu adaptées à l'étude de certains processus dynamiques. La partie suivante de ce mémoire dresse un constat critique de l'apport et des limites du SIG mis en place, et propose diverses perspectives de recherche tant méthodologiques que thématiques.

TROISIEME PARTIE

CONSTAT CRITIQUE ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE

En relation avec les problématiques environnementales, les SIG ont souvent pour vocation de produire les éléments spatiaux nécessaires à l'inventaire des connaissances concernant un espace donné, de contribuer à l'analyse des processus spatio-temporels qui s'y déroulent et d'aider aux prises de décision en matière de gestion et d'aménagement ; trois domaines qui correspondent aux phases de développement du système (Crain & Mc Donald, 1984). Après une dizaine d'années de mise en œuvre, le constat suivant est dressé quant aux apports, aux limites et aux perspectives qu'offre le SIG consacré à la mer d'Iroise dans ces trois champs d'application (Gourmelon & Le Berre, 2003).

1. CONSTAT

1.1. Etat des connaissances

Une base d'information géographique offre un support d'archivage de données variées (thèmes, échelles) provenant de sources diversifiées (images, cartes, levés de terrain, statistiques, ...). L'étape d'inventaire et d'intégration de l'existant permet ainsi de produire un état des connaissances sur la zone étudiée (Cicin-Sain & Knecht, 1998). En mettant en évidence les lacunes et les qualités de l'information, l'inventaire permet également d'identifier les besoins d'informations complémentaires, et le cas échéant de procurer une aide opérationnelle en termes de stratégies d'échantillonnage. De plus, la structuration de l'information dans des formats normalisés facilite sa communication par l'utilisation d'une information de référence et par la réalisation de produits cartographiques adaptés à un large public.

Développées autour de l'information de référence produite par le SHOM et l'IGN, les bases d'information géographique *Iroise* et *SIGOuessant* sont structurées selon les principes de la planification écologique (Mc Harg, 1969), adaptée par le comité Mab de l'UNESCO (Journaux, 1985), et contiennent de multiples couches d'information qui décrivent les caractéristiques physiques, biologiques et socio-économiques de la zone côtière finistérienne. Par le développement d'une chaîne de production cartographique fondée sur les modes d'association et de combinaison des résultats ainsi que sur les méthodes de généralisation en fonction des échelles de représentation, ces bases d'information géographique offrent des possibilités intéressantes en termes de valorisation et de communication des données accumulées. Ainsi, un atlas thématique consacré à la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise a été réalisé à l'issue des premières campagnes de suivi scientifique (Gourmelon *et al.*, 1995) et un document de synthèse a servi de base de discussion aux différents acteurs intervenant sur le milieu (Le Berre, 1997). Toutefois, il apparaît que malgré d'importants efforts de structuration des données de la part des organismes scientifiques et institutionnels impliqués sur la zone, l'information actuellement disponible est de qualité variable en termes d'exhaustivité et d'âge. En ce qui concerne l'information de référence, indispensable à la cohérence de la base, les différences entre les supports terrestre (IGN) et marin (SHOM) à

l'interface du trait de côte demeurent dans l'attente de prise de décision nationale et de la disponibilité des produits finalisés du SHOM (Allain *et al.*, 2000). En termes de connaissances, les lacunes les plus importantes concernent le milieu marin. Ainsi, à l'exception de la réglementation maritime, peu d'informations géographiques numériques décrivant les activités sont actuellement disponibles. De même, la connaissance de la structure et du fonctionnement écologique est partielle. Plusieurs méthodes conduisant à la production de ces paramètres, doivent s'envisager, notamment par la contribution de l'information géographique déjà mobilisée. Ainsi, en écologie marine, la mise en œuvre de modèles de répartition théorique des peuplements basés sur les variables physiques prédominantes est prévue à moyen terme. La base d'information géographique constituée peut par ailleurs, aider à l'élaboration de stratégies d'échantillonnage biologique en milieu marin et à l'intégration de données complémentaires, à l'exemple des méthodes mises en œuvre sur les espaces terrestres par l'ATEN¹ dans les parcs nationaux français (Claudin & Rameau, 1999). Enfin, la troisième source d'information à envisager est la télédétection. En zone côtière, son apport aux connaissances réside dans la production d'images synoptiques à des pas de temps réguliers, mais aussi dans la multiplicité des capteurs adaptés à la détection de paramètres variés : couleur de l'eau, température de surface de la mer, morphologie de l'estran, occupation des sols ... (Van Zuidam *et al.*, 1998).

1.2. Analyse des processus

La compréhension des processus environnementaux nécessite la prise en compte de nombreux paramètres physiques, biologiques et socio-économiques, acquis dans une double perspective spatiale et temporelle. Leur intégration sous forme de couches au sein d'un SIG permet l'analyse de leurs relations logiques, thématiques, statistiques ou géométriques par diverses fonctions. Les résultats spatiaux des analyses réalisées constituent en retour, une information inédite susceptible d'étoffer les bases d'information géographique. Les apports des SIG aux disciplines environnementales concernées par les écosystèmes terrestres ne sont plus à démontrer (Haines-Young *et al.*, 1993 ; Gayte *et al.*, 1997). Par contre, l'analyse des processus marins au sein des SIG est aujourd'hui encore limitée (Wright & Bartlett, 1999). Considérablement plus étendus, plus complexes et dynamiques, les écosystèmes marins sont souvent moins bien connus que leurs homologues terrestres. De plus, leur exposition à de multiples influences implique une approche régionale de leur fonctionnement (Holligan, 1994). Par ailleurs, une gamme étendue d'échelles spatio-temporelles doit être prise en compte, en raison du caractère extrêmement dynamique des variables hydrologiques et biologiques : échelle semi-diurne (marée), saisonnière ou annuelle (cycle lunaire et biologique), voire pluri-annuelle pour le suivi à long terme des changements. Cette complexité justifie de recourir à la modélisation numérique, pour l'acquisition de certains paramètres à haute variabilité spatio-temporelle et pour la compréhension du fonctionnement global des écosystèmes. Ainsi, la recherche concernant l'habitat côtier des grands dauphins présents en Iroise s'est heurtée à l'indisponibilité des données environnementales liée à une méconnaissance de certaines variables (couverture algale, fréquentation nautique) ou à des échelles spatiales trop grossières (nature et morphologie des fonds sous-marins). Néanmoins, ce type d'approche pourra s'envisager à moyen terme à une échelle régionale pour laquelle la description des variables physiques, biologiques et anthropique est plus complète.

Il apparaît donc clairement que le couplage des SIG avec des modèles dynamiques pour analyser les processus environnementaux de la zone côtière, de l'échelle locale à l'échelle

¹ ATEN : Atelier technique des Espaces Naturels <http://www.espaces-naturels.fr/>

globale et sur des périodes du court au long terme, est une voie de recherche extrêmement prometteuse pour les années à venir (Cuq, 2000).

1.3. Aide à la décision

Les SIG peuvent contribuer à la gestion de l'environnement soit par la conception de produits finalisés (cartes, statistiques, simulations...), soit en tant que support d'information dans des systèmes opérationnels d'aide à la décision. En mer d'Iroise, les multiples statuts de protection impliquent un suivi scientifique à long terme et des actions concrètes de gestion menées par divers opérateurs. Or, les prises de décision des gestionnaires ont souvent comme support des documents cartographiques élaborés à partir d'une multitude de données spatiales. Les SIG permettent de mobiliser sur une plate-forme unique des informations de sources variées en des temps d'accès limité, de procurer une aide à la conception de cartes répondant à des besoins spécifiques et de gagner du temps dans la production d'une information utile à la prise de décision par une automatisation possible des chaînes de traitement (Le Berre *et al.*, 2000). Pour le suivi environnemental, ces systèmes peuvent être utilisés dans les stratégies d'échantillonnage, pour la détection des changements spatiaux et pour la simulation d'évolutions ou d'impacts (Briggs & Tantram, 1997). Ainsi, au cours des opérations de suivi scientifique menées en Iroise, le SIG sert à identifier les variables à inventorier et contribue efficacement au pilotage des plans d'intervention par une recherche des sites répondant à des critères déterminés (Gourmelon *et al.*, 2003). De plus, l'aptitude de ces systèmes à produire des synthèses diachroniques est un atout majeur dans la détection des changements spatiaux.

Sur les espaces littoraux, protégés ou non, la simulation des impacts et des changements a pour objectif la mise en œuvre de stratégies de gestion et d'intervention sur les milieux (Capobianco, 1999). La modélisation spatio-temporelle, à partir d'informations contenues dans la base, peut apporter une aide précieuse par la production de synthèses décrivant les changements écosystémiques provoqués par différents types de perturbations et dans l'évaluation des risques côtiers (Robin, 2003). Dans ce contexte intégrateur et pluridisciplinaire, la conception d'un outil opérationnel d'aide à la décision est extrêmement complexe. Du point de vue méthodologique, il implique des liens entre l'information géographique numérique et d'autres bases de données, l'intégration de modèles spatio-temporels pour l'élaboration de simulations réalistes et l'élaboration d'interfaces conçues pour faciliter l'accès à l'information (Van Zuidam *et al.*, 1998). De manière à tester les limites du SIG mis en œuvre sur le littoral finistérien, la base d'information géographique *Iroise* a été utilisée dans un contexte opérationnel, en tant que support à l'élaboration d'une maquette dédiée à la lutte anti-pollution (Le Berre, 1999). Elle a mobilisé les données nécessaires à l'estimation de la sensibilité du littoral de manière à planifier les stratégies d'intervention et à procurer les éléments utiles au suivi écologique des sites. Pratiquement, la sensibilité du littoral à la pollution a été estimée par le calcul d'indices morpho-sédimentaires, écologiques, et socio-économiques. Mais, pour disposer d'une information à caractère véritablement opérationnel, il aurait été nécessaire de localiser les zones vulnérables, c'est-à-dire soumises à un risque de pollution. Or l'évaluation du risque nécessite la prise en compte des paramètres météo-océaniques et des caractéristiques physico-chimiques du polluant, impliquant le couplage du SIG à des modèles de dérive de nappe, le lien avec des bases de données concernant les polluants et la réalisation d'interfaces utilisateurs (Le Berre *et al.*, 2003).

2. PERSPECTIVES

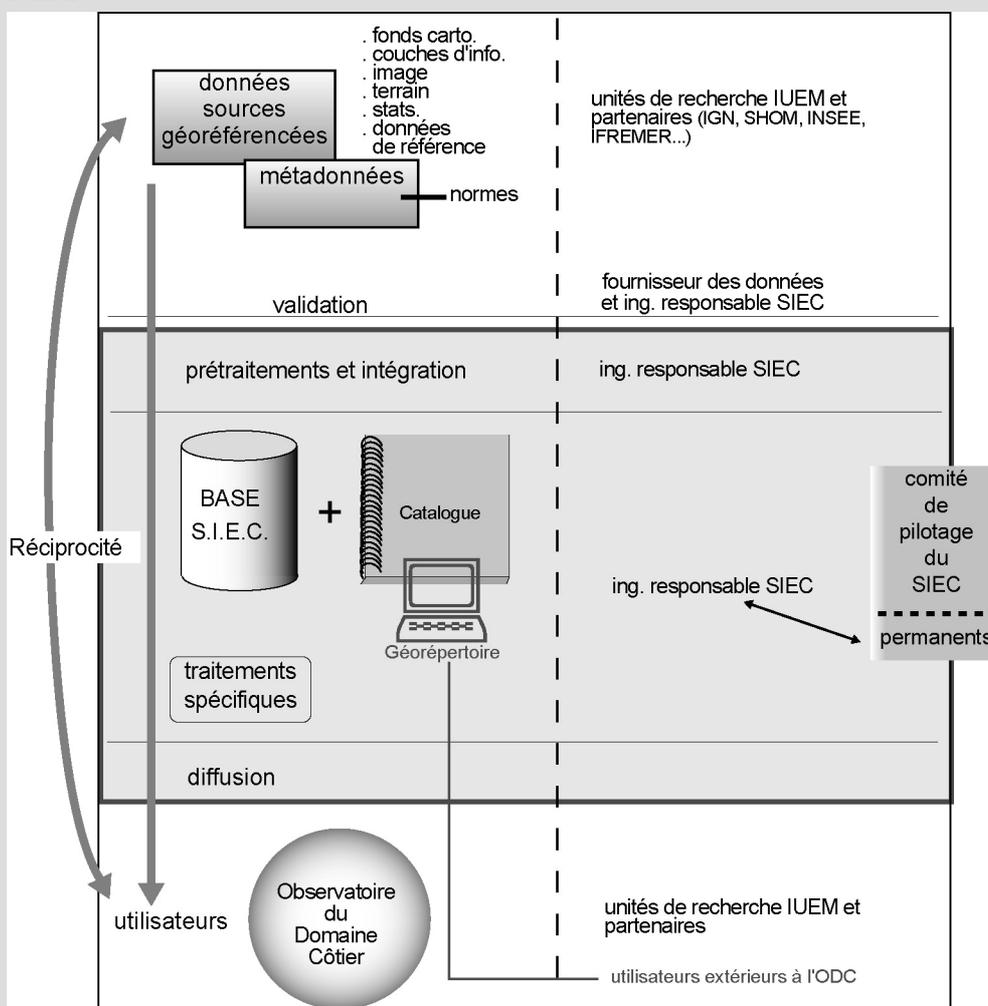
Le SIG mis en place sur le littoral finistérien constitue, dans l'état actuel de son développement, un support d'information de qualité connue dont la valorisation et la communication sont réalisables à l'aide des outils existants. De plus, l'analyse des variables acquises permet la production d'informations inédites fournissant une aide sur le terrain et, sur des problématiques spécifiques, des indicateurs d'évolution des espaces. Néanmoins, les perspectives de développement et d'utilisation des bases d'information géographique élaborées sont conditionnées par leur mise en conformité du point de vue du catalogage (production de métadonnées) et du référentiel géographique. L'acquisition d'informations complémentaires, indispensables à ce stade du projet, implique en effet la multiplication des échanges avec d'autres producteurs, rendant indispensable la normalisation des produits développés.

Les limites majeures du système élaboré proviennent en partie des lacunes liées à la compréhension du fonctionnement des systèmes écologiques et socio-économiques de l'Iroise. Il apparaît que l'analyse des processus spatio-temporels qui en déterminent le fonctionnement ne peut s'appuyer uniquement sur des données ponctuelles et partielles, acquises par les méthodes d'échantillonnage classiques, et justifie de recourir à la télédétection satellitaire et aux produits de la modélisation. Dans les disciplines environnementales, la télédétection est un vecteur d'information incomparable pour l'inventaire, l'étude des changements et la prévision. La multiplicité et la spécialisation des capteurs permettent l'obtention de données à différentes résolutions spectrales et spatiales à l'origine d'informations thématiques diverses (Hinton, 1996). Quant à la modélisation couplée physique-biologie adaptée à l'étude des processus littoraux, elle produit des informations spatio-temporelles relatives aux modes hydrodynamiques (modélisation des houles et des courants), ainsi qu'aux composantes de l'écosystème pélagique et benthique (modélisation écologique). De plus, pour une gestion intégrée de la zone côtière, l'aide à la décision doit s'appuyer, non seulement, sur des connaissances relatives à l'évolution spatio-temporelle de l'écosystème, mais aussi sur la description des activités humaines et de leurs impacts sur le milieu, dont les liens dynamiques peuvent être étudiés par la modélisation socio-économique (Capobianco, 1999).

Le SIG développé sur la mer d'Iroise, s'il veut répondre aux objectifs de compréhension du fonctionnement de l'écosystème et d'aide à la gestion intégrée, fixés au préalable, doit donc s'intégrer à un outil pluridisciplinaire (ill. 19), fondé sur des méthodes complémentaires (Van Zuidam *et al.*, 1998). Dans un tel dispositif, la télédétection permettrait d'alimenter les bases d'information géographique par des variables pertinentes, relatives notamment au milieu marin, en complément des échantillons acquis *in situ* et des bases de données existantes. Celles-ci seraient utilisées pour calibrer et valider les modèles (hydrodynamiques, écologiques et socio-économiques), qui seraient utilisés pour explorer la dynamique de l'écosystème et quantifier les processus en intégrant une large part des interactions entre les différents facteurs. En permettant leur organisation en un système cohérent, le SIG offrirait les moyens de coupler efficacement les données acquises par ces différentes méthodes, et fournirait des outils d'analyse spatiale et de représentation. Enfin, des interfaces et des modules spécialisés d'aide à la décision complèteraient le système de manière à en faciliter l'accès à différents niveaux d'utilisation et à le rendre opérationnel dans le contexte d'une gestion intégrée de la zone côtière finistérienne (encart 11).

