



HAL
open science

Les Systèmes d'Information Géographique : structure, mise en oeuvre et utilisation dans différentes études

Robert Méaille

► **To cite this version:**

Robert Méaille. Les Systèmes d'Information Géographique : structure, mise en oeuvre et utilisation dans différentes études. Géographie. Université de Nice Sophia-Antipolis, 1988. Français. NNT : . pastel-00957266

HAL Id: pastel-00957266

<https://pastel.hal.science/pastel-00957266>

Submitted on 9 Mar 2014

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.

THESE

Présentée à
L'UNIVERSITE DE NICE

par
Robert MEAILLE

en vue de l'obtention du titre de
DOCTEUR EN SCIENCES

Mention : SCIENCES DE L'INGENIEUR

LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE :
STRUCTURE, MISE EN OEUVRE ET
UTILISATION DANS DIFFERENTES ETUDES.

soutenue le 12 Septembre 1988, devant un Jury composé de :

MM.	AIME C.	Président
	BOUDOURESQUE C.F.	Rapporteur
	MONGET J.M.	Rapporteur
	WALD L.	Examineur

Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS

"Dieu bénit l'homme,
Non pour avoir trouvé, mais pour avoir cherché."

Victor HUGO.

A mes parents,

A Jean-Claude et Thérèse,

A mes amis.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué au Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels (CTAMN) de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (ENSMMP) à Sophia-Antipolis en liaison avec l'Université de Nice.

Je remercie Monsieur J.M. MONGET, directeur du CTAMN de m'avoir accueilli dans son centre et d'avoir bien voulu participer à mon jury de thèse.

Je tiens tout particulièrement à remercier Monsieur L. WALD, directeur de cette thèse, grâce à qui j'ai pu réaliser les travaux présentés ici.

Je remercie Messieurs C. AIME et C.F. BOUDOURESQUE de leurs conseils et de leur participation à ce jury.

Je remercie aussi, pêle-mêle, Messieurs M. ALBUISSON, L. DIABATE, H. GUILLARD, L. MENARD, P. MONTEIL, G. MOUSSU, D. OBRECHT, O. PERRAUD, O. PIVAUDRAN, J.F. RAIMONDI, R. RONFARD, P. SALLERIN, E. SANTARELLI, ainsi que Mesdemoiselles B. BIANCHI, A. VISCO, F. WEBER, pour m'avoir aidé et soutenu tout au long de ce travail grâce à leurs précieux conseils, leur humour et/ou leur(s) charme(s).

CHAPITRE 1

Introduction

On ne pourra bien dessiner le simple qu'après une étude approfondie du complexe.

Gaston BACHELARD.

Depuis que l'homme sait dessiner, il a essayé de modéliser le milieu l'environnant par des graphismes plus ou moins élaborés, afin de mieux appréhender celui-ci. L'évolution de la société humaine, aussi bien en pensée qu'en technologie, au cours des siècles séparant les premiers pas de l'humanité et la fin du vingtième siècle, a vu apparaître un besoin grandissant de connaissance du milieu terrestre, et par conséquent, une "explosion" de la collecte et du traitement de l'information. Celle-ci commença par la simple observation et représentation des informations cartographiques sur des tablettes d'argile (la première carte retrouvée est une tablette assyrienne dont la date estimée est environ -4000 ans), pour aboutir, de nos jours, à l'acquisition automatique par des satellites aux radiomètres de plus en plus complexes et performants de données multispectrales, et de leurs traitements informatiques.

La masse d'information acquise quotidiennement nécessite un volume de stockage très important. Ce stockage met en oeuvre plusieurs types de supports, dont les plus connus sont les supports papier avec codage graphique (donc encombrant), et les supports magnétiques ou optiques avec codage analogique ou numérique (mémoires de masse des ordinateurs actuels). Le problème de l'accumulation des informations au cours du temps est partiellement résolu grâce aux performances sans cesse croissantes des supports. Mais il apparaît alors un problème de gestion optimale de ces informations (rapidité de recherche, manipulations et analyses, mise à jour, création de nouvelles informations, restitution sous différentes formes - graphique, numérique, alpha-numérique - et/ou sur différents périphériques - moniteur couleur et/ou monochrome, imprimante couleur et/ou monochrome-, etc...). C'est pour cette raison que l'homme a créé différentes architectures de stockage de l'information sur ordinateur, ainsi que des outils de gestion de plus en plus élaborés. Les techniques les plus récentes de gestion des informations mettent en oeuvre des systèmes-experts grâce à l'utilisation des outils proposés par l'Intelligence Artificielle.

Ces structures appliquées au milieu environnant sont appelées Systèmes d'Information Géographique, souvent abrégés en SIG (en anglais : Geographical Information System, abrégé en GIS).

L'objectif du présent travail est, dans une première partie (chapitres 2 et 3), de présenter brièvement les différentes structures de Système d'Information Géographique rencontrées dans la bibliographie, leur portée scientifique ainsi que leurs buts et leurs problèmes. La plupart de ces Systèmes d'Information Géographique couvrent une zone géographique dont la surface est comprise entre celle d'un pays entier et celle d'une région.

La deuxième partie de ce travail (chapitres 4 à 7) présente quelques Systèmes d'Information Géographique élaborés au Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels (CTAMN) de l'Ecole des Mines de Paris dont nous sommes l'auteur ou auxquels nous avons collaboré activement. Cette partie permet d'aborder les différentes étapes de mise en oeuvre et de gestion de ces Systèmes d'Information Géographique. Ceux-ci ont une taille de l'ordre d'une région et ont été élaborés pour la réalisation d'une étude précise. Leur mise en oeuvre passe par les étapes suivantes : (i) - regroupement des informations (cartes thématiques, scènes de différents satellites, textes), (ii) - mise en forme de celles-ci (rectification géométrique et standardisation de l'information) et (iii) - création d'une structure de gestion de ces informations. Trois Systèmes d'Information Géographique ainsi que leurs utilisations sont étudiés. La présentation que nous en faisons porte surtout sur la manière d'utiliser les informations existantes pour obtenir soit une aide à la décision, soit une nouvelle information pertinente pour le projet examiné.

Le premier SIG étudié concerne le Parc National du Mercantour. Le problème de l'impact sur l'environnement de l'existence de nouvelles pistes de ski de fond est abordé à l'aide du SIG. Une fois les contraintes évaluées, la décision se fait au moyen de filtres informatiques de type "tout ou rien" analogues à un tamis multi-couches aux mailles bouchées ou non et au travers duquel l'information ne passe que par gravitation.

Le second nous entraîne en mer et plus particulièrement au niveau du benthos marin. La réalisation de ce SIG a permis de stocker toutes les cartes de peuplements benthiques et/ou de types de fonds existant pour une même zone ; les cartes ont été élaborées par des auteurs différents qui ont utilisé des méthodes très variables. Une fois ces informations, souvent antagonistes, réunies dans une même structure, une méthode d'analyse statistique recherche pour chaque pixel l'information la plus "sûre" et crée une carte de synthèse ainsi qu'une carte exprimant d'une certaine manière la représentativité statistique de cette synthèse. Cet exemple d'utilisation est plus complexe que le précédent car il fait intervenir une notion de fiabilité des informations collectées.