ENCART 11. Conceptualiser la mise en place d'un SIG à vocation scientifique et opérationnelle d'aide à la gestion et au développement durable.

La mise en œuvre d'un SIG opérationnel d'aide à la gestion ne peut s'envisager que dans une structure pérenne, dotée de ressources humaines et financières conséquentes. Elle se traduit par la mise en commun de données, de compétences, de ressources matérielles, et par la multiplication des échanges entre partenaires (De Sède & Thériault, 1996). Dans le domaine de la planification, les institutions qui utilisent les outils géomatiques s'accordent sur le fait que leur opérationnalité dépend de divers facteurs qu'il convient d'étudier lors d'une phase conceptuelle à mener avant l'implantation physique du système (Muller *et al.*, 2000). Concernant la mer d'Iroise, les bases d'information géographique sont valorisées par diverses actions de recherche mais elles ne répondent que ponctuellement à des requêtes d'aide à la décision dans le cadre de collaboration avec les gestionnaires. Pour que ces derniers puissent tirer profit des possibilités offertes par les bases d'information géographique existantes, il semble indispensable qu'un transfert soit réalisé. Il doit cependant préserver l'approche territoriale (mer d'Iroise dans son ensemble) et le lien avec les scientifiques producteurs d'information géographique. La création d'un Parc National Marin en Iroise pourrait offrir une structure pérenne permettant de conserver l'approche écosystémique du territoire, essentielle au bon fonctionnement du système, et garantir un cadre intégrateur et cohérent, favorisant les collaborations avec l'ensemble des organismes étudiant le milieu (Le Berre I. & Gourmelon F., 2000). Ce SIG à vocation opérationnelle pourrait entretenir des liens privilégiés avec le Système d'Information pour l'Environnement Côtier élaboré dans le cadre du projet d'Observatoire de l'Institut Universitaire Européen de la Mer ; les deux pôles permettant des échanges facilités et accrus, l'adoption de normes de qualité et le partage des ressources entre scientifiques et gestionnaires.



Organigramme du SIEC (source : Gourmelon & Le Berre, 2003)

Dans la continuité des recherches menées sur le fonctionnement et l'évolution de la zone côtière finistérienne, plusieurs projets sont envisageables à court terme et sur des problématiques spécifiques impliquant des échelles locales et une démarche finalisée d'aide à la gestion des espaces littoraux sensibles :

- La notion d'habitat potentiel d'espèces d'intérêt patrimonial pour l'aide au zonage des milieux littoraux protégés (milieu marin, îles et îlots) ;
- le suivi des changements d'occupation des sols et l'étude des interactions entre les dynamiques naturelles et les dynamiques sociales, pour l'élaboration de scénarios d'évolution des espaces semi-naturels (îles) ;
- l'élaboration d'un modèle fonctionnel sur les îlots marins protégés : étude des relations faune-flore (îlots).

Ces propositions de recherche s'inscrivent, par la démarche utilisée et les méthodologies employées, dans les principes énoncés en biologie de la conservation. Discipline relativement récente, elle s'appuie sur les pratiques et les savoirs de l'écologie, de la biogéographie, de la génétique, de l'anthropologie, de l'économie et de la sociologie pour contribuer au maintien et à l'utilisation durable de la diversité biologique de la planète, rejoignant par cet objectif un de ceux du programme Mab de l'UNESCO (Barbault, 2000). Néanmoins, leur réalisation sera conditionnée par des avancées méthodologiques. Il apparaît indispensable en effet :

- de tester l'apport des nouvelles méthodes géomatiques d'acquisition de données à haute résolution spatiale au suivi à long terme des espaces littoraux ;
- et d'évaluer l'apport de la modélisation à la connaissance et à la représentation des processus dynamiques.

2.1. Perspectives méthodologiques

2.1.1. Apport des nouvelles méthodes d'acquisition de données à haute résolution spatiale au suivi à long terme des espaces littoraux

Le suivi à long terme des processus environnementaux implique de disposer de données spatiales bien adaptées à l'étude du phénomène étudié. Les écosystèmes sont composés de plusieurs sous-systèmes emboîtés correspondant à différents niveaux d'organisation. Leurs propriétés ne sont discernables qu'à des échelles de temps et d'espace spécifiques. De plus, la discrimination des objets géographiques dépend de l'adéquation entre l'échelle spatiale intrinsèque, liée à la taille des individus impliqués dans le processus et l'échelle de mesure (résolution géométrique des capteurs de télédétection, échelle cartographique des documents analogiques) (Janodet & Blasco, 1993). Il existe donc un lien permanent entre l'objet à identifier spatialement et l'échelle d'analyse. En règle générale, plus les objets sont petits, plus l'étude des processus spatio-temporels qui les caractérisent nécessite une description en classes typologiques nombreuses et spécifiques. Evidemment, il est nécessaire que l'information acquise à une échelle spatio-temporelle donnée soit transposable à d'autres niveaux scalaires.

Les recherches menées sur la zone côtière de la mer d'Iroise ont jusqu'à présent utilisé comme support aux inventaires, des images aériennes sous forme analogique et plus récemment sur support numérique. Mais il est apparu que le gain significatif en termes de résolution spatiale opéré par les produits numériques actuels allait de pair avec une diminution de la qualité photographique, conduisant dans certains cas à l'impossibilité d'utiliser ce type de support sur le terrain. De plus, les tests concernant la classification automatique d'images aériennes ont donné des résultats moyens malgré une mise en œuvre méthodologique

relativement lourde (Gourmelon, 2002). Enfin, la fréquence des missions aéroportées de l'IGN, de l'ordre de 5 à 10 ans, n'est pas toujours suffisante ou intervient à des périodes peu propices à l'observation de certains processus.

Ces constats conduisent à recourir à d'autres types de données, d'autant plus que les progrès technologiques récents opérés en télédétection, en géodésie spatiale et en photogrammétrie, laissent supposer des développements méthodologiques intéressants permettant la production d'informations spatiales utilisables à des échelles relativement fines, adaptées à la description et à l'analyse de divers processus littoraux (ill. 73).

La télédétection. De manière à s'affranchir de la subjectivité liée à une approche anthropocentrique de l'analyse des images aériennes et des erreurs de positionnement occasionnés par un repérage manuel des objets, susceptibles d'entraîner des aberrations dans l'évaluation des changements spatiaux (Cherrill & McClean, 1995), il est nécessaire de tester les possibilités offertes par les traitements automatiques d'images satellitaires à très haute résolution spatiale. Les résultats des expérimentations du programme préparatoire à l'utilisation de Spot 5 montrent le vaste champ d'applications de l'utilisation des images qu'il délivre (Collectif, 2001-2002). Ce satellite, lancé au printemps 2002, offre, par rapport aux vecteurs antérieurs (Spot 1 à 4), un gain tout à fait significatif en termes de précision de la mesure : un supermode à 2.5 mètres et des modes panchromatique et multibande, respectivement à 5 et 10 mètres de résolution spatiale. Les résultats acquis lors des tests préparatoires sur l'extraction d'objets thématiques permettent d'envisager des possibilités intéressantes pour la détection d'états de surface à des échelles comprises entre le 1 : 10 000 et le 1 : 25 000. Ces résultats restent à confirmer, notamment par les études qui seront réalisées sur le littoral dans le cadre de l'appel à propositions de recherche lancé fin 2002 par le CNES et l'IFEN², dans la perspective de la mise en œuvre d'un observatoire du littoral et afin de tester la complémentarité de l'imagerie aérienne et satellitaire pour une observation coordonnée et pérenne des territoires concernés.

Pour des niveaux scalaires supérieurs, les capteurs hyperspectraux aéroportés de type Casi (Compact Airborne spectrographic Imager) assurent une acquisition dans plusieurs dizaines de bandes spectrales centrées sur les longueurs d'onde du visible et du proche infrarouge avec une résolution spatiale de l'ordre du mètre. Les images délivrées ont démontré l'intérêt de leur utilisation pour des inventaires nécessitant la très haute résolution spatiale, sur des thématiques telles que l'évaluation de l'effet de la pollution sur les forêts (Ekstrand, 1994) et pour l'inventaire des habitats intertidaux (Hunter & Power, 2002).

En complément de ces données adaptées à la description des ressources terrestres et marines, la scannographie par laser aéroporté de type Lidar, « light detection and ranging », peut fournir des données de grande précision relatives essentiellement aux morphologies terrestres et sous-marines (Van de Kraats, 2000).

La photogrammétrie. Par le traitement photogrammétrique de couples stéréoscopiques d'images aériennes, il est possible d'extraire automatiquement des modèles numériques de terrain (MNT) dont la précision est uniquement conditionnée par la résolution spatiale des images à partir desquelles il est produit. Un MNT de grande précision pourrait permettre l'ortho-rectification d'images acquises par exemple en ULM, qui posent de sérieux problèmes géométriques mais offrent une excellente définition et une grande souplesse d'acquisition tant scalaire que temporelle.

² Sur le littoral finistérien, deux propositions de recherche, soumises par le laboratoire Géomer, ont été acceptées en 2003 dans le cadre de cet appel à proposition de recherche. L'une concerne la cartographie synthétique du littoral finistérien, l'autre la cartographie de la végétation des îles et îlots de la mer d'Iroise.

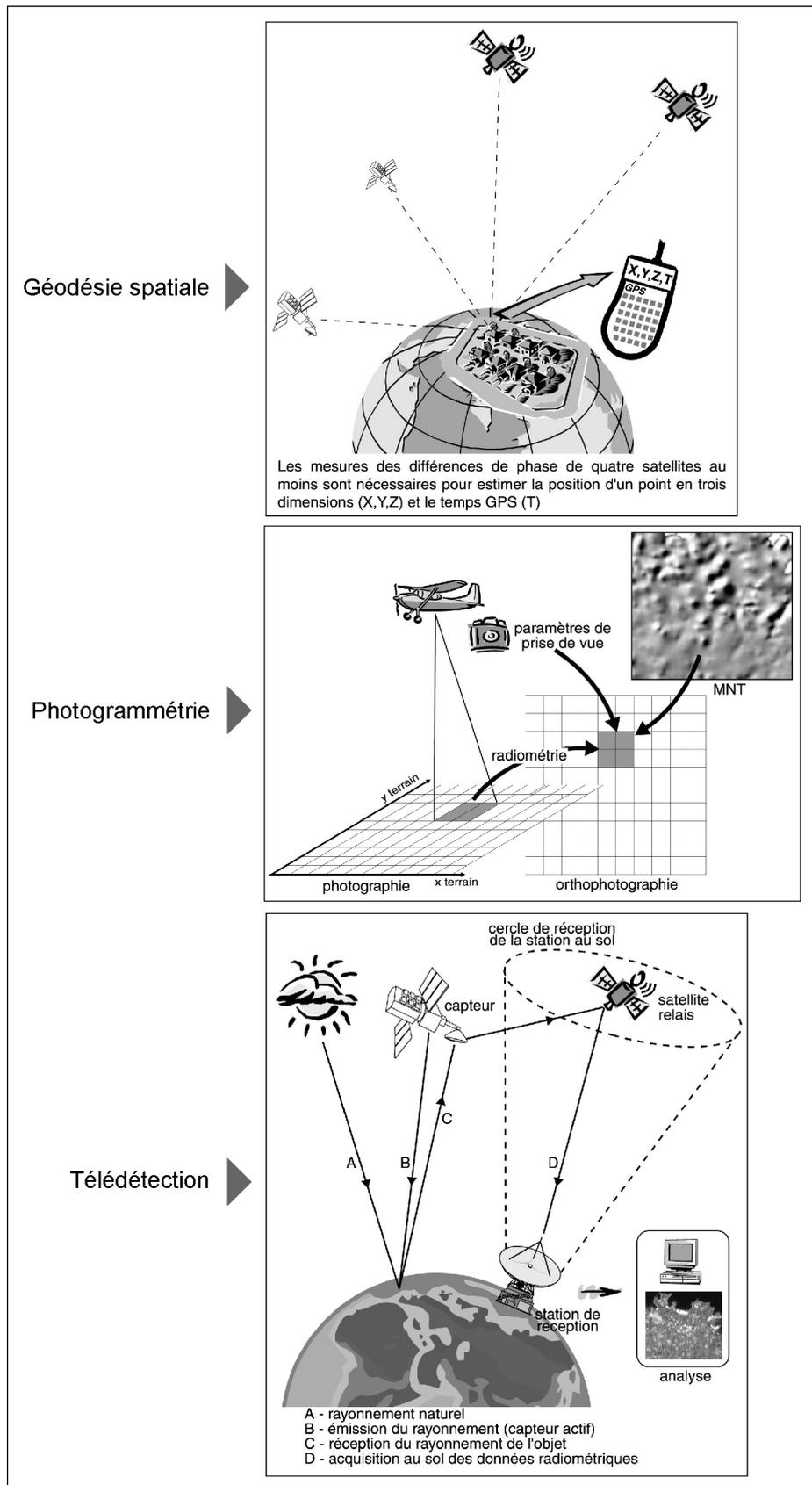


Illustration 73. Quelques nouvelles sources de données géospatiales : géodésie spatiale, photogrammétrie et télédétection (d'après Gourmelon, 2002).

La géodésie spatiale développe et utilise des systèmes de positionnement par satellite, permettant une localisation sur le terrain en trois dimensions, avec une précision variable selon le système utilisé. Les mesures peuvent concerner divers aspects d'un suivi, la réalisation de Modèle Numérique de Terrain et le géoréférencement dans une base d'information géographique de supports analogiques. L'utilisation de cette méthode de production d'informations localisées peut s'avérer intéressante pour pallier l'indisponibilité de documents aériens sur des petits espaces nécessitant un suivi régulier.

Une des perspectives de recherche est donc de mener des études utilisant, en synergie, ces méthodes géospatiales pour la production d'une information environnementale de qualité tant marine que terrestre.

2.1.2. Apport de la modélisation à la connaissance et à la représentation des processus dynamiques

La compréhension des processus de fonctionnement et d'évolution de l'environnement est fondée sur l'analyse des interactions entre différentes variables socio-économiques, physiques et naturelles. La dimension temporelle de ces processus implique de disposer de méthodes analytiques fondées sur la modélisation et la simulation dont les finalités sont diverses : prédiction de la dynamique des milieux, compréhension des relations entre différents processus, confrontation de différents points de vue... (ill. 74).

Applications	Etat des connaissances	Problématiques actuelles	Méthodologies	Outils
impact du climat	rien	quand et où	suivi	télé-détection
futures interactions surface-atmosphère	quand dans le passé	quand dans le futur	modélisation probabiliste analyses de séries temporelles	chaîne de Markov modèle logistique
identification des facteurs	où, quand dans le passé	pourquoi dans le passé	modélisation statistique multivariée	modèle de régression multiple
conservation des habitats	où, quand dans le passé	où dans le futur	modélisation spatiale empirique	SIG et modèle spatial/statistique
planification nationale de l'utilisation des sols	où, quand et pourquoi dans le passé	quand et où dans futur	modélisation écosystémique	modèle de simulation spatiale
prévention, restauration	où, quand et pourquoi dans le passé	pourquoi dans le futur	modélisation économique	modèle de von Thünen

Illustration 74. Exemple d'utilisation de la modélisation pour l'étude des changements d'occupation des sols (d'après Lambin, 1997).

Dans les approches écologiques, un des objectifs de la mise en œuvre des modèles est de prédire des changements d'un état (biodiversité, paysage...) en fonction de paramètres indépendants (utilisation humaine de la ressource, contraintes climatiques...). Ces modèles, dont l'objectif peut être de simuler l'impact des variables socio-économiques et environnementales sur la surface terrestre sont généralement mis en œuvre selon deux approches (Lambin, 1997 ; Lambin *et al.*, 1999). Soit une modélisation empirique (ou prédictive) est réalisée, à partir d'une réalité décrite par de nombreuses données spatiales. Elle fournit des projections à court terme de l'ordre de quelques années, du fait de la non-stationarité des changements d'utilisation des sols. Soit une modélisation intégrée peut être

mise en œuvre dans la mesure où la prise en compte des interactions entre des savoirs diverses et variés, entre différents niveaux scalaires, entre différents pas de temps, entre les dynamiques sociales et les dynamiques naturelles..., est possible. Les résultats attendus de la modélisation intégrée sont d'établir des scénarios prospectifs à plus long terme.

La modélisation peut être réalisée selon différentes méthodes : modèles linéaires, réseaux neuronaux, régressions logistiques, systèmes multi-agents. Ces derniers sont actuellement utilisés avec succès dans de nombreuses applications environnementales, par exemple pour modéliser l'impact sur le milieu de pratiques d'élevage intensif (Tissot, 2003) ou celui de la chasse sur une population animale (Bousquet *et al.*, 2001), et pour tester différents scénarios de gestion environnementale (Etienne & Le Page, 2002).

Dans bien des cas, la tendance actuelle est de coupler la modélisation aux SIG de manière à ce que les modèles s'appuient sur des données de calibration pertinentes et que les résultats de la simulation puissent en retour être validés par des données spatiales cohérentes. Ce couplage possède également l'avantage, non négligeable, de fournir des résultats modélisés spatialement explicites, rendant plus faciles leur communication à des tiers.

2.2. Perspectives thématiques

2.2.1. Notion d'habitat potentiel d'espèces d'intérêt patrimonial pour l'aide au zonage des milieux littoraux protégés

Ces vingt dernières années, la prise de conscience internationale de la dimension planétaire de nombreux phénomènes écologiques, a entraîné des actions de conservation des espèces et des espaces, de manière à maintenir un haut degré de biodiversité des écosystèmes terrestres et marins. Dans ce contexte, il apparaît que les SIG en synergie avec la télédétection spatiale, constituent des outils performants d'aide à la gestion environnementale (Bridgewater, 1993). Leurs principales fonctions permettent de rassembler des données géospatiales de source et de nature diverses, et de les analyser dans une double perspective spatiale et temporelle. Les résultats de la démarche peuvent contribuer efficacement à la mise en œuvre de stratégies conservatoires (Clark & Slusher, 2000). Ainsi, aux Etats-Unis, le « GAP Analysis Program » de l'USGS propose une méthode d'évaluation des habitats d'intérêt patrimonial au sein du réseau des espaces protégés, basée sur la complémentarité de la télédétection, des SIG et de la modélisation (Scott *et al.*, 1993 ; Davis *et al.*, 1990) (ill. 75).

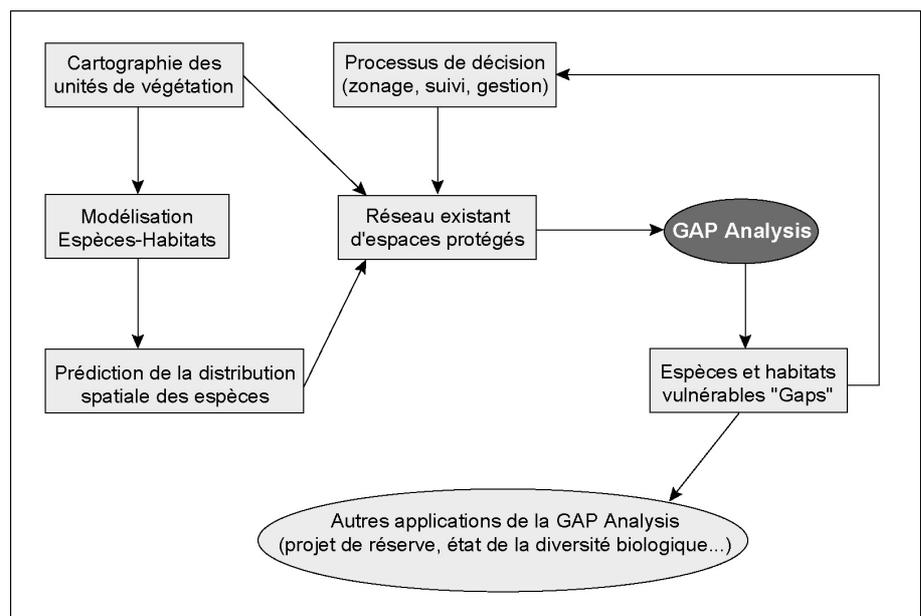


Illustration 75. GAP : la méthode (d'après Jennings, 2000).

En dix ans, les diverses applications du programme ont conduit à identifier des espaces d'intérêt majeur non pris en compte dans le zonage de réserves existantes (Gonzales-Rebeles *et al.*, 1998), en se basant essentiellement sur la notion d'habitat potentiel et sur la prise en compte des zones de connexion biologique (Wiens, 1996). Au vu des résultats acquis en termes de connaissances du fonctionnement des écosystèmes, la méthode a été appliquée dans différentes recherches en écologie du paysage, qui concernent essentiellement la faune sauvage terrestre : oiseaux (Tucker *et al.*, 1997), insectes (Aspinall & Matthews, 1994), poissons d'eau douce (Lunetta *et al.*, 1997), mammifères (Bian & West, 1997 ; Khaemba & Stein, 2000 ; Pereira & Itami, 1991) ; et dans une moindre mesure l'écosystème marin : algues (Bushing, 1997), mammifères (Moses & Finn, 1997). Ces différentes applications fournissent une évaluation des mesures conservatoires prises dans des espaces protégés existants ou procurent une aide pour l'évaluation du patrimoine écologique. Dans tous les cas, les résultats obtenus contribuent à améliorer la connaissance du fonctionnement d'un écosystème remarquable, et constituent une aide opérationnelle aux prises de décision en matière de gestion.

Du point de vue méthodologique, ce projet «Notion d'habitat potentiel d'espèces d'intérêt patrimonial pour l'aide au zonage des milieux littoraux protégés » qui s'inscrit dans un cadre pluridisciplinaire, est fondé sur deux étapes successives :

Phase 1 : identification des enjeux en termes de gestion

- choix des espèces faunistiques d'intérêt patrimonial (mammifères marins, oiseaux nicheurs...), caractérisation des variables écologiques intervenant dans leur habitat,
- Choix des habitats naturels à préserver.

Phase 2 : analyse des données

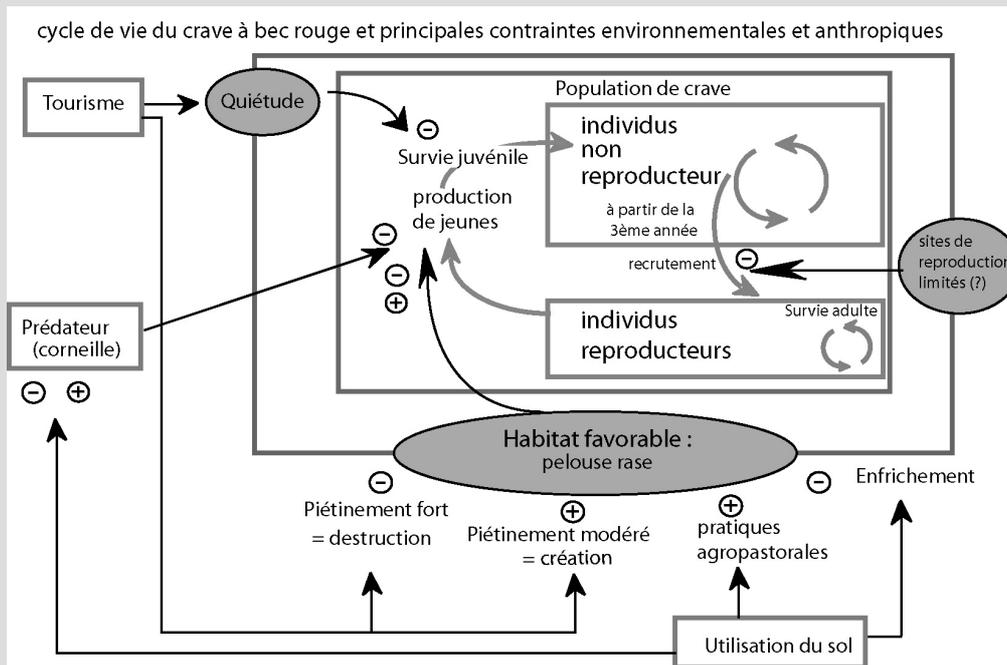
- mise à jour de la base d'information géographique par l'introduction de données relatives à la distribution géographique des espèces retenues,
- analyse spatiale des informations et modélisation permettant de mettre en évidence 1) pour les espèces ciblées, leurs habitats potentiels, 2) et pour les milieux, l'intérêt biologique qu'ils présentent,
- validation des résultats,
- analyse multi-critères permettant la prise en compte de l'ensemble des espaces d'intérêt mis en évidence pour chacune des espèces et détermination des zones d'intérêt majeur,
- confrontation des résultats produits avec les zonages existants.

Les résultats attendus s'inscrivent dans une démarche scientifique finalisée pouvant contribuer à la connaissance et à la préservation des espèces et des espaces remarquables. Du point de vue scientifique, ils mettront en évidence les relations spatiales existant entre différentes espèces animales et les composantes naturelles et physiques de leur habitat (encart 12). La prise en compte de l'ensemble des informations produites devrait permettre d'identifier les espaces remarquables et sensibles. Du point de vue de la gestion, ces résultats concrets contribueront aux prises de décision relatives à la mise en place d'aires protégées qui tiennent compte non seulement des espaces d'intérêt reconnu mais aussi des habitats potentiels.

ENCART 12. L'habitat du crave à bec rouge sur l'île d'Ouessant.

Le projet *Etude des interactions usages/végétation/faune d'un espace protégé*, entrepris en 2002, en partenariat avec le Centre d'Etudes du Milieu Ouessant, le Parc Naturel Régional d'Armorique et le Muséum National d'Histoire Naturelle concerne une petite population animale d'intérêt patrimonial reconnu, le crave à bec rouge (*Pyrrhocorax pyrrhocorax*). Ce petit corbeau sédentaire niche dans les falaises de l'île d'Ouessant. Sa population, d'une douzaine de couples est la plus importante de Bretagne. Cette situation est toutefois extrêmement fragile car, quelles que soient les échelles considérées (européenne, nationale et régionale), les populations déclinent partout depuis plusieurs décennies.

Le projet en cours pose le problème de la viabilité du crave sur l'île d'Ouessant, au vu des conditions environnementales actuelles et des dynamiques territoriales mises en évidence depuis les années 1950. S'inscrivant dans une démarche scientifique appliquée selon les principes de la biologie de la conservation, la recherche entreprise a pour objectifs : de décrire les relations entre l'habitat, en tenant compte des types de milieux littoraux (aires d'alimentation) et de l'utilisation anthropique de l'espace (dérangement, piétinement, étrépage) et le succès reproducteur (paramètre essentiel pour la viabilité de la population), puis d'analyser les relations entre l'embroussaillage des milieux et la régression de la population de crave, constatée depuis 1950. Les résultats attendus sont de mesurer l'impact des changements d'utilisation et d'occupation de la frange littorale sur une population animale protégée, de manière à contribuer à sa gestion conservatoire.



Source : Kerbiriou, inédit

Testée sur la mer d'Iroise où les enjeux de protection sont d'actualité et qui dispose d'un contexte opérationnel favorable en termes de données et de compétences scientifiques, cette recherche pourrait être transposée ultérieurement à d'autres espaces côtiers d'intérêt patrimonial (réserves, parcs...).

2.2.2. Suivi des changements d'occupation des sols et étude des interactions entre les dynamiques naturelles et les dynamiques sociales, pour l'élaboration de scénarios d'évolution des espaces semi-naturels

A méso-échelle, les conditions topographiques et pédologiques interviennent dans la répartition spatiale des groupements végétaux terrestres. Les variables topographiques, telles que la pente et l'exposition, déterminent en effet des micro-climats influençant la végétation, au même titre que la nature et l'hydromorphie des sols. Se surimposent à ces conditions physiques, les facteurs anthropozoogènes qui modifient les phytocœnoses. Ces dernières années, plusieurs études menées en écologie du paysage, se sont intéressées à la modélisation de la végétation dans différents contextes spatio-temporels. Concernant les espaces naturels,

dépourvus de pression anthropique depuis plusieurs décennies, les probabilités d'apparition des formations végétales sont modélisées en fonction de critères topographiques (Bolstad *et al.*, 1998 ; del Barrio *et al.*, 1997 ; Ostendorf & Reynolds, 1998), et géologiques (Davis & Goetz, 1990 ; Moore *et al.*, 1991). Ces recherches conduisent à proposer des états de végétation potentielle, à émettre des hypothèses relatives au fonctionnement de l'écosystème, et à améliorer les résultats de la photo-interprétation et du traitement d'images satellitaires. D'autres applications concernent les espaces artificialisés où la composition du tapis végétal dépend non seulement de facteurs abiotiques, mais aussi anthropiques (Cohen *et al.*, 1998 ; Van Horssen *et al.*, 1999 ; Van de Rijt *et al.*, 1996). Les résultats sont utilisés dans des scénarios de gestion pour évaluer l'impact d'une activité humaine sur le milieu naturel. Une autre approche des relations entre les dynamiques naturelles et sociales est basée sur la simulation multi-agents (SMA) (Etienne & Le Page, 2002). Dans ce cas, elle a pour objectif de modéliser l'action sur le milieu de différentes options de gestion en s'appuyant sur les stratégies de gestion foncière, les activités humaines (agriculture, pastoralisme...) et les ressources naturelles. En créant des représentations virtuelles des dynamiques spatiales, ce type de modèle peut intervenir efficacement au cours des processus d'aide à la négociation, entrepris dans le cadre de projets d'aménagement et de gestion, ou pour tester l'impact sur les milieux de politiques publiques (Lardon *et al.*, 1998, 2001).

Cette recherche s'envisagera en deux axes.

Essai de modélisation du fonctionnement du système insulaire

La méthode reposera sur l'analyse d'informations géospatiales mises en forme dans la base d'information géographique (*SIGOuessant*), sur la modélisation de la végétation par une analyse de régression faisant intervenir une variable dépendante (formations végétales) et des variables explicatives (relief, sols), et sur l'évaluation des résultats par la confrontation avec une cartographie de terrain.

- La base d'information géographique fournira l'ensemble des variables nécessaires à la modélisation.

Variables explicatives : Sur l'île d'Ouessant, comme sur bon nombre d'îles de la façade atlantique, l'exposition des milieux aux conditions climatiques (vents, embruns) est un critère à prendre en compte dans une analyse concernant la végétation. Par ailleurs, la végétation est sensible aux types de sols et à leur hydromorphie. Ces trois critères seront déduits de l'analyse d'un MNT (pente, exposition, limite de bassin versant) et d'une cartographie des sols (nature des sols et hydromorphie).

Variable dépendante : Elle sera fournie par un levé de la végétation, décrivant les formations naturelles, selon un plan d'échantillonnage régulier et ponctuel, réalisé au printemps.

- La modélisation : Afin de tester la probabilité d'apparition de chaque formation végétale naturelle, en fonction de la contribution des variables physiques, une analyse de régression sera réalisée. Les équations de régression résultantes permettront ensuite d'élaborer une cartographie des formations végétales potentielles.
- L'évaluation des résultats. La cartographie de la végétation potentielle sera confrontée à la réalité du terrain, fournie par un inventaire exhaustif de la végétation (2002) réalisé classiquement par la photo-interprétation d'ortho-images aériennes (IGN) et par la classification automatique d'images satellitaires (Spot 5) validées sur le terrain. La confrontation des deux informations, végétation prédite et végétation observée, permettra d'évaluer les résultats de la modélisation.

La méthode proposée a pour objectif de modéliser la végétation naturelle littorale, à partir de critères physiques pour établir une cartographie prédictive des principales formations végétales. Les résultats attendus sont :

- de déterminer les relations entre les différents types de végétation observés sur le terrain et les caractéristiques physiques du milieu considéré, notamment climatiques, et contribuer ainsi à l'élaboration d'un modèle de fonctionnement du milieu,
- de proposer une cartographie basée sur les probabilités d'apparition des formations en fonction de critères environnementaux,
- de comparer et d'analyser les différences observées entre la cartographie prédite et la cartographie « réelle » ,
- d'extrapoler le modèle aux espaces artificialisés pour déterminer un état potentiel de la végétation en l'absence de perturbations d'origine anthropique.