Le dernier exemple d'utilisation d'un SIG présente la mise en oeuvre d'une simulation de l'évolution du milieu urbain dans la région de Toulon - La Ciotat. Cette dernière utilisation couple le SIG à un modèle numérique. Ce modèle numérique simule l'évolution du milieu urbain, alors que les différentes contraintes intervenant sur cette évolution sont évaluées à partir du SIG pour chaque pixel. Ces contraintes sont calculées à partir de sept thèmes présents dans le SIG.

Une discussion sur la validité des études menées et des modèles employés, avec utilisation d'un Système d'Information Géographique, est présentée. Elle permet ainsi de définir les nombreuses perspectives d'utilisation et de gestion optimale des structures de ce type.

CHAPITRE 2

Les Systèmes d'Information Géographique

dans la littérature :

leur structure.

**La connaissance mûre écoute,
Celle qui n'a pas mûri parle.
A.C.W. STARING.**

2.1 . Définition

Depuis que la cartographie existe, les hommes ont essayé de construire des cartes géo-référencées afin de mieux connaître leur milieu. L'exemple le plus pertinent, selon Coppock et Anderson (1987), est la construction d'un d'Atlas géographique qui peut être considéré comme un Système d'Information Géographique du fait qu'il consiste en un large regroupement de données très variées provenant de sources différentes.

Le développement de l'informatique a permis le développement de systèmes de traitement de données, avec une masse de données incorporées sans cesse en augmentation, ainsi que le stockage de leurs données et leur transmission à longue distance par réseau. Toutes ces évolutions ont permis d'orienter la cartographie systématique vers des systèmes de bases de données appelées Systèmes d'Information Géographique (SIG). De tels systèmes permettent de stocker un volume important d'informations géocodées, de sources très différentes, mais aussi de les traiter, de les restituer sous forme de cartes thématiques, de les mettre à jour ainsi que de les interroger ou de les distribuer.

Les SIG existant actuellement dans le monde couvrent des zones géographiques dont la surface est comprise entre celle d'une région et celle d'un pays entier comme la Chine (Shupeng, 1987) ou les U.S.A. (Tomlinson, 1987). Néanmoins, quelles que soient la taille et la résolution spatiale du SIG, sa réalisation suit un schéma conceptuel déjà bien établi.

Les deux paragraphes suivant vont nous permettre, d'une part, de définir les différents processus de mise en oeuvre d'un SIG sans distinction de taille, et d'autre part, d'analyser les différences significatives dues à la taille et à la résolution spatiale des SIG.

2.2 . Structures communes aux Systèmes d'Information Géographique

Les SIG regroupent en leur sein un grand nombre d'informations qu'il faut au préalable acquérir et stocker, et, par la suite, gérer de façon optimale. Pour Smith *et al.* (1987), un SIG doit comporter cinq composants principaux :

- (a) - un processus d'acquisition et de structuration de l'information,
- (b) - un processus de gestion de l'information,
- (c) - un processus de recherche de l'information,
- (d) - un processus de manipulation et d'analyse de l'information,
- (e) - un processus de restitution de l'information.

Ces cinq composants sont les niveaux fondamentaux de tout SIG, quels que soient sa taille et son utilité ; seule la complexité de ceux-ci varie d'un SIG à un autre. Dans ce chapitre, nous n'étudierons que brièvement ces différents composants, ceux-ci étant plus détaillés dans le chapitre suivant avec la mise en place de trois SIG.

Une des premières caractéristiques que doit offrir un SIG est la possibilité d'acquérir des informations dont le format de base peut être différent (points, vecteurs, tableau, texte), et de les structurer de façon homogène avant de les enregistrer définitivement. Ce processus doit pouvoir mettre en jeu toute une gamme de matériel d'acquisition tel que les tables à numériser, les scanners, les cameras vidéo, etc... , couplés à des consoles graphiques plus ou moins performantes.

Un système performant de gestion interne de l'information doit être présent. Il doit être composé de matériels et de logiciels facilitant les accès et le stockage des données, mais aussi des outils informatiques afin d'éviter la redondance des informations, de corriger certaines erreurs (Chrisman, 1987 ; Walsh *et al.*, 1987) et surtout de préserver la sécurité et l'intégrité des informations.

La recherche des informations est un des points les plus complexes d'un SIG. Elle doit, d'une part être rapide, et d'autre part éviter tout terme technique complexe inconnu des utilisateurs néophytes. La réalisation de ces deux conditions passe par la création de procédures de communication de plus en plus complexes. De nos jours, le développement de l'Intelligence Artificielle permet de créer des outils performants afin d'élaborer des systèmes-experts (fig. 2.1) et des interfaces homme - machine en langage naturel (Robinson et Frank, 1987 ; Ripple et Ulshoefer, 1987), augmentant de ce fait les possibilités de service des SIG. Ces possibilités peuvent se traduire succinctement par les tâches suivantes : une gestion optimale des données, mais aussi des manipulations et des analyses de l'information contenue dans le SIG beaucoup plus aisées.

Enfin, la restitution des informations est un composant important. Elle donne la possibilité de retrouver les informations de départ, mais aussi celles créées après analyse des premières, et ceci sous n'importe lequel des supports de sortie des informations tels que les moniteurs (couleurs ou monochromes), les tables traçantes, les imprimantes (couleurs ou noir et blanc), ou les restituteurs photographiques à laser.

La plupart des techniques que nous venons d'évoquer sont utilisables pour l'élaboration des Systèmes d'Information Géographique concernant aussi bien des surfaces restreintes que de larges surfaces. Seule la gestion des informations sera plus complexe chez ces derniers, comme nous allons le constater ultérieurement.

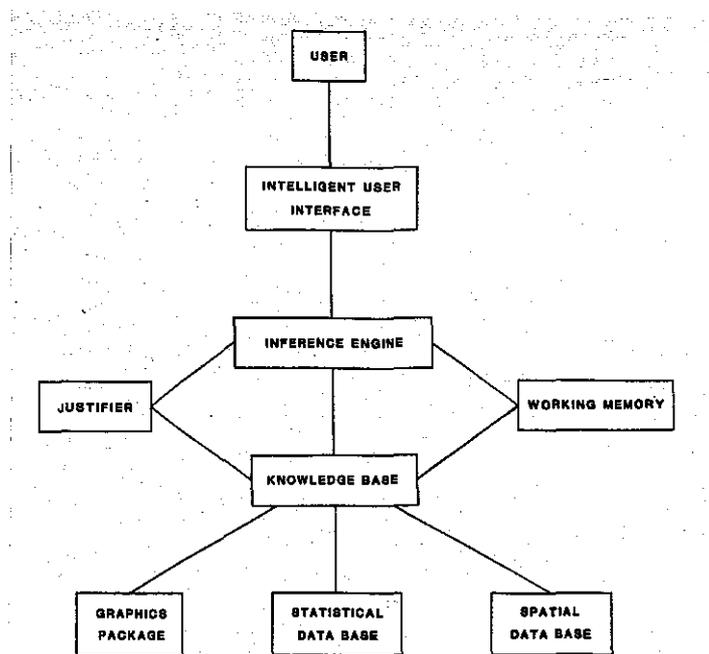


Figure 2.1 : Conceptualisation d'un système expert d'information géographique *In* Ripple et Ulschoefer, 1987.

2.3 . Différences entre des Systèmes d'Information Géographique de tailles différentes

Une des premières différences existant entre des SIG utilisés à l'échelon national et ceux créés pour les besoins d'un projet précis, souvent restreint à une petite surface, est la masse d'informations acquises et par conséquent les supports de celles-ci. Les premiers SIG sont pour la plupart élaborés sur des systèmes à base de mini-ordinateurs pouvant stocker une masse de données très importantes. Les seconds sont souvent mis en oeuvre sur des systèmes à base de micro-ordinateurs couplés (ou non) à des supports optiques, comme les disques optiques numériques, permettant d'augmenter la capacité de stockage de ces machines. De ce fait, la mise en place de systèmes plus petits par la taille sera beaucoup plus rapide et surtout beaucoup moins onéreuse.

La finalité des SIG de grande taille est d'être utilisables et utilisés par un plus grand nombre de personnes intéressées. Ceci nécessite alors un système de réseau informatique permettant la distribution des informations à tout utilisateur doté d'un terminal de réception (le MINITEL^(R) français en est un bon exemple), mais aussi toute une série de logiciels et de matériels permettant la gestion de ces réseaux afin d'optimiser les échanges.

Même si le concept de réalisation d'un SIG reste identique quelle que soit la taille de celui-ci, la conception change. Lorsque l'on augmente la taille, la gestion des informations devient alors beaucoup plus complexe. Comme nous l'avons remarqué précédemment, la structure des informations est variable. De ce fait, afin d'éviter certaines transformations de la structure de l'information dans les SIG de petite taille, il apparaît utile de transformer préalablement toutes les données acquises de leur format originel en un format pré-établi, ce format étant souvent la maille régulière de pixels (fig. 2.2). Cette structuration des données originelles n'est pas obligatoire pour les SIG de grande taille car, d'une part, les outils de structuration sont liés à la gestion des informations, et d'autre part, il n'est pas utile de prédéfinir un format de données car chaque utilisateur potentiel connecté au SIG peut désirer tel ou tel autre format.

1,1	1,2		1,J-1	1,J	
2,1	2,2		2,J-1	2,J	
		<table border="1"><tr><td>i,j</td></tr></table>	i,j		
i,j					
I-1,1	I-1,2		I-1,J-1	I-1,J	
I,1	I,2		I,J-1	I,J	

Figure 2.2 : Format dit de la maille régulière de pixels.

CHAPITRE 3

Réalisation d'un Système d'Information Géographique

en vue d'une étude locale.

3.1 . Définitions préliminaires

Nous reprendrons les définitions proposées par Yu (1987) afin de poser dès à présent les différents concepts liés à la structure des informations.

Nous appellerons "scène" tout échantillon de la réalité qui nous entoure. L'image résultant de cette scène est une projection de celle-ci dans un domaine fini D de l'ensemble des couples de réels \mathbb{R}^2 . Elle peut être définie comme une distribution $f(x,y)$ de deux variables réelles, prenant la valeur 0 à l'extérieur de D et ayant une valeur positive ou nulle et bornée par B à l'intérieur de D :

$$\begin{aligned} f(x,y) &= 0 & (x,y) \notin D \\ 0 \leq f(x,y) &\leq B & (x,y) \in D \end{aligned} \quad D \subset \mathbb{R}^2$$

Une image numérique est constituée d'un échantillonnage de la fonction image précédente. Cet échantillonnage concerne à la fois les deux variables x et y et la distribution f . Il est d'usage de fixer l'origine d'une image numérique en son coin supérieur gauche, ainsi les variables x et y prennent les valeurs discrètes :

$$\begin{aligned} x_i, i &= 1, \dots, I \\ y_j, j &= 1, \dots, J \end{aligned}$$

De même $f(x,y)$ devient :

$$f_k, k = 0, \dots, N$$

L'image numérique est alors une matrice (ou tableau ou maille régulière de pixels) $E(i,j)$ (fig. 2.2) qui comporte I lignes et J colonnes. On appelle pixel tout élément géographique $P(i,j)$ de E . Le pixel est donc une surface, et plus exactement la plus petite surface discernable de l'image numérique. Les composantes de la matrice $E(i,j)$: $f(i,j)$, sont entières et comprises entre les valeurs 0 et N et sont appelées comptes numériques. f peut ne pas être définie *a priori* en tous les pixels de E , auquel cas on attribue à ces pixels une valeur arbitraire f_R fixée par l'utilisateur afin de faciliter la gestion et la manipulation de l'image.

Dans la suite de ce travail, le domaine D est divisé en deux sous-domaines T et M correspondant respectivement au domaine terrestre et au domaine marin et lacustre. T et M obéissent aux deux expressions suivantes :

$$T \cup M = D$$

$$T \cap M = O$$

Cette dernière expression ne sera pas valide dans certains cas comme l'espace intertidal ou les zones régulièrement submergées par des crues. Ces cas n'apparaissent pas dans nos études.

L'image numérique est alors la somme des images numériques E_T et E_M , projections de la scène dans les domaines T et M :

$$E = E_T + E_M$$

Pour chaque pixel, on a obligatoirement :

$$E_T(i,j) = f_R \text{ et } E_M \text{ quelconque} = f_k \neq f_R$$

ou

$$E_T(i,j) \text{ quelconque} = f_k \neq f_R \text{ et } E_M = f_R$$

On peut définir plus généralement les opérations sur les images. Par exemple, soit n images E_m :

$$E = \sum_{m=1}^n E_m \text{ est appelée image somme et signifie}$$

$$E(i,j) = \sum_{m=1}^n E_m(i,j) \text{ pour tout } m \text{ tel que } E_m(i,j) \neq f_R$$

Il en va de même pour les autres opérations de type mathématique, quelle que soit leur complexité. On peut également définir des opérations logiques comme par exemple l'opération \cap (intersection), indiquant une relation binaire de type "ET" entre des valeurs f_k égales à 0 ou 1. L'image intersection E de n images E_m est définie ainsi :

$$E = \prod_{m=1}^n E_m \text{ et signifie}$$

$$E(i,j) = \prod_{m=1}^n E_m(i,j) \text{ pour tout } m \text{ tel que } E_m(i,j) \neq f_R$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{si } \forall m, E_m(i,j) = 1 \\ 0 & \text{si } \exists m \text{ tel que } E_m(i,j) = 0 \end{cases}$$

Plus généralement on peut écrire :

$$E(i,j) = E_1(i,j) \text{ ET } E_2(i,j) \text{ ET } \dots \text{ ET } E_n(i,j)$$

La définition de l'opérateur Laplacien, utilisé dans le chapitre 7, utilise la notion de points voisins. On définit généralement deux voisinages : les 4-voisins (4-connexité) et les 8-voisins (8-connexité).