Si la méthode est probante, elle pourrait conduire à la mise en place de protocoles d'échantillonnage de la végétation basés sur des observations ponctuelles et à l'amélioration des performances des classifications d'images (satellitaire et aérienne) par la prise en compte du critère de probabilité d'apparition des taxons. A moyen terme, la méthode pourrait également être appliquée à une échelle spatiale plus fine, sur les îlots marins protégés.

Simulation des relations entre les dynamiques sociales et les dynamiques naturelles

Cette partie du projet prévoit d'utiliser l'outil de modélisation Cormas (Common-Pool resources and multi-agent systems), élaboré par le CIRAD (Bousquet *et al.*, 1998), dans le cadre de la proposition de recherche « Organisation de l'accès aux ressources et biodiversité : application aux Réserves de Biosphère françaises »³. Cette plate-forme multi-agents a été utilisée avec succès dans des processus de décision concernant la gestion des ressources naturelles (D'Aquino *et al.*, 2001). La démarche pluridisciplinaire inhérente à la compréhension des dynamiques écologiques et sociales et de leurs interactions impliquera des compétences en sciences humaines (géographie, sociologie), en sciences de la nature (écologie, biologie) et en sciences et technologies de l'information et de la communication (informatique) (ill. 76).

Le modèle sera développé selon une démarche privilégiant les milieux ouverts sur des territoires subissant, depuis plusieurs années, une dynamique de fermeture des paysages dont la cause est d'origine anthropique (abandon des pratiques agro-pastorales, installation de peuplements forestiers...). Les relations spatio-temporelles entre les dynamiques naturelles et les dynamiques des usages seront traitées en analysant différents processus tels que les dynamiques foncières qui contrôlent l'accès aux ressources, l'utilisation des milieux par les acteurs, les mécanismes de répartition et de transfert des ressources. La représentation du territoire sera fondée sur les données contenues dans un SIG concernant le foncier, l'occupation et l'utilisation des sols. Le SMA, une fois implémenté, servira à l'animation d'un jeu de rôles mettant en scène différents usagers de l'espace dans un contexte virtuel mais proche de la réalité, suivant la méthodologie mise en œuvre par D'Aquino *et al.* (2002).

Les résultats attendus sur l'île d'Ouessant consistent à représenter les ressources naturelles et leurs dynamiques selon différents points de vue d'acteurs, puis à évaluer à différentes échelles spatiales et temporelles l'impact sur les ressources des stratégies de gestion de chaque type

³ Appel à proposition 2002 de l'Institut Français de la Biodiversité : Dynamique de la biodiversité et modalités d'accès aux milieux et aux ressources de l'Institut Français de la Biodiversité, projet proposé par l'INRA en collaboration avec le CIRAD, le CNRS, différentes universités dont l'UBO et le programme Mab de l'UNESCO, responsable scientifique : M. Etienne (INRA, Avignon), accepté en 2003.

d'usager. En établissant un lien tangible entre les dynamiques naturelles et les dynamiques sociales, et en produisant une représentation spatiale associée à l'action des pratiques humaines sur le milieu, la méthode mise en œuvre pourrait permettre de confronter différents points de vue et de contribuer significativement aux processus de négociation en termes de gestion des espaces semi-naturels.

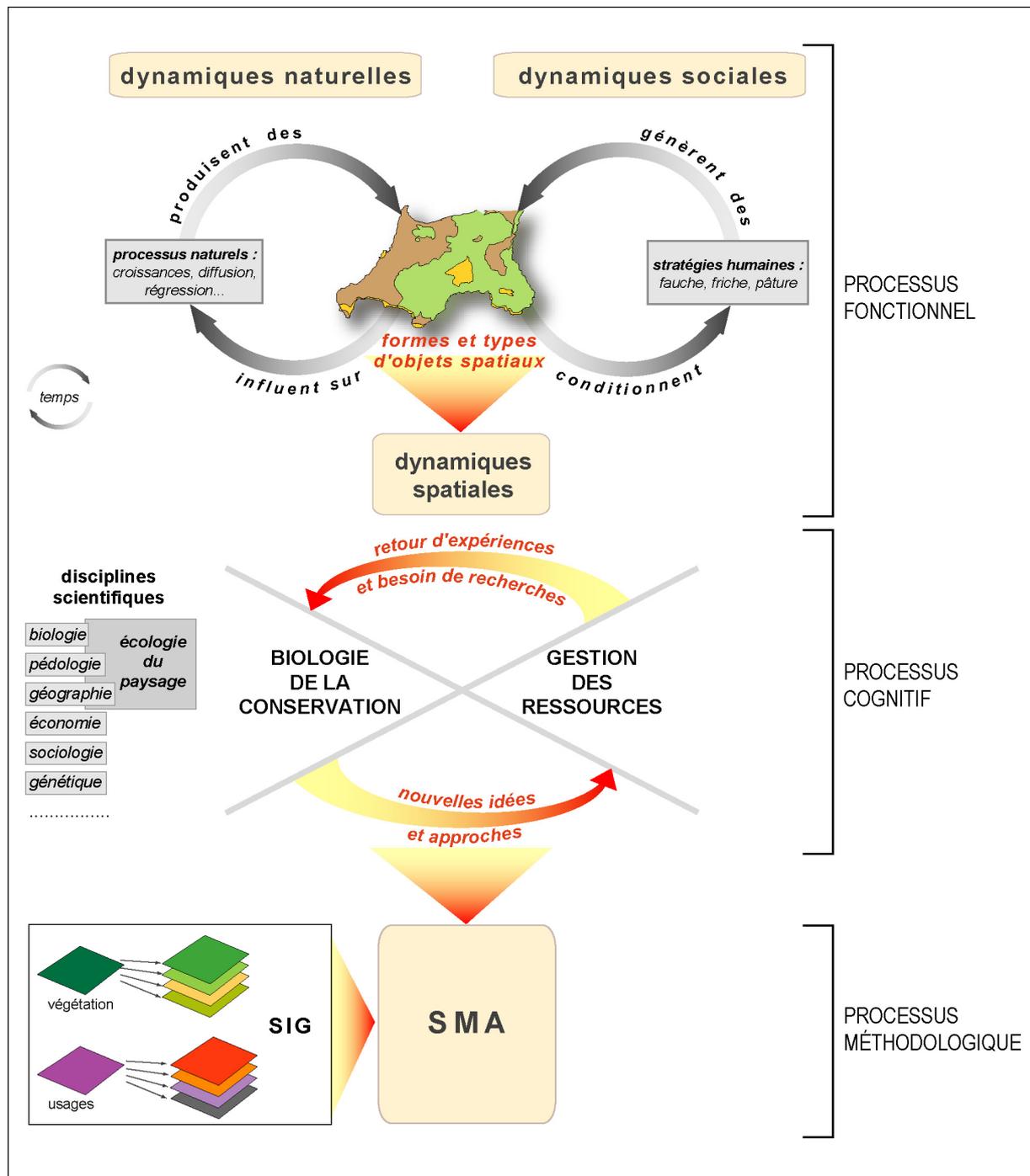


Illustration 76. Modélisation des dynamiques sociales et des dynamiques naturelles sur l'île d'Ouessant : contexte général (d'après Barbault, 2000 ; Lardon *et al.*, 1998 ; Moss, 2000).

Ultérieurement, une approche modélisatrice de ce type pourrait être appliquée à l'Afrique de l'Ouest, en s'intégrant aux démarches participatives visant à promouvoir les initiatives des

populations locales dans les Pays en Voie de Développement. Dans le cadre du projet actuellement en cours d'élaboration « Bilan prospectif de l'évolution à long terme de l'environnement côtier d'Afrique de l'Ouest »⁴, dont l'objectif est de mobiliser l'information collectée depuis les années 1950 sur la façade ouest-africaine afin de mesurer les changements intervenus et de proposer des scénarios d'évolution probable dans le contexte de la planification côtière engagée, ce type d'approche modélisatrice pourrait permettre de simuler les conséquences des actions de développement et de conservation sur l'environnement.

2.2.3. *Elaboration d'un modèle fonctionnel sur les îlots marins protégés : étude des relations faune-flore*

La flore et la végétation terrestre des petites îles et des îlots marins sont généralement plus pauvres et plus simplifiées que sur les littoraux continentaux proches, en raison de leurs faibles surfaces (Mac Arthur & Wilson, 1963) et des fortes contraintes écologiques liées à leur exposition aux vents marins et aux embruns. Ces sites micro-insulaires, parfois d'une grande originalité écologique, sont par conséquent très sensibles aux modes de gestion dont ils font l'objet, qu'ils soit interventionnistes ou non, ainsi qu'aux perturbations ou dysfonctionnements écologiques (Bioret, 2002). La mise en réserve de certains îlots marins a renforcé la tranquillité de ces sites et a créé des conditions favorables à l'installation d'oiseaux marins, engendrant souvent des phénomènes de dégradation du tapis végétal et des sols dans le cas de colonies de grande densité. L'impact des populations d'oiseaux marins nicheurs et des lapins sur les milieux naturels littoraux est étudié depuis les années cinquante sur des îles et îlots du Pays de Galles (Goodman & Gillham, 1954), en Australie (Gillham, 1961), en Afrique du Sud (Gillham, 1962) et au Canada (Hogg *et al.*, 1989). Il se traduit par une double perturbation. D'origine physique, elle est liée à l'arrachage de matériaux, au piétinement et au tassement de la végétation sur les sites de nidification. D'origine chimique, elle se caractérise par une augmentation importante des concentrations en éléments nutritifs du sol engendrée par les dépôts de guano et les pelotes de réjection (Hogg & Morton, 1983). En France, les interactions entre les oiseaux marins et la végétation littorale ont surtout été étudiées sur les îlots de Bretagne (Bioret & Géhu, 1996) et sur les archipels méditerranéens (Médail & Vidal, 1998) (ill. 77).

La recherche menée depuis une dizaine d'années sur les dynamiques de la végétation des îlots marins en réserve a conduit à évaluer la qualité phytocœnotique des milieux terrestres, à analyser les changements spatiaux intervenus sur des laps de temps significatifs et à cerner les facteurs écologiques en partie responsables des dynamiques constatées (Bioret & Gourmelon, 1997). Néanmoins, pour contribuer efficacement aux objectifs et aux modalités de gestion de ces espaces, il apparaît indispensable d'analyser l'impact des populations animales sur la végétation et de proposer aux gestionnaires des représentations spatiales des dynamiques du tapis végétal sous l'effet d'une pression animale fluctuante dans le temps et l'espace. Les analyses spatiales menées jusqu'à présent ont donné des résultats décevants qui mettent en cause les procédures disponibles dans un environnement de type SIG, inadaptés au traitement de ce type de problématique (Gourmelon *et al.*, 2003).

⁴ Ce projet, sous la responsabilité de J. Quensière (IRD) est actuellement en cours de formalisation. Il devrait faire l'objet d'une collaboration entre différents organismes tels que l'IRD, l'UICN, le WWF, la FIBA, le CNRS et plusieurs centres de recherche africains.

Il apparaît donc intéressant de tester l'apport de la modélisation dans la compréhension d'un processus relativement complexe mettant en jeu l'interaction d'une part entre différents savoirs résultant des techniques de terrain (résultat des expérimentations) et de différentes disciplines académiques (botanique, biologie, géographie, informatique), et d'autre part entre des variables botaniques et biologiques fonctionnant à des échelles spatiales et temporelles propres. Différents types de modèle seront testés sur cette problématique tels que les modèles de régression et la simulation multi-agents qui exploiteront notamment les informations contenues dans la base d'information *Basilots*. Les résultats attendus consistent à apporter des éléments de compréhension aux dynamiques végétales constatées depuis une décennie sur différents îlots marins en réserve, puis à élaborer des scénarios prospectifs et des représentations spatiales d'évolution théorique des milieux en relation avec la croissance, le maintien ou l'augmentation des populations animales.

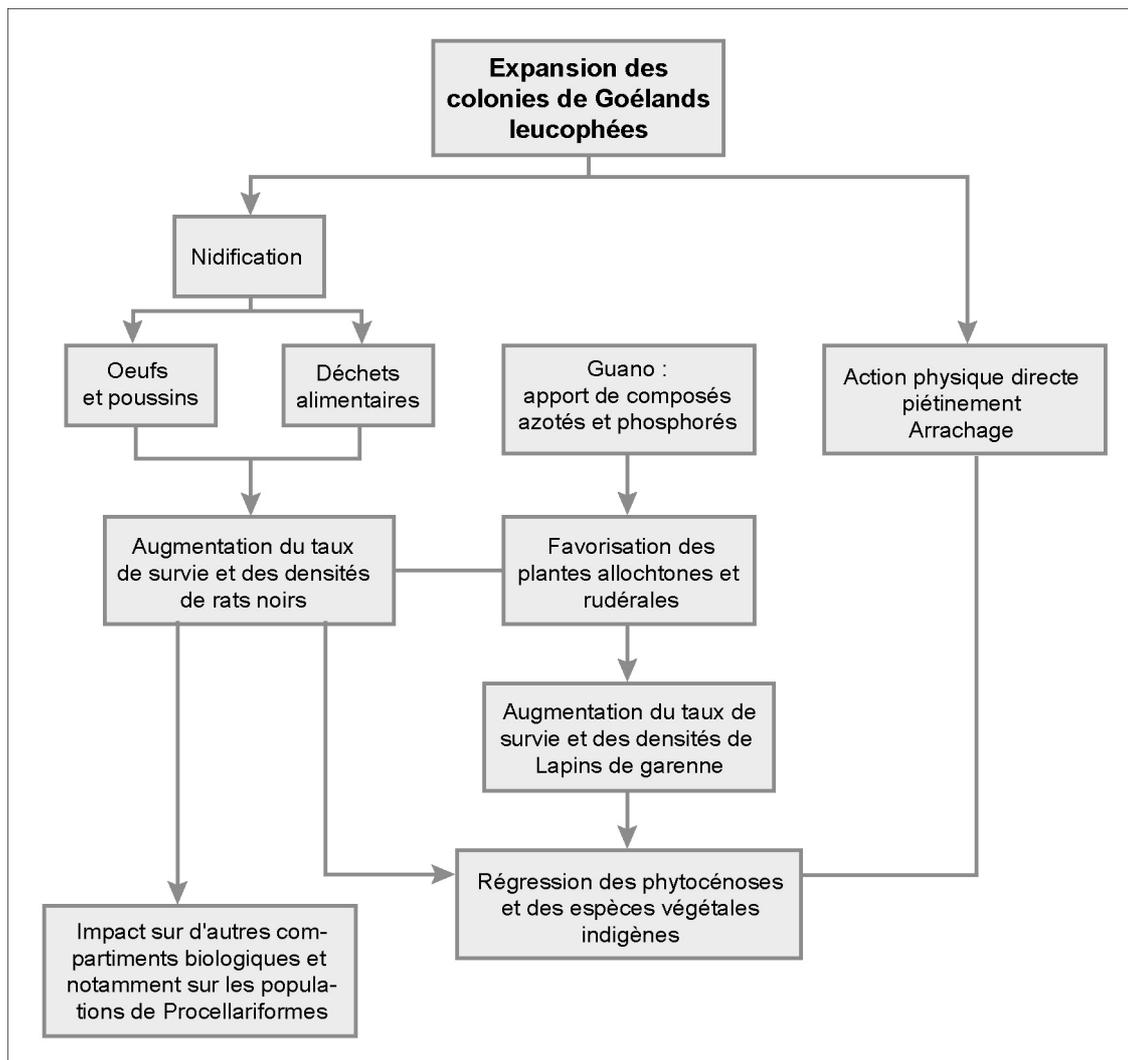


Illustration 77. Schéma des perturbations indirectes, induites par l'expansion démographique des colonies de goélands (d'après Vidal *et al.*, 2002).

Ce type d'approche pourrait s'intégrer aux réflexions actuellement en cours au sein du SIEG (Small Island Ecosystem Group)⁵ mis en place en 1999 à l'initiative des chercheurs et des

⁵ Après un premier workshop qui s'est tenu en 1999, une seconde réunion se tiendra en 2003 pour formaliser un programme de recherche finalisée associant les différents partenaires (<http://www.pwrc.usgs.gov/resshow/howell/sieg/index/>)

gestionnaires du groupe « Ilots Marins » de Réserves Naturelles de France et de leurs homologues américains (USGS). Elles concernent la mise en œuvre d'un projet de recherche finalisé axé sur les protocoles de suivi à long terme des interactions écologiques déterminant le fonctionnement des îlots dans un contexte de gestion adaptée et interactive (Gibbs *et al.*, 1999 ; Holling, 1978).