Le premier, que nous utiliserons par la suite, concerne les pixels adjacents à un pixel donné suivant les lignes (i) et les colonnes (j). Les 4-voisins du pixel P(i,j) appartenant à E sont les quatre pixels de coordonnées (i,j±1) et (i±1,j), c'est-à-dire :

	(i-1,j)	
(i,j-1)	(i,j)	(i,j+1)
	(i+1,j)	

Le second voisinage appelé 8-voisins, concerne les pixels adjacents à un pixel donné suivant les lignes (i), colonnes (j) et diagonales (i,j). Les 8-voisins du pixels sont les points de coordonnées (i,j±1), (i±1,j) et (i±1,j±1), c'est-à-dire :

(i-1,j-1)	(i-1,j)	(i-1,j+1)
(i,j-1)	(i,j)	(i,j+1)
(i+1,j-1)	(i+1,j)	(i+1,j+1)

Toutes ces définitions préliminaires permettent, d'une part, de définir un cadre mathématique des Systèmes d'Information Géographique, et, d'autre part, de poser les fondements des différents modèles utilisés au cours des études présentées ultérieurement.

3.2 . Mise en place d'un Système d'Information Géographique

Les informations contenues dans la matrice $E(i,j)$ peuvent être d'origines diverses :

- Inventaire ponctuel : spatial et/ou temporel
- Données statistiques afférentes à une zone délimitée
- Cartes thématiques
- Photo-interprétation
- Données numériques issues de la télédétection spatiale ou aéroportée

Ces diverses informations, une fois reliées entre elles, forment alors un Système d'Information Géographique qui met en forme, archive, élabore, retrouve et édite des informations à partir d'une documentation collectée en fonction des finalités demandées.

La constitution d'un SIG suit dans l'ensemble le chemin montré par la figure 3.1. Elle passe également par des étapes obligatoires qui sont :

- **Choix de l'unité élémentaire** : ce choix est très important car il définit le niveau de perception du système, i.e. la résolution spatiale. Dans de nombreux cas, il est intéressant de prendre une résolution spatiale en concordance avec les images satellitaires que l'on désire acquérir afin de ne pas échantillonner celles-ci. Néanmoins, ce choix n'est pas sans contrainte. En effet, les SIG, présentés dans ce chapitre et les suivants, sont stockés sur des micro-ordinateurs de type IBM-PC^(R), où la capacité de la mémoire de masse utilisée est limitée. Par conséquent, une augmentation de la résolution spatiale entraînerait une augmentation de la masse d'information qui deviendrait difficile à stocker et à gérer.

- **Intégration des données** : comme nous l'avons souligné précédemment, les données d'un SIG peuvent avoir plusieurs origines, mais n'ont qu'une seule structure : la maille régulière de pixels ou matrice de pixels. Ainsi, une fois les différents documents réunis, ceux-ci doivent être mis sous forme numérique. Plusieurs cas peuvent être rencontrés :
 - * les informations sont déjà sous forme numérique comme les données satellitaires ou aéroportées. Aucune transformation n'est utile,
 - * les informations sont sous forme cartographique. Dans ce cas, elles doivent être numérisées grâce à une table à numériser ou un scanner,
 - * les informations sont sous forme de tableau de données chiffrées. Il faut alors localiser géographiquement, lorsque c'est possible, ces chiffres en les liant à des objets cartographiques,
 - * les informations sont sous forme alpha-numérique. Une structure est alors créée permettant de lier ces données à de nouvelles données sous forme numérique.

Ces différents cas sont rencontrés et explicités dans les prochains chapitres.

- **Structuration géométrique des données** : cette étape permet d'homogénéiser la répartition spatiale des objets en choisissant un repère géométrique standard (la projection conique conforme Lambert zone III, par exemple), qui sera appliqué à toutes les informations. Cette étape, nécessitant le plus souvent des corrections géométriques, des translations de repère ou des rééchantillonnages, est très importante car elle permet de mettre en coïncidence géométrique toutes les informations acquises par passage de la géométrie d'acquisition à la géométrie choisie. La méthode utilisée dans cette thèse pour réaliser cette transformation est une méthode d'estimation statistique, avec prise d'amers, de la déformation géométrique (Albuisson et Monget, 1978 ; Bianchi, 1988). Elle consiste à pointer sur l'image, puis, sur la carte de référence, quelques amers dont on repère les coordonnées relatives dans chaque repère. Par estimation statistique, on ajuste un modèle (par exemple, polynômial) sur ces listes de coordonnées, modèle permettant de passer du repère de l'image à celui de la carte de référence. Ce modèle est ensuite appliqué à chaque point de l'image. Cette méthode a l'avantage d'être facile à mettre en oeuvre, d'être rapide, mais

surtout d'être applicable aussi bien à des données satellitaires que cartographiques car elle ne nécessite aucun paramètre extérieur.

La rectification géométrique est nécessaire dans ce type de Système d'Information Géographique car les études développées dans les prochains chapitres sont basées sur une parfaite correspondance géographique des pixels appartenant à des couches d'information différentes (voir ci-dessous).