CONCLUSION GENERALE

Les recherches présentées, menées sur la zone côtière finistérienne depuis une dizaine d'années s'inscrivent dans un projet plus vaste visant à analyser les dynamiques spatiales des systèmes complexes à l'interface entre Nature et Sociétés, et entre Terre et Mer. Le choix de la mer d'Iroise comme site expérimental est justifié non seulement par l'intérêt que lui porte la communauté scientifique depuis plusieurs décennies et son corollaire, l'existence d'archives iconographiques et documentaires, mais aussi par ses spécificités humaines et naturelles impliquant une demande sociale croissante en termes de connaissances et de produits synthétiques d'aide à la gestion. Comme bien des espaces d'interfaces, la zone côtière finistérienne connaît en effet depuis peu la multiplication des enjeux sociaux, qu'ils s'inscrivent dans des contextes de développement socio-économique ou de préservation de la diversité paysagère et naturelle parfois conflictuels, plaçant le débat au cœur d'un dialogue incontournable entre Sciences et Sociétés.

D'un rôle d'observateur des processus et des changements environnementaux, le scientifique est impliqué de manière croissante dans une recherche plus intégrée et plus finalisée dont une des vocations essentielles est de fournir des éléments permettant de corriger voire d'anticiper des dysfonctionnements écosystémiques à l'origine de l'altération des ressources. Ces changements dans la pratique scientifique s'accompagnent nécessairement de la mise en œuvre d'un dispositif adéquat de veille synthétique sur le long terme, impliquant l'élaboration de protocoles de recueil de données, la production d'informations normalisées ainsi que leur mise à disposition dans un contexte partenarial et leur communication à la société civile. Ce contexte opérationnel de la recherche en environnement a été mis en œuvre aux Etats-Unis et en Europe au sein d'observatoires dont la mission principale est de mener un suivi régulier de différents indicateurs, programmé sur le long terme. Plus récemment, les zones-ateliers sont nées à l'initiative du Programme « Environnement, Vie et Sociétés » (PEVS) du CNRS. Elaborées à l'échelle régionale, elles ont pour mission de permettre le suivi et l'analyse des changements à long terme des anthroposystèmes. Ces « laboratoires » peuvent également être des lieux où une gestion durable de l'environnement est recherchée. C'est le cas du réseau des réserves de biosphère, mis en œuvre par le programme Mab de l'UNESCO, où cet objectif s'accompagne d'un suivi scientifique à long terme et d'un partenariat permanent, selon un processus itératif, entre les scientifiques et les équipes opérationnelles.

Concernant l'environnement littoral de la mer d'Iroise, la nécessité de disposer d'un outil fédérateur susceptible de rassembler différentes composantes du système et donc de compétences et de points de vue variés, ainsi que des méthodes d'analyse et de représentation efficaces est apparue voici une dizaine d'années. A cette époque, les méthodes géospatiales de fourniture et de traitement de données telles que les SIG, la télédétection, l'analyse spatiale, la modélisation s'imposaient comme un formidable potentiel pour l'étude des changements par leur capacité à fournir des éléments de réflexion et de synthèse. L'appropriation de cette nouvelle technologie par les géographes s'est fondée sur des bases théoriques rigoureuses, originales et somme toute attractives pour un bon nombre d'acteurs, praticiens ou théoriciens de l'environnement s'intéressant aux problématiques d'une zone côtière exemplaire, de par ses caractéristiques et ses évolutions.

La problématique globale s'est donc nourrie d'approches spécifiques illustrant quelques facettes de la complexité de la zone côtière. La démarche écosystémique qu'elles sous-tendent s'inscrit dans une triple perspective spatiale, temporelle et pluridisciplinaire. Si ces deux

premières composantes relèvent sans aucun doute de la pratique traditionnelle en Sciences Humaines, la connotation pluridisciplinaire des recherches menées est plus actuelle. De fait, l'évolution de la pratique scientifique combinée à l'étude d'un espace complexe d'interfaces géographiques implique nécessairement de positionner la réflexion aux marges de différentes disciplines qui deviennent alors complémentaires. On atteint ainsi une conception transversale de la recherche, aux limites des champs académiques traditionnels, où les Sciences de l'Homme et de la Société peuvent occuper une place à part entière aux côtés des Sciences de la Vie, des Sciences de l'Univers et des Sciences de l'Information et de la Communication.

Du point de vue conceptuel, ces recherches ont pour objectif d'améliorer les connaissances relatives au fonctionnement des systèmes complexes sous l'effet des interactions entre les systèmes sociaux, naturels et techniques afin de fournir aux acteurs opérationnels de l'environnement (gestionnaires, planificateurs...) des méthodes et des synthèses permettant d'améliorer leur prise de décision.

Du point de vue méthodologique, elles s'appuient sur la mise en œuvre de méthodes géomatiques qui permettent de disposer de plates-formes d'informations normalisées et s'orientent vers la modélisation, envisagée comme un outil efficace de simulation des dynamiques et comme un trait d'union formel entre différentes approches et disciplines.

Du point de vue finalisé, les analyses présentées sont des exemples choisis parmi de nombreuses recherches actuellement menées sur le thème des dynamiques fonctionnelles de la zone côtière. Les résultats acquis, s'ils sont intéressants ne représentent qu'une étape descriptive de divers processus. Néanmoins, ils apportent d'ores et déjà des éléments de compréhension utiles non seulement à l'analyse scientifique mais aussi à la société civile.

Les perspectives proposées s'orientent désormais vers une étape plus intégrée, nécessaire à ce stade des connaissances. Cette notion d'« intégration » est multiple. Elle concerne non seulement la prise en compte de savoirs et de compétences complémentaires, mais aussi l'utilisation de méthodes d'analyse différentes ainsi qu'un dialogue constant avec les équipes de terrain chargées de la gestion opérationnelle. Cette orientation de recherche s'inscrit directement dans les principes énoncés en biologie de la conservation et milite en faveur d'une place active de la géographie dans cette discipline fédératrice en plein essor.

Les recherches présentées et leurs perspectives tant méthodologiques que thématiques s'inscrivent également dans le contexte actuel de la recherche en environnement.

Au niveau régional. Elles contribuent au projet scientifique de l'UMR LETG 6554 CNRS (1999-2007) et plus particulièrement aux trois axes thématiques consacrés à (1) l'analyse des processus dynamiques à l'interface Nature/Société et de leurs interactions sur le fonctionnement des systèmes complexes, (2) l'étude des littoraux et des dynamiques territoriales de la mer côtière et de l'océan, et (3) l'analyse des conditions de la gestion intégrée des territoires et d'un développement compatible avec la construction et la préservation du patrimoine naturel et culturel. Elles s'intégreront également à l'Observatoire du Domaine Côtier de l'IUEM par l'alimentation d'une base d'information standardisée consacrée à la mer d'Iroise, gérée par le SIEC, et devraient en retour bénéficier d'une structure favorable à la mise en commun de données pluridisciplinaires et donc à l'émergence de pistes de recherche novatrices.

Au niveau national. Les recherches engagées sur la zone côtière finistérienne s'inscrivent dans une problématique générale que l'on peut résumer à « la promotion de recherches pluridisciplinaires, plus ou moins finalisées, sur des problématiques concernant les anthroposystèmes ». Elles sont donc menées dans l'esprit des programmes scientifiques du

Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable en partenariat avec des organismes de recherche tels que l'Ifremer (LITEAU) ou avec l'Institut Français de la Biodiversité.

Au niveau international. Le contexte actuel des recherches en environnement, couplé à un intérêt croissant pour la zone côtière, semble favorable aux problématiques abordées dans ces recherches. Les résultats acquis, par exemple par les programmes internationaux LUCC (Land Use and Land Cover Change) et LOICZ (Land Ocean Interaction in the Coastal Zone) de l'IGBP/IHDP (Géosphère-Biosphère/Dimension Humaine du Changement Global), relayés par les PCRDT européens (programmes cadre de recherche et de développement technologique) démontrent tout l'intérêt de poursuivre les recherches en cours, tant sur les relations entre Milieu et Sociétés que sur les processus fonctionnels de la zone côtière⁶.

Ce projet et ses perspectives, nourris par de fructueuses collaborations tissées au fil des années entre des individus, des équipes scientifiques et des métiers s'inscrivent dans une recherche collective tournée vers l'action et la confrontation avec la réalité de terrain, et favorisée par un dialogue constructif entre Sciences et Sociétés. Ils n'excluent pas, au contraire, la transposition des méthodes à d'autres littoraux, notamment représentatifs de biomes différents. Les études comparatives, favorisées par la mise en place de réseaux dans des contextes biogéographiques variés tels que ceux mis en place dans les zones-ateliers du PEVS ou dans les réserves de biosphère du programme Mab de l'UNESCO permettraient en effet d'étoffer la réflexion quant aux changements globaux et aux conditions écologiques du développement durable.

⁶ La problématique Milieu/Sociétés a été affichée comme un axe de recherche essentiel pour les dix prochaines années lors de la conférence internationale qui s'est tenue aux Pays Bas en 2001 sur le thème *Global Change Open Science*.

BIBLIOGRAPHIE

- Allain S., Guillaumont B., Le Visage C., Loubersac L., Populus J., 2000. Données géographiques de référence en domaine littoral. Rapport du groupe de travail SHOM-IFREMER.
- Allain S., Guillaumont B., Le Visage, C., Loubersac, L., Populus, J., 2000. Données géographiques de référence en domaine littoral. *In* Populus & Loubersac : *Coastgis'99 Geomatics and coastal environment*, Ifremer/SHOM : 67-79.
- Arnaud M. & Emery X., 2000. *Estimation et interpolation spatiale, méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*. Hermès Sciences.
- Aronoff S., 1989. *Geographic information systems : a management perspective*. WDL Publications.
- Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., Pontanier R., 1993. Restoration and rehabilitation of degraded ecosystems in arid and semiarid regions. A view from the south. *Restoration Ecology*, 1 : 8-17.
- Arzel P., 1998. *Les laminaires sur les côtes bretonnes, évolution de l'exploitation et de la flotille de pêche, état actuel et perspectives*. Ed. Ifremer.
- Aspinall R.J., 1995. GIS : their use for environmental management and nature conservation. *Parks*, 5(1) : 20-31.
- Aspinall R. & Matthews K., 1994. Climate change impact on distribution and abundance of wildlife species : an analytical approach using GIS. *Environmental Pollution*, 86 : 217-223.
- Asté J.P., Dumolard P., Leone F., Jin S. 1993. SIG et risques naturels : le glissement de terrain de Séchilienne (Isère). *Mappemonde*, 4/93 : 24-25.
- Bakker J.P., 1989. *Nature management by cutting and grazing*. Kluwer Academic Publishers.
- Barbault R., 2000. Recherche fondamentale et pratiques de conservation : un dialogue indispensable. *Revue d'Ecologie (Terre Vie)*, 7 : 11-17.
- Bartlett D., 1999. Working on the frontiers of science : applying GIS to the coastal zone. *In* Whright & Bartlett : *Marine and coastal Geographical Information System*, Taylor & Francis : 11-24.
- Barkhadle A.M.I., Ongaro L., Pignatti S., 1994. Pastoralism and plant cover in the lower Shabelle region, Southern Somalia. *Landscape Ecology*, 9(2) : 79-88.
- Barrette J., August P., Golet, F., 2000. Accuracy assessment of wetland boundary delineation using aerial photography and digital orthophotography. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(4) : 409-416.
- Batisse M., 1986. Biosphere reserves : developping and focusing the concept. *Nature and Resources* 22(3) : 2-11.
- Batisse M., 1990. Development and implementation of the biosphere reserve concept and its applicability to coastal regions. *Environmental Management*, 17(2) : 111-116.
- Baudry J., 1991. Ecological consequences of grazing extensification and land abandonment : Role of interactions between environment, society and techniques. *Options Méditerranéennes*, 15 : 13-19.
- Baugmartner M.F., 1997. The distribution of Risso's dolphin (*Grampus griseus*) with respect to the physiography of the northern gulf of Mexico. *Marine Mammal Science*, 13(4) : 614-638.
- Bécet J.M., 1987. *L'aménagement du littoral*. PUF.
- Bédard Y., 1987. Sur les différents types de système d'information à référence spatiale. *In* actes du congrès conjoint de Carto-Québec et de l'Association canadienne de cartographie, Québec (Canada) : 73-87.

- Belloncle J.L., Cluzeau D., Huber-Moy L., Cotonnec A., Richard L. 1997. La pollution agricole en Bretagne : sites à risque. *Mappemonde*, 1/97 : 1-5.
- Bergeron M., 1993. *Vocabulaire de la géomatique. Cahiers de l'Office de la langue française*. Les Publications du Québec.
- Bian, L. & West, E., 1997. GIS modeling of elk calving habitat in a prairie environment with statistics. *Photogrammetric Engineering & Remote sensing*, 63/2 : 161-167.
- Bioret F., 1989. Contribution à l'étude de la flore et de la végétation de quelques îles et Archipels ouest et sud armoricains. Doctorat de Biologie végétale, Université de Nantes.
- Bioret F., 2002. La bioévaluation, outil d'aide à l'aménagement. Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Bretagne Occidentale.
- Bioret F., 2002. Îlots marins, enjeux de la conservation du patrimoine naturel. *Penn ar Bed*, 184-185 : 70-79.
- Bioret F. & Fichaut B., 1990. Synthèse et cartographie écologiques intégrées de la partie terrestre de la réserve MAB d'Iroise (Molène et îlots environnants). Rapport Conservatoire Botanique National de Brest/SEPNEB/Conseil général du Finistère.
- Bioret F. & Géhu J.M., 1996. Banalisation floristique et phytocœnotique d'un îlot marin soumis à la surfréquentation par les oiseaux marins nicheurs : l'île des landes (Ille-et-Vilaine). *Colloques Phytosociologiques* : 89-109.
- Bioret F. & Gourmelon F., 1997. Suivi de la dynamique de la végétation terrestre des îlots marins en réserve naturelle. Rapport RNF/CNRS/Ministère de l'Environnement.
- Bioret F. & Gourmelon F., 2003. Cartographie dynamique de la végétation terrestre des îlots marins en réserve naturelle, *Braun Blanquetia*, à paraître.
- Bioret F., Bouzillé J.B., Godeau M., 1988. Exemples de gradients de transformation de la végétation de quelques îlots de deux archipels armoricains. Influence de zoopopulations. *Colloques Phytosociologiques*, 15 : 509-531.
- Bioret F., Bouzillé J.B., Godeau M., 1990. Quelques problèmes posés par l'étude phyto-écologique de deux îles du Ponant (Ouessant et Groix, France) : réflexions méthodologiques. In rapport de l'atelier Mab UNESCO : *approches comparatives de méthodologies d'étude et expression des résultats de recherche relatifs aux systèmes micro-insulaires en Méditerranée et en Europe du Nord* : 17-23.
- Bioret F., Cibien C., Génot J.C., Lecomte J., 1998. Méthode d'élaboration de guides d'aide à la gestion pour les réserves de biosphère françaises. Dossier Mab 19, UNESCO.
- Bioret F., Fichaut B., Gourmelon F., 1995. Cartographie de la végétation de la partie terrestre de l'archipel de Molène (Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise). *Colloques Phytosociologiques*, 24 : 169-187.
- Bioret F., Gourmelon F., Le Berre I., 1994. Analyse spatiale du processus d'enrichissement sur l'île d'Ouessant. *Norois*, 41(164) : 547-558.
- Bolstad P.V., Swank W., Vose J., 1998. Predicting Southern Appalachian overstory vegetation with digital terrain data, *Landscape Ecology*, 13 : 271-283.
- Bonnefoy J.L., Bousquet F., Attonaty J.M., 2001. Modélisation d'une interaction individus, espace, société par les systèmes multi-agents : pâture en forêt virtuelle. *L'Espace géographique*, 1-2001 : 13-25.
- Bossema I., 1979. Jays and oaks : an eco-ethological of a symbiosis. *Behavior*, 70 : 1-117.
- Bourrelrier P.H., 1997. Les Plans de Prévention des Risques Naturels. La Documentation française.
- Bousquet F., Bakam I., Proton H., Le Page C., 1998. Cormas : common-pool resources and multi-agent Systems. *Computer System*, 1416 : 826-838.