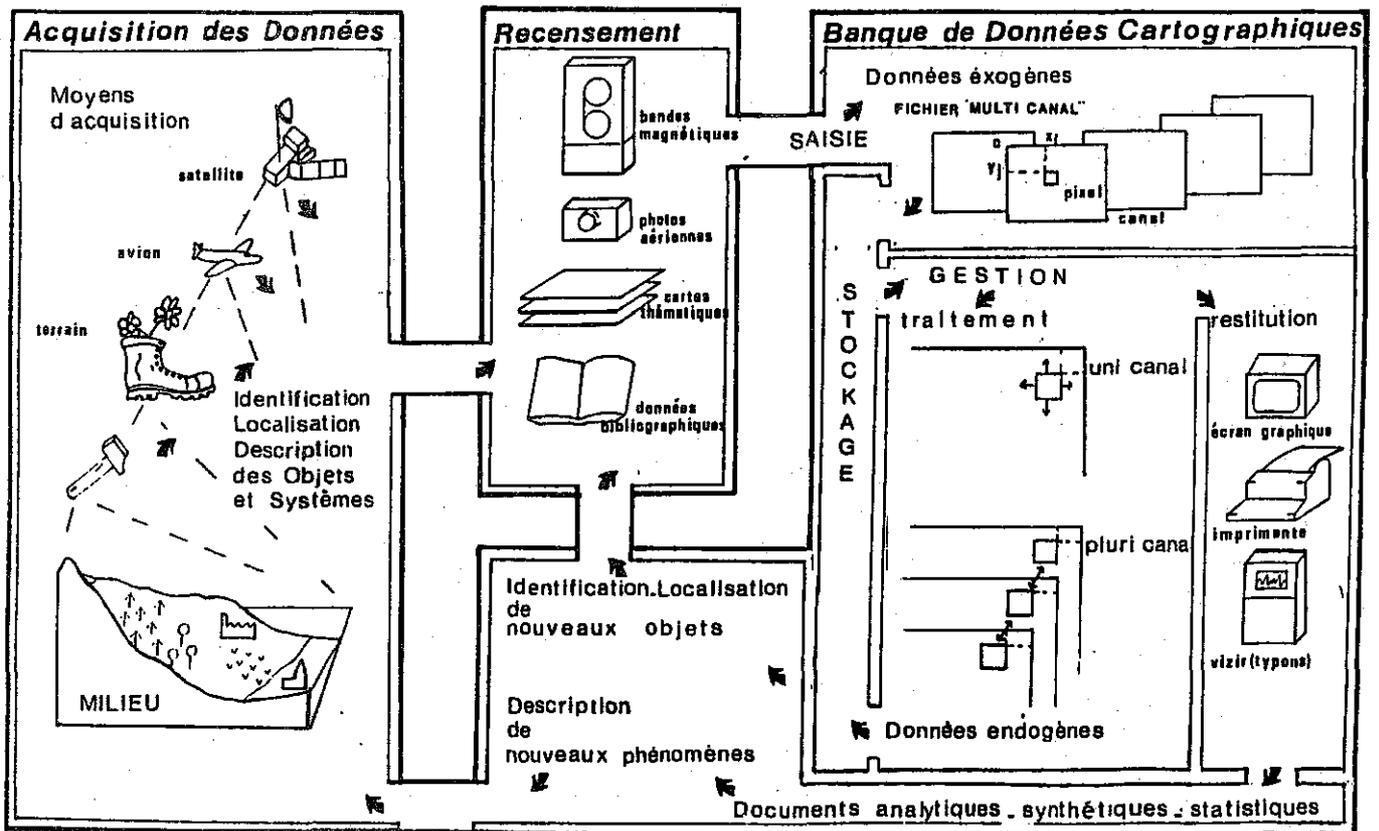


Figure 3.1 : Constitution d'un Système d'Information Géographique In Giraud (Communication personnelle).

3.3 . Structure intrinsèque multi-couches d'un SIG

La structure des SIG, cités ultérieurement, mis en place jusqu'à présent est identique quelle que soit la finalité de l'étude. Cette structure est relativement répandue (Smith et Blackwell, 1980 ; Niemann *et al.*, 1987 ; Shasby *et al.*, 1981 ; Williams *et al.*, 1985 ; Arnberg et Österlund, 1987 ; Logan et Bryant, 1987) et est particulièrement utilisée au CTAMN (Giraud *et al.*, 1983 ; Adam de Villiers - Demarcq, 1985 ; Bardinnet *et al.*, 1986 ; Cano, 1987 ; Wald, 1987).

La structure du SIG, que ce soit celui intéressant le milieu terrestre ou celui concernant le milieu marin, est de forme multi-couches. Comme le montre la figure 3.2, elle permet de mettre en coïncidence géométrique différents plans d'information autorisant ainsi le croisement des plans ou la synthèse de toutes les informations contenues dans ces plans.

Une même structure de stockage n'empêche pas ces SIG d'avoir une philosophie de conception différente. La différence entre les SIG concernant d'une part le domaine terrestre et d'autre part le domaine marin apparaît dans la source même des informations et donc dans la finalité des SIG. En effet, les SIG concernant la région terrestre de Toulon et le Parc National du Mercantour ont une structure multi-couches dans laquelle chaque couche correspond à un type d'information (une carte thématique par exemple) non redondant par rapport à une autre couche. On peut donc dire qu'il y a indépendance des taxons (unités physiographiques du paysage - Monget, 1986-) d'une couche à l'autre. L'empilage successif de différentes couches de données non redondantes augmente sans cesse la taille du SIG, et donc la diversité des informations stockées. Dans le cas où une nouvelle carte correspond à une mise à jour d'une carte antérieure (inventaire forestier par exemple), et n'est donc pas indépendante de celle-ci, elle remplace complètement l'ancienne carte devenue obsolète (ou plutôt considérée comme archive), de telle sorte que l'indépendance des cartes est conservée.

A l'opposé, dans l'exemple choisi dans cette thèse, les données du domaine marin ne se composent que de cartes du même thème : les peuplements benthiques. Ce SIG se différencie des précédents car ses couches constituent une série temporelle d'informations thématiquement identiques d'un même lieu. Les informations ont été acquises à différentes années et périodes par des auteurs différents utilisant des techniques différentes. De ce fait, et étant données les difficultés créées par la présence d'une couche d'eau, chaque carte de peuplements benthiques est composée de points ou de transects d'observation servant de base à une interpolation. Par conséquent, les modifications de peuplements entre deux cartes peuvent provenir, soit d'une réelle évolution des peuplements dans le temps, soit d'un réseau de points d'observation différents. Dans ce sens, nous pouvons considérer la cartographie des

peuplements benthiques comme un processus stochastique masquant une éventuelle évolution naturelle de ces peuplements, et où chaque couche est une représentation de ce processus. Par conséquent, l'empilement de couches successives dans le SIG n'augmente pas la diversité des informations, mais la qualité d'ensemble de celles-ci.

La résolution spatiale de ce SIG (25 m x 25 m) a également nécessité une division de la zone d'étude en plusieurs secteurs afin d'optimiser la gestion des informations. Nous reviendrons ultérieurement sur cette gestion et les causes de cette division.

Trois exemples d'utilisation de trois SIG différents sont maintenant présentés selon un ordre croissant de complexité d'utilisation (chapitres 4, 5 et 7).