- Bousquet F., Le Page C., Bakam I., Takforyan A., 2001. A spatially explicit individual-based model of blue duikers population dynamics : multi-agent simulation of bushmeat hunting in an eastern cameroonian village. *Ecological Modelling*, 138 (1-3) : 331-346.
- Bridgewater P.B., 1993. Landscape ecology, geographic information systems and natureConservation. In Haines-Young *et al.* : *Landscape Ecology and GIS*, Taylor & Francis : 23-36.
- Brigand, 1986. Les changements écologiques, économiques et sociologiques dans les îles du Ponant : le cas de Batz, Ouessant et Groix. Institut de Géoarchitecture (UBO).
- Brigand L., 2000. Iles, îlots et archipels du Ponant, de l'abandon à la surfréquentation ? Essai sur la question des usages, de la gestion et de la conservation depuis 1950. Doctorat d'Etat de Géographie, Université de Paris I Sorbonne.
- Brigand L., 2002. *Les îles du Ponant : histoire et géographie des îles et archipels de la Manche et de l'Atlantique*. Editions Palantines.
- Brigand L. & Bioret F., 1994. Réflexions sur l'influence du mouton dans les modes de gestion des milieux insulaires : Ouessant (France) et Clare Island (Irlande). *Norois*, 164 : 559-564.
- Brigand L., Bioret F., Le Démézet M., 1992. Landscapes and environments on the island of Ouessant (Brittany, France) : from the traditional maintenance to the management of abandoned areas. *Environmental Management*, 16(5) : 613-618.
- Brigand L., Fichaut B., Le Démézet M. 1990. The changes that have affected the breton Islands (Brittany - France). A study based on three examples : Batz, Ouessant, Groix. In : *Sustainable development and environmental management of small islands*, Man and Biosphere series, Parthenon Publishing : 197-213.
- Briggs D.J. & Tantram D.A.S., 1997. Using GIS for countryside management: the experience of the National Parks. Report of Nene Centre for Research (Northampton).
- Brossard T., Desservy G., Joly D., 1998. Le GPS comme source de données géographiques à grande échelle. *L'Espace géographique*, 1-1998 : 23-30.
- Brossard T., Joly D., Pierret P., 1993. Déprise agricole et fermeture des paysages. *Mappemonde*, 3(93) : 17-21.
- Burbridge P. & Humphrey S., 1999. On the integration of science and management in coastal management research. *Journal of Coastal Conservation*, 5 : 103-104.
- Burel F. & Baudry J., 1999. *Ecologie du paysage : concepts, méthodes et applications*. Tec & Doc.
- Burrough P.A., 1986. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Oxford University Press.
- Bushing W., 1997. GIS-based Gap analysis of an existing marine reserve network around Catalina Island. *Marine Geodesy*, 20 : 205-234.
- Cameron A.D., Miller D.R., Ramsay F., Nikolaou I., Clarke G.C., 2000. Temporal measurement of the loss of native pinewood in Scotland through the analysis of orthorectified aerial photographs. *Journal of Environmental Management*, 58 : 33-43.
- Canevet, 1993. *Le modèle agricole breton. Histoire et géographie d'une révolution agro-alimentaire*. Presses universitaires de Rennes.
- Capobianco M., 1999. On the integrated modelling of coastal changes. *Journal of Coastal Conservation*, 5 : 113-124.
- Carmel Y. & Kadmon R., 1998. Computerized classification of mediterranean vegetation using panchromatic aerial photographs. *Journal of vegetation Science*, 9 : 445-454.
- Carter R.W.G., 1988. *Coastal environments : an introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastline*. Academic Press.
- Carter J.R., 1989. On defining the geographic information system. In Ripple : *Fundamentals of Geographic Information Systems : a compendium*, ASPRS/ACSM : 3-7.

- Cherrill A. & McClean C., 1995. An investigation of uncertainty in field habitat mapping and the implications for detecting land cover change. *Landscape Ecology*, 10(1) : 5-21.
- Chevallier J.J. & Daudelin D. 1996. La géomatique pour l'aide à la décision en gestion des ressources naturelles : exemple de la protection des paysages forestiers. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(1) : 11-25.
- Cheyilan J.P., Miellat P., Waniez P., 1993. Les systèmes d'information géographique : un état de l'art. *Mappemonde*, 4/1993 : 2.
- Cheyilan J.P., Lardon S., Mathian H., Sanders L., 1994. Les problématiques liées au temps dans les SIG. *Revue Internationale de de Géomatique*, 3-4/1994 : 287-305.
- Cicin-Sain B. & Knecht R., 1998. *Integrated coastal and ocean management*. Island Press.
- Claramunt C & Thiéroult M., 1999. Managing time in GIS : an event-oriented approach. In Clifford & Tuzhilin : *Recent advances in temporal databases*, Springer Verlag : 23-42.
- Clarke A.L., 1991. GIS specification, evaluation and implementation. In Maguire *et al.* : *Geographical Information Systems*, Longman Scientific & Technical : 477-488.
- Clark J.R., 1995. *Coastal zone management Handbook*. Lewis publishers.
- Clark F. S. & Slusher R.B., 2000. Using spatial analysis to drive reserve design : a case study of a national wildlife refuge in Indiana and Illinois (USA). *Landscape Ecology*, 15 : 75-84.
- Claudin J. & Rameau J.C., 1999. L'expérience de cartographie des habitats forestiers du Parc National du Mercantour. Son intérêt méthodologique pour une démarche de cartographie à l'échelle régionale. In actes du séminaire de cartographie des habitats, ATEN.
- Collectif, 1998. *Géographie humaine des littoraux maritimes*. Cned-Sedes.
- Collectif, 2001-2002. Spot 5 : vers de nouvelles applications. *Bulletin de la Société Française de Photogrammétrie et télédétection*, 164-165 : 1-200.
- CNIG, 1998. L'information géographique française dans la société de l'information. Etat des lieux et propositions d'action. Rapport du CNIG.
- Commission européenne, 1999. Vers une stratégie européenne d'aménagement intégré des zones côtières : principes généraux et options politiques. Le programme de démonstration de l'UE pour l'aménagement intégré des zones côtières 1997-1999. Office des publications officielles des communautés européennes.
- Cohen M., Alexandre F., Mathieu N., 1998. Modelling interactions between biophysical and social systems : the example of dynamics of vegetation in Causse Mejan (France). *Cybergeo*, 39(29/01/98), 5 p.
- Congalton R.G., 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37 : 35-46.
- Coppock J.T. & Rhind D.W., 1991. The history of GIS. In Maguire *et al.* : *Geographical Information Systems*, Longman Scientific & Technical : 21-43.
- Cornaert M.H. & Maes J. 1992. Land cover, an essential component of the CORINE information system on the environment. GIS implications. In proceedings of central symposium of the « international Space Year » Conference, Munich, : 473-481.
- Coux G. & Le Berre I., 1996. L'espace agricole à Ouessant du milieu du XIXème siècle à nos jours : organisation et évolution. *Mappemonde*, 4 : 27-30.
- Crain I.K. & Mc Donald C.L., 1984. From land inventory to land management. *Cartographica*, 21 : 40-46.
- Cuq F., 2000. Systèmes d'information géographique et gestion intégrée des zones côtières. In Populus & Loubersac : *Coastgis'99 : Geomatics and coastal environment*, Ifremer/SHOM : 18-29.

- Cuq F. & Gourmelon F., 1996. Conditions d'intégration des données satellitaires au sein de bases d'information géographique. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(4) : 349-363.
- Cuq F., Gourmelon F., Madec V., 1993. Planification côtière de Guinée-Bissau. Cartes : Occupation du sol de Guinée-Bissau à 1 : 200 000, 4 feuilles A1 ; Carte des unités physiographiques à 1 : 500 000, 1 feuille A0 ; Carte de l'environnement socio-économique à 1 : 500 000, 1 feuille A0. UICN/DGFC-MDRA.
- Cuq F., Madec V., Gourmelon F., 1996. Mise à jour de la carte d'occupation des sols des provinces côtières de Guinée-Bissau. *Mappemonde*, 4 : 21-26.
- Cuq F., Campredon P., Giraudet J. & E., Gourmelon F., Pennober G., da Silva A., 2001. Un Système d'Information Géographique pour l'aide à la gestion intégrée de l'archipel des Bijagos (Guinée-Bissau). Carte (10 feuilles à 1 : 50 000) et notice 88 p.
- D'Aquino P., Barreteau O., Etienne M., Boissau S., Aubert S., Bousquet F., Le Page C., Darré W., 2002. The role playing games in an ABM participatory modelling process: outcomes from five experiments. *In proceedings of international Environmental Modelling and Software Society Conference*, Lugano (Suisse) : 275-280.
- D'Aquino P., Etienne M., Barreteau O., Le Page C., Bousquet F., 2001. Jeux de rôles et simulations multi-agents : un usage combiné pour une modélisation d'accompagnement des processus de décision sur la gestion des ressources naturelles. *In Trebul : Le pilotage des agro-écosystèmes : complémentarités terrain-modélisation et aide à la décision*, CIRAD.
- Daratech, 2001. Geographic Information Systems markets and opportunities 2001. Rapport de la société Daratech Inc USA.
- Davis F.W. & Goetz F., 1990. Modeling vegetation pattern using digital terrain data. *Landscape Ecology*, 4(1) : 69-80.
- Davis F.W., Stoms D.M., Estes J.E., Scepan J., Scott J.M., 1990. An information systems approach to the preservation of biological diversity. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1 : 55-78.
- Del Barrio G., Alvera B., Puigdefabregas J. & Diez C., 1997. Response of high mountain landscape to topographic variables : central Pyrénées. *Landscape Ecology*, 12(2) : 95-115.
- Denègre J., 1992. Nouvelles technologies au service de l'investigation géographique : le rôle de la télédétection spatiale et des systèmes d'information géographique. *Revue SIGAS*, 2(2) : 139-149.
- Denègre J. & Salgé J.F. 1996. *Les systèmes d'information géographique*. PUF.
- De Sède M.H. & Thiéroul M., 1996. La représentation systémique du territoire : un concept structurant pour les SIRS institutionnels. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(1/1996) : 27-50.
- D'Oleire-Oltmanns W. 1997. A GIS designed for multiple use in the Berchtesgaden National Park, Germany. *In actes des rencontres internationales : La cartographie pour la gestion des espaces naturels*, St Etienne : 289-290.
- Donoghue D.N.M. 1994. Mapping and monitoring the intertidal zone of the East coast of England using remote sensing techniques and a coastal monitoring GIS. *Marine Technology Society*, 28(2) : 19-29.
- Donoghue D.N.M. & Mironnet N., 2002. Development of an integrated geographical information system prototype for coastal habitat monitoring. *Computers and Geosciences*, 28(1) : 129-141.
- Doussat B. & Gourmelon F., 2003. Multi-sensors analysis of urban surface temperatures and land cover. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, à paraître.

- Dronkers J. & De Vries I., 1999. Integrated coastal management : the challenge of transdisciplinarity. *Journal of Coastal Conservation*, 5 : 97-102.
- Duhaime R.J., August P.V., Wright W.R., 1997. Automated vegetation mapping using digital orthophotography. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(11) : 1295-1302.
- Dunn C.P., Sharpe D.M., Guntenspergen G.R., Stearns F., Zhao Yang, 1991. Methods for analysing temporal changes in landscape pattern. In Turner : *Quantitative methods in landscape ecology*, Springer-Verlag, Ecological Studies, 82 : 173-198.
- Duvernoy I., 1999. Des photographies aériennes numérisées pour estimer la progression de l'embroussaillage par le buis sur le Causse-Méjan . *Bulletin SFPT*, 156 : 12-19.
- Dyer M.I. & Vinogradov B.V., 1990. Le rôle des réserves de biosphère dans l'étude des paysages et des écosystèmes. *Nature & Ressources*, 26(1) : 19-27.
- Eberhart R.C. & Dolan T.J., 1980. Chesapeake Bay Development Pressures : RAMS database analysis. In proceedings of Coastal Zone'80.
- Ekstrand S., 1994. Use of CASI for forest damage monitoring. In proceedings of the first International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasbourg (France), III : 205-213.
- ESRI, 1990. *Understanding GIS, the Arc Info method*. Environmental System Research Institute Incorporation.
- Etienne M. & Le Page C., 2002. Modelling contrasted management behaviours of stakeholders facing a pine encroachment process : an agent-based simulation approach. In proceedings of the International Environmental modelling and Software Society Conference, Lugano (Suisse) : 208-213.
- Fabbri K.P., 1998. A methodology for supporting decision making in integrated coastal zone management. *Ocean & Coastal Management*, 39 : 51-62.
- Falinski J.B., 1998. Dioecious woody pioneer species (*Juniperus communis*, *Populus tremula* *Salix* sp.div.) in the secondary succession and regeneration. *Phytocoenosis*, 10 : 1-151.
- Foster D.R., 1992. Land-use history (1730-1990) and vegetation dynamics in central New England, USA. *Journal of Ecology*, 80 : 753-772.
- Fitzgerald R.W. & Lees B.J., 1994. Assessing the classification accuracy of multisource remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 47 : 362-368.
- Forman R.T.T., 1995. *Land mosaic. The ecology of landscapes and regions*. Cambridge University Press.
- Forman R.T.T. & Godron M., 1986. *Landscape Ecology*. John Wiley and Sons.
- Fricker A. & Forbes D.L., 1988. A system for coastal description and classification. *Coastal Management*, 16 : 111-137.
- Gayte O., Libourel T., Cheylan J.P., Lardon S., 1997. *Conception des systèmes d'information sur l'environnement*. Hermès.
- Gestin F., Quéré A., Simon J.P., Touzeau P., 1982. Ouessant : structure du parcellaire et évolution de la société insulaire. Rapport de la mission du patrimoine ethnologique du Ministère de la culture.
- Gibbs J.P., Snell H.L., Causton C.E., 1999. Effective monitoring for adaptive wildlife management: lessons from the Galapagos Islands. *Journal of Wildlife Management*, 63(4) : 1055-1065.
- Gillham M.E., 1961. Alteration of the breeding habitat by sea-birds and seals in Western Australia. *Journal of Ecology*, 49 : 289-300.
- Gillham M.E., 1962. Some interactions of plants, rabbits and sea-birds on South African islands. *Journal of Ecology*, 51 : 275-294.
- Giraudet J. & Gourmelon F., 1997. Où voir les oiseaux à Ouessant ? Carte couleur 1 : 25 000, Centre d'Etude du Milieu d'Ouessant/CNRS.

- Gonzales-Rebeles C., Burke V.J., Jennings M.D., Ceballos G., Parker N.C., 1998. Transnational Gap analysis of the Rio Bravo/Rio Grande region. *Photogrammetric Engineering & Remote sensing*, 64/11 : 1115-1118.
- Goodchild M., 1992. Geographical information science. *International Journal of Information Systems*, 6(1) : 31-45.
- Goodman G.T. & Gillham M.E., 1954. Ecology of the Pembroke Islands II, Stockholm, the environment and vegetation, *Journal of Ecology*, 42 : 296-327.
- Gourmelon F., 2002. Classification automatique d'ortho-photographies numérisées pour une cartographie à grande échelle de la végétation terrestre. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28/2 : 168-174.
- Gourmelon F., 2002. Les outils géomatiques. *Penn Ar Bed*, 184-185 : 94-101.
- Gourmelon F. & Le Berre I., 2001. De l'application scientifique au SIG institutionnel : le cas du SIG Iroise. In actes du symposium international Coastgis'01 (Halifax, 2001).
- Gourmelon F. & Le Berre I., 2003. Towards an institutional GIS for Iroise Sea (France). In Bartlett : *GIS for Coastal Zone Management*, Taylor & Francis, à paraître.
- Gourmelon F., Bioret F., Brigand L., 1995. SIG et usage des sols : l'île d'Ouessant de 1952 à 1992. *Mappemonde*, 4 : 6-15.
- Gourmelon F., Bioret F., Le Berre I., 2001. Historic land-use changes and implications for management of a small protected island. *Journal of Coastal Conservation*, 7 : 41-48.
- Gourmelon F., Bioret F., Rebout C., Yésou P., 2003. Les dynamiques de la végétation d'un îlot marin protégé. *Photo-interprétation*, à paraître.
- Gourmelon F., Liret C., Bonnet M., 2000. Approche géomatique de l'habitat grand dauphin en mer d'Iroise. In Populus & Loubersac : *Coastgis'99 Geomatics and coastal environment*, Ifremer/SHOM : 186-197.
- Gourmelon F., Liret C., Le Berre I., 2002. Approche dynamique de la répartition spatio-temporelle du grand dauphin. In actes des Journées Cassini 2002, Lanvéoc : 389-394.
- Gourmelon F., Bioret F., Brigand L., Cuq F., Hily C., Jean F., Le Berre I., Le Démézet M., 1995. Atlas de la Réserve de Biosphère de la Mer d'Iroise : exploitation cartographique de la base d'information géographique Sigouessant. Cahiers Scientifiques du Parc Naturel Régional d'Armorique.
- Guarnieri F. 1994. Aide à la décision à référence spatiale dans le domaine de la prévention des incendies de forêts : le système Wilfried. *Revue Internationale de Géomatique*, 4(3-4/1994) : 257-269.
- Guillaumont B. & Durand C., 2000. The integration and management of regulatory data in a GIS : an applied analysis of the french coasts. In Populus & Loubersac : *Coastgis'99 Geomatics and coastal environment*, Ifremer/SHOM : 269-283.
- Haines-Young R., Green D.R., Cousins S.H., 1993. *Landscape ecology and Geographic Information Systems*. Taylor & Francis.
- Hansen M. 1996. Classification trees : an alternative to traditional land cover classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 17(5) : 1075-1081.
- Herr A.M. & Queen L.P., 1993. Crane habitat evaluation using GIS and remote sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59(10) : 1531-1538.
- Hester A.J. & Baillie G.J., 1998. Spatial and temporal patterns of heather use by sheep and red deer within natural heather grass mosaics. *Journal of Applied Ecology*, 35 : 772-784.
- Hester A.J., Miller D.R., Towers W., 1996. Landscape-scale vegetation change in the Cairngorms, Scotland, 1946-1988 : implications for land management. *Biological Conservation*, 77 : 41-51.
- Hily C. & Cuillandre J.P., 1991. Réserve de biosphère de la mer d'Iroise : activités humaines en milieu marin. Rapport Mab UNESCO/Conseil Général du Finistère/UBO.

- Hinton J.C., 1996. GIS and remote sensing integration for environmental application. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10(7) : 877-890.
- Hogg E.H. & Morton J.K., 1983. The effects of nesting gulls on the vegetation and soil of islands in the Great Lakes, The National Research Council of Canada. *Canadian Journal of Botany*, 6/12 : 3240-3254.
- Hogg E.H., Morton J.K., Venn J.M., 1989. Biogeography of island floras in the Great Lakes. I. Species richness and composition in relation to gull nesting activities, The National Research Council of Canada. *Canadian Journal of Botany*, 67/4 : 961-969.
- Holligan P.M., 1994. *Land Ocean Interaction In the Coastal Zone (LOICZ): Implementation Plan*. IGBP.
- Holligan P.M. & De Boois H., 1993. Land-Ocean interactions in the coastal zone : science plan. Report 25 IGBP.
- Holling C.S., 1978. *Adaptive environmental assessment and management*. Willey & Sons.
- Hunter E.L. & Power C.H., 2002. An assessment of two classification methods for mapping Thames estuary intertidal habitats using CASI data. *International Journal of Remote Sensing*, 23 (15) : 2989-3008.
- Irvine A. B., Scott M. D., Wells R. S., Kaufmann J. H., 1981. Movements and activities of the Atlantic bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*, near Sarasota, Florida. *Fishery Bulletin*, 79 : 671-688.
- Janodet E. & Blasco F., 1993. Cartes écologiques de la végétation et télédétection satellitaire. In Dubois et al. : *Télédétection appliquée à la cartographie thématique et topographique*, Presses de l'Université du Québec/AUPELF : 247-261.
- Jean F., Guinet C., Hily C., 1993. Réserve de la Biosphère d'Iroise : inventaire quantitatif de la macrofaune intertidale. Rapport MAB UNESCO / Conseil Général du Finistère / UBO.
- Jennings M.D., 2000. Gap analysis : concepts, methods and recent results. *Landscape Ecology*, 15 : 5-20.
- Joerin F., 1995. Méthodes multicritères d'aide à la décision et SIG pour la recherche d'un site. *Revue Internationale de Géomatique*, 5(1/1995) : 37-51.
- Johnston C.A., Pastor J., Naiman R.J. 1993. Effects of beaver and moose on boreal forest landscapes. In Haines-Young et al. : *Landscape Ecology and GIS*, Taylor & Francis : 237-254.
- Journaux A., 1985. *Cartographie intégrée de l'environnement un outil pour la recherche et pour l'aménagement*. Mab UNESCO/UGI.
- Kadmon R. & Harari-Kremer R., 1999. Landscape-scale regeneration dynamics of disturbed Mediterranean maquis. *Journal of Vegetation Science*, 10 : 393-402.
- Keith C., Bradley P., Michael C., 2000. A Perspective on GIS-environmental model integration (GIS/EM). *Journal of Environmental Management*, 59(4) : 229 - 233.
- Khaemba W.M. & Stein A., 2000 . Use of GIS for a spatial and temporal analysis of Kenyan wildlife with generalised linear modelling. *International Journal of Geographical Information Science*, 14/8 : 833-853.
- Klinowska M., 1991. *Dolphins, porpoises and whales of the world*. The IUCN Red Data Book. Editions IUCN.
- Lambin E.F., 1997. Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21(3) : 375-393.
- Lambin E., Baulies X., Bockstael N, Fischer G., Krug T., Leemans R., Moran E.F., Rindfuss R.R., Skole D., Turner II B.L. & Vogel C., 1999. Land-Use and Land-Cover change : implementation strategy. IGBP Report n°48/IHDP Report n°10, IGBP.
- Langran G., 1992. *Time in Geographic Systems*. Taylor & Francis.

- Lardon S., Maurel P., Piveteau V., 2001. *Représentations spatiales et développement territorial*. Hermès.
- Lardon S., Baron C., Bommel P., Bousquet F., Le Page C., Lifran R., Monestiez P., Reitz P., 1998. Modéliser les configurations et les stratégies spatiales dans un système multi-agents pour la maîtrise de dynamiques d'embroussaillage. *In actes du colloque SMAGET, Clermont-Ferrand (<http://www.lisc.clermont.cemagref.fr>)*.
- Lathrop R.G. & Bognar J.A., 1998. Applying GIS and landscape ecological principles to evaluate land conservation alternatives. *Landscape and urban planning*, 41(1) : 27-41.
- Le Berre I., 1997. Réserve de biosphère de la Mer d'Iroise : carte de synthèse Conseil Général du Finistère. MabUNESCO.
- Le Berre I., 1999. Mise au point de méthodes d'analyse et de représentation des interactions complexes en milieu littoral. Doctorat de Géographie, Université de Bretagne Occidentale.
- Le Berre I. & Gourmelon F., 2000. Etude de faisabilité d'un système d'information géographique, projet Parc National Marin d'Iroise. *Revue Internationale de Géomatique*, 10 (2/2000) : 257-271.
- Le Berre I., Gourmelon F., Liret C., 2002. Modélisation bathymétrique de la mer d'Iroise, application à l'étude du grand dauphin côtier. *Revue Internationale de Géomatique*, 12(3/2002) : 337-354.
- Le Berre I., Meyrat J., Pastol Y., 2000. Application des données hydrographiques à l'étude synthétique de l'environnement côtier : exemple d'un SIG sur le littoral du Finistère (France). *In Populus & Loubersac : Coastgis'99 Geomatics and coastal environment, Ifremer/SHOM* : 233-244.
- Le Berre I., Albrecht M., Gouriou V., 2003. SIG et lutte antipollution. *In Traité IGAT, à paraître*.
- Le Duff M., 1999. Environnement naturel de l'Iroise, bilan des connaissances et intérêt patrimonial. Rapport DIREN Bretagne/UBO.
- Lefeuve A., 1992. Télédétection et S.I.G. au service de l'environnement et de l'aménagement du territoire dans le cadre de la mise en œuvre du plan de protection des forêts rhénanes (plaine d'Alsace, France). *In actes du 2ème Forum international de l'instrumentation et de l'information géographique, FI3G (Strasbourg)* : 139-151.
- Lefeuve J.C., 1991. Les conflits d'utilisation en zone littorale. *In actes du colloque : le littoral, ses contraintes environnementales et ses conflits d'utilisation, Nantes* : 205-231.
- Le Tixerant M., 2002. Représentation logique et spatiale de la réglementation des activités humaines en zone côtière. *Revue Internationale de Géomatique*, 12(3/2002) : 325-336.
- Le Tixerant M., 2003. Gestion intégrée en zone côtière : représentation logique et spatiale de la réglementation des usages. Doctorat de Géographie, Université de Bretagne Occidentale, à paraître.
- Liret C., 2001. Domaine vital, utilisation de l'espace et des ressources : les grands dauphins, *Tursiops truncatus*, de l'île de Sein. Doctorat d'Océanologie biologique, Université de Bretagne Occidentale.
- Liret C., Gourmelon F., Bonnet M., 2000. Proposition of management criteria from bottlenose dolphin study. *European Research on Cetaceans*, 13 : 119-123.
- Liret C., Baines M.E., Evans P.G.H., Gourmelon F., Hammond P., Le Berre I., Reichelt M., Shepherd B., Stephan E., Wilson B., 2003. *Tursiops*. Rapport du programme européen Interreg II C.
- Long G., 1990. Allocution d'ouverture. *In rapport de l'atelier Mab UNESCO : approches comparatives de méthodologies d'étude et expression des résultats de recherche relatifs aux systèmes micro-insulaires en Méditerranée et en Europe du Nord* : 7-8.

- Loubersac L., Salomon J.C., Breton M., Durand C., Gaudineau C., 2000. Perspectives offertes par la communication entre un modèle hydrodynamique et un SIG pour l'aide au diagnostic environnemental. Caractérisation de la dynamique et de la qualité des masses d'eau côtières. In Populus & Loubersac : *CoastGIS'99 : Geomatics and coastal environment*, Ifremer-SHOM : 173-185.
- Lunetta R.S., Cosentino B.L., Montgomery D.R., Beamer E.M., Bechie T.J., 1997. GIS-based evaluation of salmon habitat in the Pacific Northwest. *Photogrammetric Engineering & Remote sensing*, 63/10 : 1219-1229.
- Mab UNESCO, 1990. *Approches comparatives des méthodes d'étude et d'expression des résultats de recherche relatifs aux systèmes micro-insulaires en Méditerranée et en Europe du Nord*. Rapport final de l'atelier Mab UNESCO.
- Mac Arthur R. H. & Wilson, E. O., 1967. The theory of Island Biogeography. *Monographs in Population Biology*, 1, : 1-203.
- Mac Donald A. & Cain M., 2000. Marine environmental high risk areas (MEHRAs) for the UK. *International Maritime Technology*, 112 (2) : 61-71.
- Mc Cormick C.M., 1999. Mapping exotic vegetation in the Everglades from large-scale aerial photographs. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(2) : 179-184.
- Mc Harg I.L., 1969. *Design with Nature*. The Natural History Press.
- Madec V. & Cuq F., 1990. Un système d'information géographique pour l'analyse du fonctionnement d'un micro-système insulaire : Sigouessant. In rapport de l'atelier Mab UNESCO : *approches comparatives de méthodologies d'étude et d'expression des résultats de recherche relatifs aux systèmes micro-insulaires en Méditerranée et en Europe du Nord* : 59-64.
- Maguire D.J., Goodchild M.F., Rhind D.W., 1991. *Geographical Information Systems*. Longman Scientific & Technical.
- Matheron G., 1970. *La théorie des variables généralisées*. ENSMP.
- Meaden G.J., 1994. The one that go away ? GIS in marine fisheries. *Mapping awareness*, 8(7) : 20-23.
- Meaden G.J., 1999. Application of GIS to fisheries management. In Wright & Bartlett : *Marine and Coastal Geographical Information Systems*, Taylor & Francis : 205-226.
- Médail F. & Vidal E., 1998. Organisation de la richesse spécifique et de la composition floristiques d'îles de la Méditerranée occidentale (sud-est de la France) *Canadian Journal of Botany*, 76 : 321-331.
- Mendonça-Santos M.L. & Claramunt C., 2001. An integrated landscape and local analysis of land cover evolution in an alluvial zone. *Computers, Environnement and Urban Systems*, 25(2001) : 557-577.
- Miossec A., 1998. *Les littoraux, entre nature et aménagement*. Nathan-Sedes.
- Moore D.M., Lees B.G. & Davey S.M., 1991. A new method for predicting vegetation distributions using decision tree analysis in a Geographic Information System. *Environmental management*, 15(1) : 59-71.
- Moses E. & Finn, J.T. 1997. Using geographic information systems to predict North Atlantic right whale (*Eubalaena glacialis*) habitat. *Journal of Northw. Atlantic Fisheries Sciences*, 22 : 37-46.
- Moss M.R., 2000. Interdisciplinarity, landscape ecology and the « transformation of agricultural landscapes ». *Landscape Ecology*, 15 : 303-311.
- Muller F., Donnay J.P., De Cauwer K., Schwind L., 2000. Design of oceanographic database, In Populus & Loubersac : *CoastGIS'99 : Geomatics and coastal environment*, Ifremer/SHOM : 124-133.

- Naveh Z. 1993. Some remarks on recent developments in landscape ecology as a transdisciplinarity ecological and geographical science. *Landscape Ecology*, 5(2) : 65-73.
- Naveh Z. & Lieberman A.S., 1984. *Landscape Ecology : Theory and applications*. Springer-Verlag.
- NCGIA, 1992. A glossary of GIS terminology. Technical report 92-13, NCGIA.
- Norris K.S. & Dohl T. P., 1980. The structure and functions of cetacean schools. In Herman : *Cetacean behavior : mechanisms and functions*, Wiley : 211-261.
- Ostendorf B. & Reynolds J.F., 1998. A model of arctic tundra vegetation derived from topographic gradients. *Landscape Ecology*, 13 : 187-201
- Ozenda P. , 1982. *Les végétaux dans la biosphère*. Doin.
- Ozenda P., 1986. *La cartographie écologique et ses applications*. Masson.
- Pedrotti F., 1997. Les données de la phytosociologie pour la cartographie géobotanique. *Colloques Phytosociologiques*, 27 : 503-541.
- Pennober G., 1999. Analyse spatiale de l'environnement côtier de l'archipel des Bijagos (Guinée-Bissau). Doctorat de Géographie, Université de Bretagne Occidentale.
- Pennober G., 2000. Typologie dynamique de la zone intertidale de l'archipel des Bijagos (Guinée-Bissau). In Populus & Loubersac : *Coastgis'99 Geomatics and coastal environment*, Ifremer/SHOM : 265-266.
- Pereira, J.M.C. & Itami, R.M. 1991. GIS-based habitat modeling using logistic multiple regression : a study of the Mt. Graham red squirrel. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57/11 : 1475-1486.
- Pernetta J.C. & Milliman J.D., 1995. Land-Ocean interactions in the coastal zone (LOICZ) : Implementation Plan. Report 33, IGBP.
- Péron F. 1997. *Ouessant, l'île sentinelle, vie et tradition d'une île bretonne*. Ar Men - Le Chasse-Marée.
- Piégay H. 1993. Impact de la crue de l'Ouvèze du 22 septembre 1992 sur la forêt alluviale. *Mappemonde*, 4/93 : 3.
- Pornon H., 1992. *Systèmes d'information géographique pour petites communes*. STU.
- Pottier P. & Robin M., 1997. L'île d'Yeu, un espace convoité : développement et aménagement. *Mappemonde*, 1(97) : 18-23.
- Prélaz-Droux R., 1995. *Système d'information et gestion du territoire. Approche systémique et procédure de réalisation*. Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Proulx M.J., Bédard Y., Létourneau F., Martel C., 1997. Catalogage des données spatiales sur le World Wide Web : concepts, analyse des sites et présentation du géorépertoire personnalisable GEOREP. *Revue Internationale de Géomatique*, 7(1/1997) : 7-32.
- Raynal L., Dumolard P., d'Aubigny G., Weber C., Rigaux P., Scholl M., Larcena D. 1996. Gérer et générer des données spatiales hiérarchisées. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(4/1996) : 365-382.
- Ricketts P.J. 1992. Current approaches in Geographic Information Systems for coastal management. *Marine Pollution Bulletin*, 25(1-4) : 82-87.
- Rhind D.W., 1987. Recent developments in geographic information systems in the UK. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1(3) : 229-241.
- Ridoux V., Guinet C., Carcaillet P., Creton P., 1994. Réserve de biosphère de l'Iroise : utilisation de l'espace par les mammifères marins et propositions de zonage. Rapport MAB UNESCO / Conseil Général du Finistère / UBO / Océanopolis.
- Ringold P.L., Alegria J., Czaplewski R.L., Mulder B.S., Tolle T., Burnett K., 1996. Adaptive monitoring design for ecosystem management. *Ecological Applications*, 6 : 745-747.
- Robin M., 1995. *La télédétection : des satellites aux systèmes d'information géographique*. Nathan.