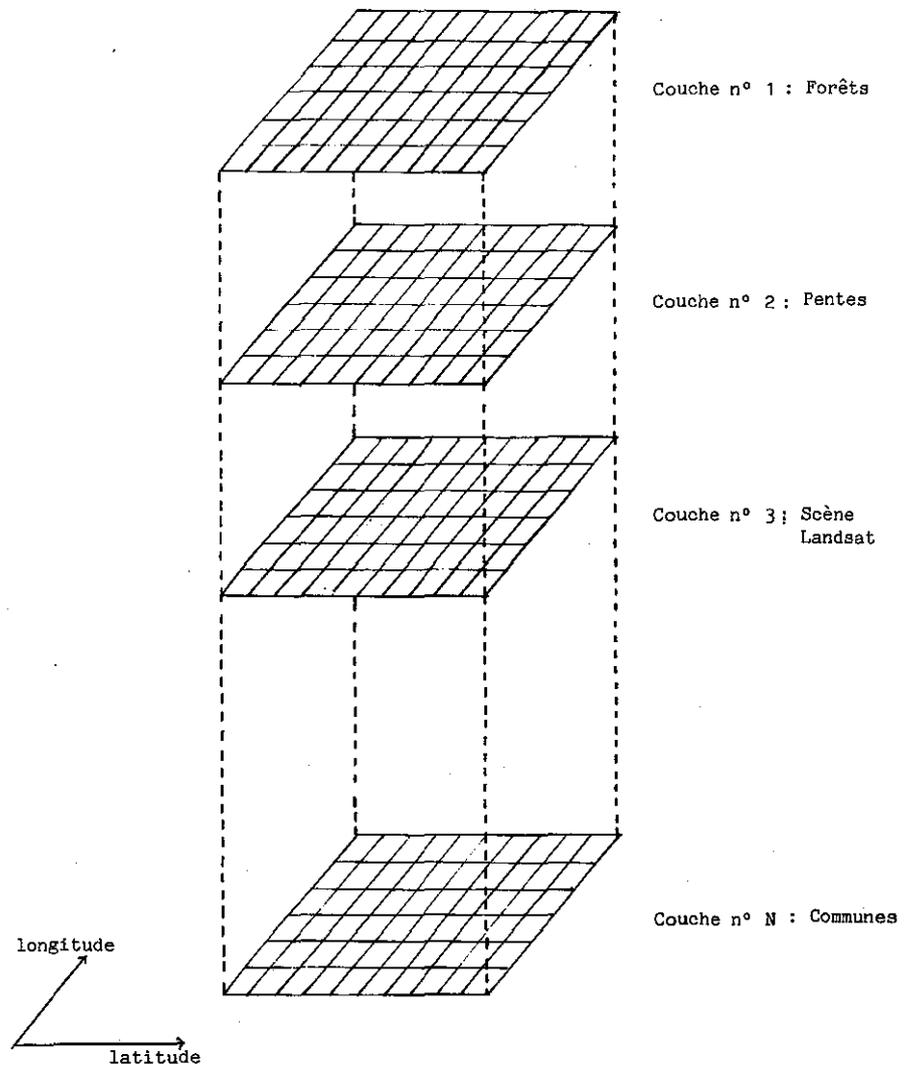


Figure 3.2 : Structure multi-couches des Systèmes d'Information Géographique utilisés dans ce travail.

CHAPITRE 4

Utilisation du Système d'Information Géographique

du Parc National du Mercantour

pour une étude d'impact

**Qu'est-ce que l'homme dans la nature? Un
néant à l'égard de l'infini, un tout à l'égard
du néant, un milieu entre rien et tout.**

Blaise PASCAL.

4.1 . Introduction - Présentation du SIG

Depuis plusieurs années, le Parc National du Mercantour (PNM) tente de mettre en valeur et de gérer ses richesses naturelles en mettant en oeuvre un Système d'Information Géographique sur toute sa surface. Giraud (1983) d'abord, puis Cano (1987) ont tenté de mettre en valeur, par leurs études respectives, les différentes informations contenues dans la carte de Laurent (1983, 1984) concernant les différents faciès du Parc ainsi que des informations concernant la topographie et ses dérivées.

Le SIG ainsi créé est formé de couches successives d'information relatant, soit les diverses strates paysagères, soit le modèle numérique de terrain et ses dérivés (pentes, expositions, ombres portées, ensoleillement), soit des indices biologiques concernant des grands ongulés sauvages, soit des données provenant des sept bandes spectrales du radiomètre Thematic Mapper du satellite Landsat (cf.annexe 1). Tous les thèmes de ce SIG sont rassemblés dans le tableau 4.1.

Nous ne détaillerons pas davantage l'aspect création et gestion du SIG dans ce chapitre, mais nous discuterons un exemple d'étude ayant utilisé cette structure d'informations.

Avant de présenter, l'étude proprement dite, il paraît utile de replacer géographiquement la zone d'étude. Celle-ci se situe dans la vallée du Boréon elle-même située dans le Parc National du Mercantour (fig. 4.1). Cette zone correspond à un carré de 10 km de côté situé dans la partie est du Parc. La résolution spatiale des informations a été fixée à 20 m pour des raisons de compatibilité avec des données Landsat TM ou SPOT.

LES ALPES MARITIMES

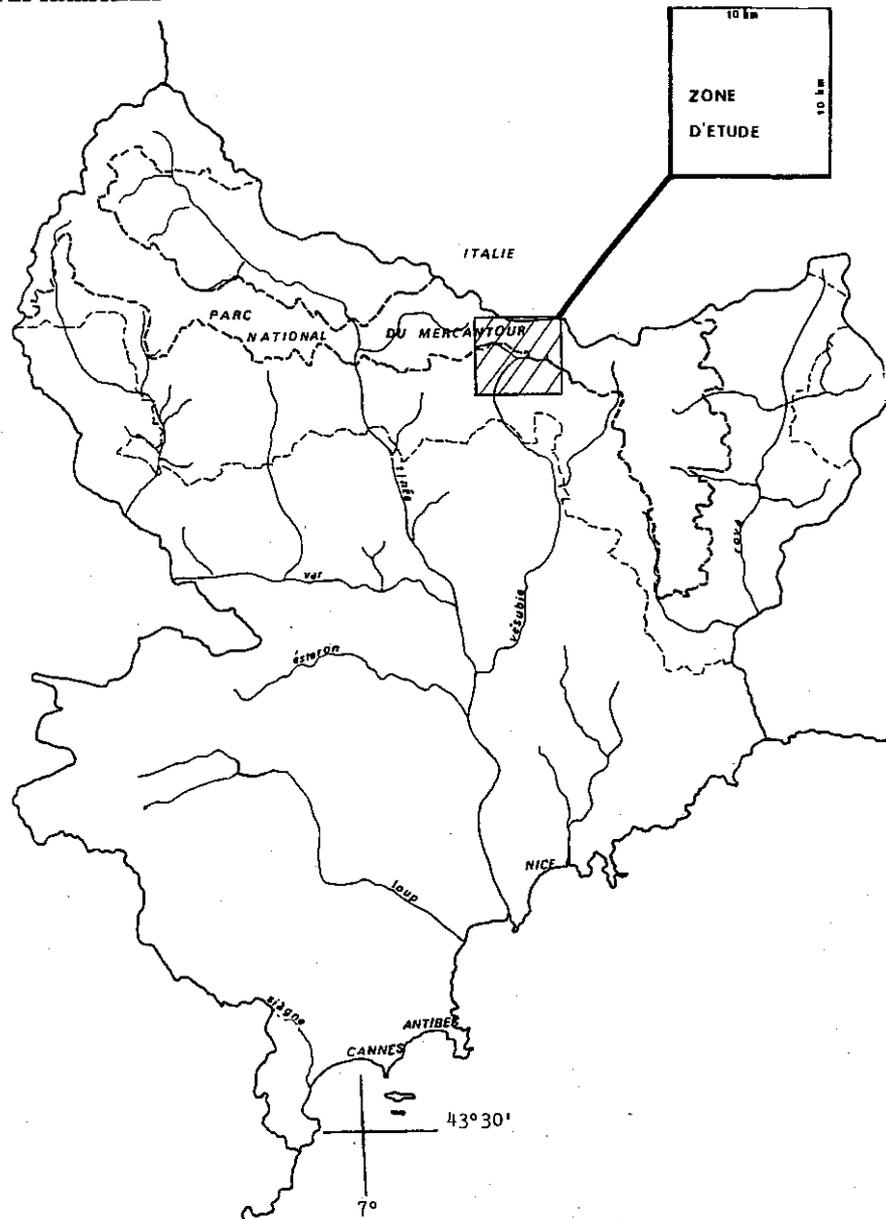


Figure 4.1 : La zone encadrée est la zone couverte par le SIG utilisé pour l'étude d'impact. Elle est située dans la partie est du Parc National du Mercantour.