- Robin M., 2002. Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. *In : Le littoral, regards, pratiques et savoirs*, Editions ENS : 95-116.
- Robin M., 2003. Etude des risques côtiers sous l'angle de la géomatique. *Annales de Géographie*, 627-628 : 471-502.
- Robin M. & Verger F., 1996. Pendant la protection, l'urbanisation continue. *Les Ateliers du Conservatoire du Littoral*, 13 : 1-12.
- Roche S., 1997. Les SIG : un regard nouveau sur l'espace et sa gestion. Etudes de cas en France et au Québec. *L'Espace Géographique*, 1 : 60-66.
- Roche S. & Bédard Y., 1997. L'appropriation sociale des technologies de l'information géographique. Quelles leçons pour la mise en œuvre des SIG. *Revue Internationale de Géomatique*, 7(3-4) : 297-316.
- Roche S., Caron C., Bédard Y., 1996. Vers une approche plus complète du rôle de la géomatique dans les organisations. *Revue Internationale de Géomatique*, 6(1/1996) : 73-92.
- Rouet P., 1991. *Les données dans les SIG*. Hermès.
- Scott Lee D. & Jie Shan, 2003. Combining Lidar elevation data and IKONOS multispectral imagery for coastal classification mapping. *Marine Geodesy*, 26(1-2) : 117-127.
- Scott J.M., Davis F., Csuti B., Noss R., Butterfield B., Groves C., Anderson H., Caicco S., D'Erchia F., Edwards T.C., Ulliman J., Wright R.G., 1993. Gap analysis : a geographic approach to protection of biological diversity. *Wildlife Monographs* 123.
- Shom, 1977. Carte marine océan atlantique, côte ouest de France : Raz de Sein, n° 5252.
- Shom, 1994. Courants de marée de la côte ouest de Bretagne : de Goulven à Penmarc'h", Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
- Simon L., Tamru B., 1998. Cartographie biogéographique et dynamiques de paysage en montagne de Lure. *Mappemonde*, 49(1998.1) : 26-31.
- Smith K., 1996. *Environmental Hazards. Assessing Risk and Reducing Disaster*. Routledge.
- Spéry L., Libourel T., 1998. Vers une structuration des métadonnées. *Revue Internationale de Géomatique*, 8(1-2) : 59-74.
- Tissot C., 2003. Modélisation spatio-temporelle d'une activité humaine. Doctorat de Géographie, Université de Bretagne Occidentale, à paraître.
- Tissot C., Rouan M., Croisé F., 2001. Modélisation du cycle d'élevage porcin hors-sol. *In actes des journées Cassini 2001 : Géomatique et espace rural* : 177-188.
- Tomlinson R. & Petchenik B.B., 1988. Reflections on the revolution : the transition from analogue to digital representations of space, 1958-1988. *The American cartographer*, 15(3) : 243-334.
- Tucker K., Rushton S.P., Sanderson R.A., Martin E.B., Blaiklock J., 1997. Modelling bird distributions, a combined GIS and bayesian rule-based approach. *Landscape Ecology*, 12/2 : 77-93.
- Turner M.G., 1987. Simulation of landscape changes in Georgia : a comparison of three transition models. *Landscape Ecology*, 1(1) : 29-36.
- UICN, 1996. La Réserve de biosphère de l'Archipel des Bijagos. Document d'information. UICN/INEP/UNESCO.
- UNESCO, 1996. Biosphere reserves : the Sevilla Strategy and the Statutory Framework of the World Network. UNESCO.
- UNESCO, 2000. La solution du puzzle : l'approche écosystémique et les réserves de biosphère. UNESCO.
- Ung A., Ranchin T., Wald L., Weber C., Hirsch J., Perron G., Kleinpeter J., 2000. Cartographie de la pollution de l'air : une nouvelle approche basée sur la télédétection et les bases de données géographiques. Application à la ville de Strasbourg. *Photo-Interprétation*, 38(3-4) : 53-63.

- Van de Kraats E., 2000. Airborne laser scanning : an operational remote sensing technique for digital elevation mapping in coastal areas. *In* Populus & Loubersac : *CoastGIS'99 : Geomatics and coastal environment*, Ifremer/SHOM : 149-158.
- Van de Rijt C.W.C.J., Hazelhoff L., Blom C.W.P.M., 1996. Vegetation zonation in a formertidal area : a vegetation-type reponse model based on DCA and logistic regression using GIS. *Journal of Vegetation Science*, 7 : 505-518.
- Van Horssen P.W., Schot P.P. & Barendregt A., 1999. A GIS-based plant prediction model for wetland ecosystems. *Landscape Ecology*, 14 : 253-265.
- Van Zuidam R.A., Farifteh J., Eleveld M.A., Cheng T., 1998. Developments in remote sensing, dynamic modelling and GIS applications for integrated coastal zone management. *Journal of Coastal Conservation*, 4 : 191-202.
- Vidal E., Médail F., Tatoni T., Bonnet V., Mante A., 2002. Les îles de Marseille ou quand les goélands contrôlent la flore. *Pen ar Bed*, 184-185 : 53-62.
- Wiens, J.A. 1996. Wildlife in patchy environments : metapopulations, mosaics, and management. *In* Mc Cullough : *Metapopulations and Wildlife*, Island Press : 53-84.
- Wilson B., Thompson P.M., Hammond P.S., 1997. Habitat use by bottlenose dolphins: seasonal distribution and stratified movement patterns in the moray firth, Scotland. *Journal of Applied Ecology*, 34 : 1365-1374.
- Wright D. J., Bartlett D.J., 1999. *Marine and coastal Geographical Information System*. Taylor & Francis.
- Yésou P., D'Escricienne L.G., Midoux E., Bernard F., Ferrand Y., 1996. Réserve de Béniguet. ONCFS.
- Yésou P., D'Escricienne L.G., Nisser J., 1993. La réserve de faune de l'île de Béniguet (Finistère). *Bulletin mensuel de l'ONC*, 180 : 28-39.
- Yésou P., Lethuillier C., Leclerc J., Nisser J., 1999. Avifaune nicheuse de l'île de Béniguet. *Bulletin mensuel de l'ONC*, 243 : 20-29.

Table des illustrations

III. 1. Diversité des activités humaines en zone côtière.....	5
III. 2. Quelques lignes de référence (d'après Robin, 2002)	6
III. 3. La zone côtière	6
III. 4. Principaux types de protection et de labels environnementaux s'appliquant aux espaces littoraux sensibles (d'après Bioret, inédit).....	7
III. 5. Relations entre activités humaines en zone côtière méditerranéenne (d'après Cicin-Sain & Knecht, 1998)	8
III. 6. Quelques initiatives de gestion intégrée de la zone côtière aux niveaux européen et mondial. 6a : les sites de démonstration de l'AIZC (d'après Commission européenne, 1999). 6b : les réserves de biosphère côtières.....	11
III. 7. Un modèle de réalité pour la gestion intégrée des zones côtières (d'après Cuq, 2000).....	15
III. 8. Les étapes de mise en œuvre d'un SIG (d'après Cuq <i>et al.</i> , 2001).....	20
III. 9. Système d'Information à Référence Spatiale (d'après Prélaz-Droux, 1995).....	21
III. 10. Système d'Information sur l'Environnement (d'après Gayte <i>et al.</i> , 1997).....	22
III. 11. Les quatre composantes d'un SIG (d'après ESRI, 1990, modifié).....	22
III. 12. Exemple de principe de structuration d'une BIG (d'après Le Berre, 1999, modifié).....	24
III. 13. Les modèles conceptuels de représentation de l'information géographique numérique (d'après Rouet, 1991). 13a : mode matriciel. 13b : mode vectoriel.....	26
III. 14. La topologie (d'après ESRI, 1990, modifié).....	27
III. 15. Les niveaux d'information prévus dans le RGE.....	28
III. 16. Les métadonnées simplifiées utilisées dans le programme européen d'étude des grands dauphins côtiers (d'après Liret <i>et al.</i> , 2003)	31
III. 17. Les principes de la Représentation Systémique du Territoire (d'après De Sède & Thiéroult, 1996) .	40
III. 18. Les principales étapes de la mise en œuvre d'un SIG (d'après Crain & Mc Donald, 1984)	41
III. 19. Vers un outil intégré, adapté au suivi, à l'analyse et à la gestion du littoral (d'après Gourmelon & Le Berre, 2001).....	43
III. 20. La mer d'Iroise : situation géographique.	45
III. 21. Diversité des paysages et des activités en mer d'Iroise	46
III. 22. Les principaux statuts de protection de la mer d'Iroise	48
III. 23. Les éléments de l'Observatoire du Domaine Côtier de l'IUEM.....	51
III. 24. Les composantes du SIG mis en œuvre sur la mer d'Iroise au laboratoire Géomer.....	53
III. 25. <i>Basiles</i> : l'inventaire des îles et des îlots du littoral de la Manche et de l'Atlantique (d'après Brigand, 2000, modifié).....	55
III. 26. <i>Basilots</i> : une base d'information géographique consacrée au suivi à long terme des îlots marins protégés (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2003, modifié).....	56
III. 27. Le dictionnaire de l'information géographique contenue dans <i>SIGOuessant</i>	57
III. 28. Le dictionnaire de l'information géographique contenue dans <i>Iroise</i> (d'après Le Berre & Gourmelon, 2000).....	58
III. 29. L'organisation de l'information géographique dans le SIG consacré à la mer d'Iroise (d'après Gourmelon & Le Berre, 2001).....	59
III. 30. L'île d'Ouessant (d'après Giraudet & Gourmelon, 1997, modifié).....	62
III. 31. Les principaux types de milieux ouessantins.....	63
III. 32. Données et méthodes de production de couches thématiques sur les thèmes de l'occupation et de l'utilisation des sols de l'île d'Ouessant	64
III. 33. Typologie utilisée pour la description des milieux semi-naturels de l'île d'Ouessant (d'après Bioret <i>et al.</i> , 1994, modifié).....	65
III. 34. Les principales tendances dynamiques de l'utilisation des sols de 1844 à nos jours (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2001).....	67
III. 35. Entre 1952 et 1992 : des changements territoriaux de grande ampleur (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 1995).....	68
III. 36. Les thèmes utilisés pour l'étude du pâturage ovin en 1992-1993 : la végétation, le bâti, les pâtures	70
III. 37. Les scénarios d'évolution des milieux semi-naturels en relation avec le développement hypothétique du cheptel ovin (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2001).....	72
III. 38. Indices synthétiques calculés pour caractériser les changements d'occupation des sols	74
III. 39. Les changements d'occupation des sols de l'île d'Ouessant de 1992 à 2002	75
III. 40. Les résultats statistiques décrivant les changements d'occupation des sols de l'île d'Ouessant de 1992 à 2002	76

III. 41. Les modalités d'embroussaillage des milieux au cours de la dernière décennie	77
III. 42. Un test méthodologique de cartographie automatique à grande échelle de la végétation terrestre (d'après Gourmelon, 2002).....	79
III. 43. Caractéristiques et problématiques de trois îlots étudiés : Banneg, Balaneg et Béniguet en mer d'Iroise (d'après Bioret, 2002)	81
III. 44. Les îlots marins (Manche-Atlantique) concernés par le programme de suivi à long terme de la végétation.....	82
III. 45. Les îlots marins (Méditerranée) concernés par le programme de suivi à long terme de la végétation	83
III. 46. Base d'information géographique et classification phytosociologique.....	84
III. 47. Les données photographiques utilisées dans le cadre du suivi à long terme des îlots marins protégés.....	86
III. 48. Béniguet : les principales formations végétales de 1990 à 2000 (Bioret & Gourmelon, 2003).....	90
III. 49. Les données quantitatives associées aux trois inventaires de la végétation réalisés sur l'îlot de Béniguet (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2003)	91
III. 50. Les stades dynamiques de la végétation de 1990 à 2000 et la synthèse des changements sur l'îlot de Béniguet (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2003)	92
III. 51. Les matrices de transition exprimant les changements intervenus entre 1990-1996 et 1996-2000 sur l'île de Béniguet (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2003)	93
III. 52. La méthode des transects pour l'évaluation des populations de goélands de l'île de Béniguet (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2003)	94
III. 53. Les résultats de l'analyse combinée changements de la végétation <i>versus</i> pression des colonies de goélands (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2003).....	95
III. 54. Relation entre la taille des îlots du réseau et la dégradation de la végétation (Bioret & Gourmelon, 2003)	95
III. 55. Dynamique des milieux sur les îlots de la mer d'Iroise (1990-1996) (d'après Bioret & Gourmelon, 2003 ; Gourmelon <i>et al.</i> , 2003).....	97
III. 56. Dynamique des milieux sur les îlots de l'archipel des Sept-Iles (1995-2002) (d'après Bioret & Gourmelon, 2003).....	98
III. 57. Synthèse des changements constatés lors du suivi de la végétation des îlots marins protégés	99
III. 58. Les sites du réseau européen <i>Tursiops</i> (d'après Liret <i>et al.</i> , 2003).....	101
III. 59. Résultat de l'inventaire de données réalisé dans le cadre du réseau <i>Tursiops</i> (d'après Liret <i>et al.</i> , 2003)	102
III. 60. La localisation des deux groupes de grands dauphins résidant en mer d'Iroise (d'après Liret <i>et al.</i> , 2003).....	103
III. 61. La couche d'information résultant de l'intégration des données d'observation du groupe résidant aux abords de l'île de Sein (1994-1996) (d'après Liret <i>et al.</i> , 2000).....	105
III. 62. Les données bathymétriques du SHOM (d'après Le Berre, 1999, modifié).....	107
III. 63. Les données courantologiques du SHOM (d'après Le Berre, 1999, modifié).....	108
III. 64. Les variables extraites du MNT aux abords de l'île de Sein (d'après Liret <i>et al.</i> , 2000).....	110
III. 65. La méthode utilisée pour l'étude du domaine vital et la modélisation de l'habitat potentiel du grand dauphin (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2000)	111
III. 66. La méthode utilisée pour analyser le rôle des courants de marée dans la distribution des grands dauphins (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2002)	113
III. 67. Les résultats de l'analyse statistique pour l'analyse du domaine vital du grand dauphin (d'après Gourmelon <i>et al.</i> , 2000, modifié)	114
III. 68. Modélisation de l'habitat potentiel du grand dauphin en ne tenant compte que du relief sous-marin. 68a : aux abords de l'île de Sein. 68b : extrapolation à l'archipel de Molène.....	115
III. 69. Influence des courants de marée sur l'activité du groupe de grands dauphins aux abords de l'île de Sein (Gourmelon <i>et al.</i> , 2002)	116
III. 70. Age et densité des sondes bathymétriques du SHOM en mer d'Iroise (d'après Le Berre <i>et al.</i> , 2002)	118
III. 71. Variables utilisées pour la classification des fonds sous-marins de la mer d'Iroise (d'après Le Berre, 1999, modifié).....	119
III. 72. La classification des fonds sous-marins de la mer d'Iroise (Le Berre <i>et al.</i> , 2002).....	120
III. 73. Quelques nouvelles sources de données géospatiales : géodésie spatiale, photogrammétrie et télédétection (d'après Gourmelon, 2002).....	130
III. 74. Exemple d'utilisation de la modélisation pour l'étude des changements d'occupation des sols (d'après Lambin, 1997).....	131
III. 75. GAP : la méthode (d'après Jennings, 2000)	132

III. 76. Modélisation des dynamiques sociales et des dynamiques naturelles sur l'île d'Ouessant : contexte général (d'après Barbault, 2000 ; Lardon <i>et al.</i> , 1998 ; Moss, 2000).....	137
III. 77. Schéma des perturbations indirectes, induites par l'expansion démographique des colonies de goélands (d'après Vidal <i>et al.</i> , 2002).....	139