Données satellitaires :

Images fournies par les sept canaux Thematic Mapper du satellite Landsat 4.

Données thématiques :

- carte des habitats,
- modèle numérique de terrain (topographie brute, pente, exposition, ensoleillement potentiel et ensoleillement avec ombres portées le 21 décembre 1981),
- aménagements et usages touristiques,
- carte écologique simplifiée,
- usage cynégétique,
- localisation saisonnière des chamois (*Rupicapra rupicapra*), des mouflons (*Ovis amon*) et des bouquetins (*Capra ibex*).
- propositions d'amélioration cynégétique pour les chamois et les mouflons,
- zones potentielles du chamois et du mouflon,
- zones d'abrouissement (i.e. zones où les ongulés broutent),
- Indices de présence des ongulés sauvages pour un enneigement faible et pour un enneigement moyen,
- zone d'extension maximum d'hivernage des chamois et des mouflons,
- enneigement de l'hiver 1983 - 1984,
- pistes de ski de fond dans le Boréon,
- zones d'avalanches

Tableau 4.1 : Thèmes présents dans le Système d'Information Géographique du Parc National du Mercantour (au total 31 cartes).

4.2 . Présentation du projet

L'étude d'impact que nous présentons ici correspond en fait à une étude préliminaire d'impact ou une étude de faisabilité, et n'est pas comparable à une étude d'impact telle que l'on doit la mener lors de la construction d'une autoroute par exemple (SETRA, 1975).

Cette étude porte sur un projet de création de pistes de ski de fond dans la vallée du Boréon. En effet, quelques pistes existent déjà dans le fond de la vallée, mais l'extension de ce réseau à des plateaux sis plus en altitude (plateaux des Erps et du Cavalet) nécessite la construction d'une piste de ski de fond (au moins) de liaison joignant les deux pistes. Au total, quatre tracés de liaison ont été sélectionnés lors d'une première étude (fig. 4.2).

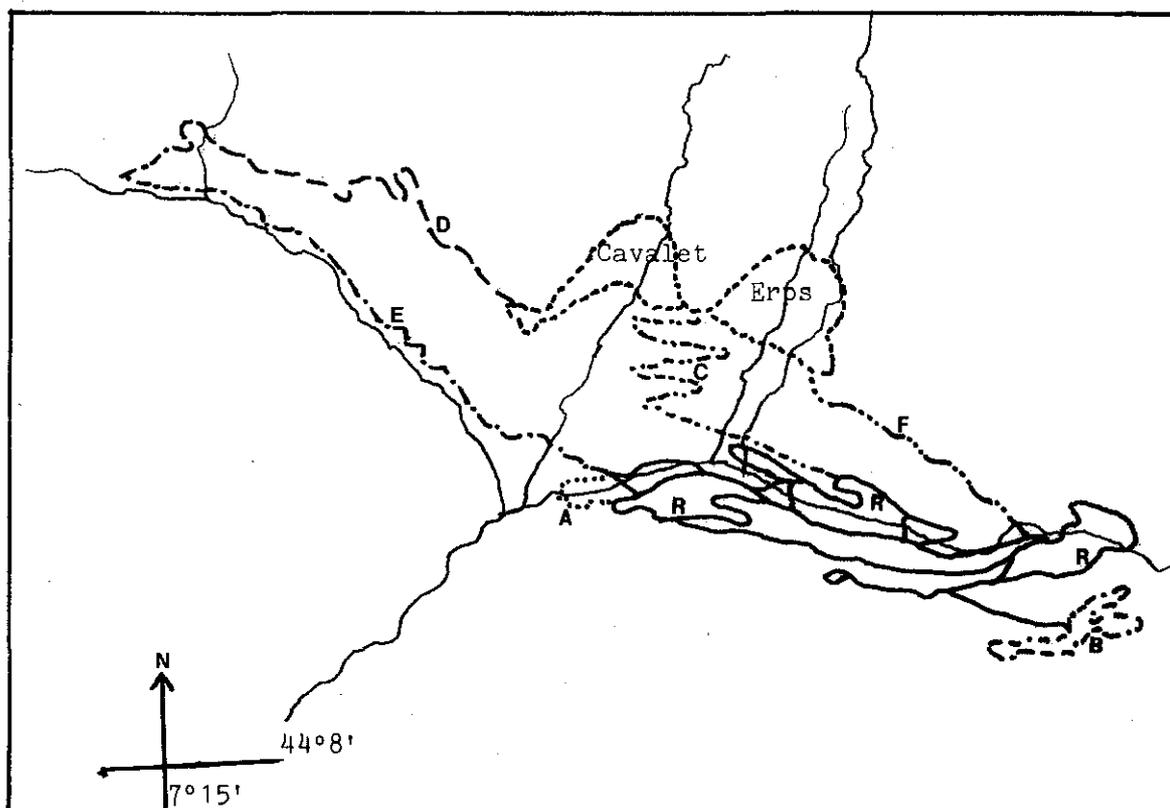


Figure 4.2 : Tracé des projets de pistes de ski de fond. Les projets A et B sont au fond de la vallée. Les quatre projets de liaison sont les projet C, D, E et F. Les pistes R correspondent au réseau actuel.

Afin de sélectionner de façon objective le projet le mieux adapté, c'est-à-dire celui tenant compte des problèmes physiques, mais aussi des problèmes liés à la faune autochtone, une méthode d'utilisation des informations pertinentes du SIG a été élaborée. Elle s'appuie surtout sur les méthodes d'étude d'impact par planification écologique utilisant des notions d'aptitudes propices ou contraignantes du milieu à certaines constructions. Un exemple de planification écologique effectué par la "Graduate School of Design" de l'université de Harvard (1967) est donné par la figure 4.3.

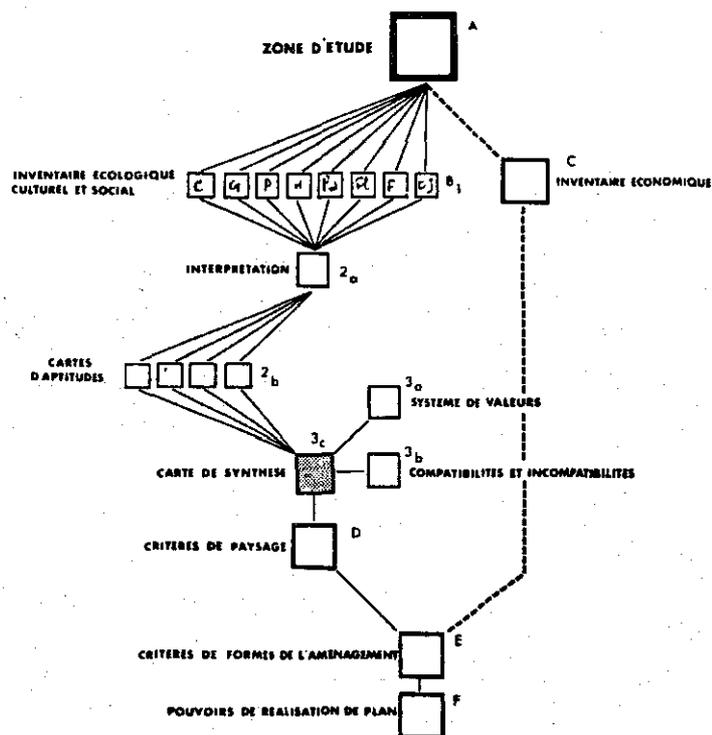


Figure 4.3 : Schéma de planification écologique.

La démarche que nous avons suivie est la suivante. Dans un premier temps, nous avons sélectionné les informations décrivant les aspects techniques et préventifs accompagnant la construction de pistes de ski de fond en montagne. Puis, chacune de ces informations a été seuillée, permettant ainsi de définir deux états par rapport à ce seuil : favorable - défavorable. Le passage de l'algorithme de sélection sur ces informations forme la dernière étape.

Du point de vue technique, quatre thèmes ont été choisis : l'enneigement moyen d'un hiver, les pentes, l'exposition et l'ensoleillement. Chacun de ces quatre thèmes joue un rôle important dans la faisabilité de ces projets :

- l'enneigement moyen permet de constater si la couche neigeuse est suffisante tout au long de la période hivernale pour la pratique du ski de fond. De ce fait, les zones d'enneigement faible sont considérées comme des zones défavorables et sont codées FAUX ; au contraire, les zones où l'enneigement est moyen ou fort sont des zones favorables et sont codées VRAI,
- les pentes nous indiquent les lieux les plus favorables à l'élaboration des pistes : nous n'avons retenu que les endroits où la pente n'excède pas 15 degrés (VRAI),
- l'ensoleillement joue un rôle important d'une part sur la couche neigeuse, et d'autre part, sur le confort des éventuels utilisateurs des pistes. C'est pour ces raisons que nous avons considéré comme défavorables (FAUX) les secteurs recevant une quantité d'ensoleillement supérieure à celle d'un secteur plan de même surface.
- l'exposition, étroitement liée avec l'ensoleillement, joue le même rôle que celui-ci. Nous avons alors considéré comme défavorables (FAUX) les zones orientées plein sud.

Les problèmes de sécurité d'utilisation ont été étudiés grâce à une carte délimitant les passages de coulées d'avalanches, et donc, les lieux où la construction des pistes de ski ne peut être envisagée (FAUX).

A ces informations d'ordre physique ou technique viennent s'ajouter des informations sur le comportement des grands ongulés sauvages présents dans le parc. Celles-ci réunissent différents indices biologiques tels que les indices de présence en fonction de l'enneigement, les zones d'abrutissement ou de passage, ainsi que les zones d'hivernage potentielles délimitées par des propositions d'améliorations cynégétiques. Le Parc National du Mercantour ayant comme un de ses nombreux objectifs la protection des espèces animales présentes sur son domaine, les informations précédemment citées serviront à connaître les zones où sont présents les ongulés, et ainsi de délimiter les zones où les pistes de ski seraient nuisibles.

Toutes ces données doivent être analysées et triées afin de faire apparaître les zones favorables à la construction des pistes de ski, et ainsi sélectionner le projet le mieux adapté et le moins nuisible.

4.3 . Méthodologie suivie

La sélection des lieux géographiques propices au passage des pistes de ski a été réalisée grâce à un algorithme, basé sur des choix binaires, se rapprochant fortement de ceux utilisés en analyse des caractéristiques (McCammon *et al.*, 1983 ; Sinding-Larsen *et al.*, 1979). De ce fait, chacun des thèmes sélectionnés a été seuillé donnant ainsi au milieu les deux états suivants :

- VRAI = lieu propice,
- FAUX = lieu défavorable.

Le choix se fait ensuite par exploration des cinq thèmes physiques sélectionnés grâce à l'opérateur booléen "ET" . Ainsi, en chaque pixel de coordonnées géographiques (x,y), les n valeurs (n étant le nombre de thèmes i.e. n=5 dans notre étude) $f_n(x,y)$ sont recodées par rapport au seuil S_n choisi, en une valeur $F_n(x,y)$, ne pouvant prendre que deux valeurs possibles 1 ou 0 (VRAI ou FAUX). Suivant la nature du thème étudié, deux cas peuvent se présenter. En effet, les zones favorables peuvent, soit être celles dont les valeurs $f_n(x,y)$ sont supérieures au seuil S_n (cas de la couverture neigeuse), soit être celles dont les valeurs $f_n(x,y)$ sont inférieures au seuil S_n (cas des pentes). Ces deux cas se formulent de la façon suivante :

- $f_n(x,y) \geq S_n \implies F_n(x,y) = 1$ (ou VRAI)
- $f_n(x,y) < S_n \implies F_n(x,y) = 0$ (ou FAUX),

ou inversement,

- $f_n(x,y) > S_n \implies F_n(x,y) = 0$ (ou FAUX)
- $f_n(x,y) \leq S_n \implies F_n(x,y) = 1$ (ou VRAI),

Ainsi, la nouvelle valeur finale $F_f(x,y)$ est calculée de la façon suivante :

$$F_f(x,y) = \prod_{m=1}^n F_m(x,y)$$

Ce traitement est de type série de filtres ou de tamis à mailles bouchées ou non et au travers desquels l'information ne passe que par gravitation (fig. 4.4). En effet, chaque image d'un thème sélectionné peut être considérée comme un tamis où chaque pixel correspondant à une information de type "VRAI" est assimilé à une maille non bouchée, et inversement, chaque pixel correspondant à une information de type "FAUX" est assimilé à une maille bouchée. Ainsi, par passage successif au travers de chaque tamis, seules les informations "VRAI", c'est-à-dire les lieux propices dans notre étude, passent par gravitation. L'image résultat ainsi créée contient des pixels $P(i,j)$ ne prenant que deux valeurs :

- 0 correspondant à un endroit défavorable,
- 1 correspondant à un endroit favorable.

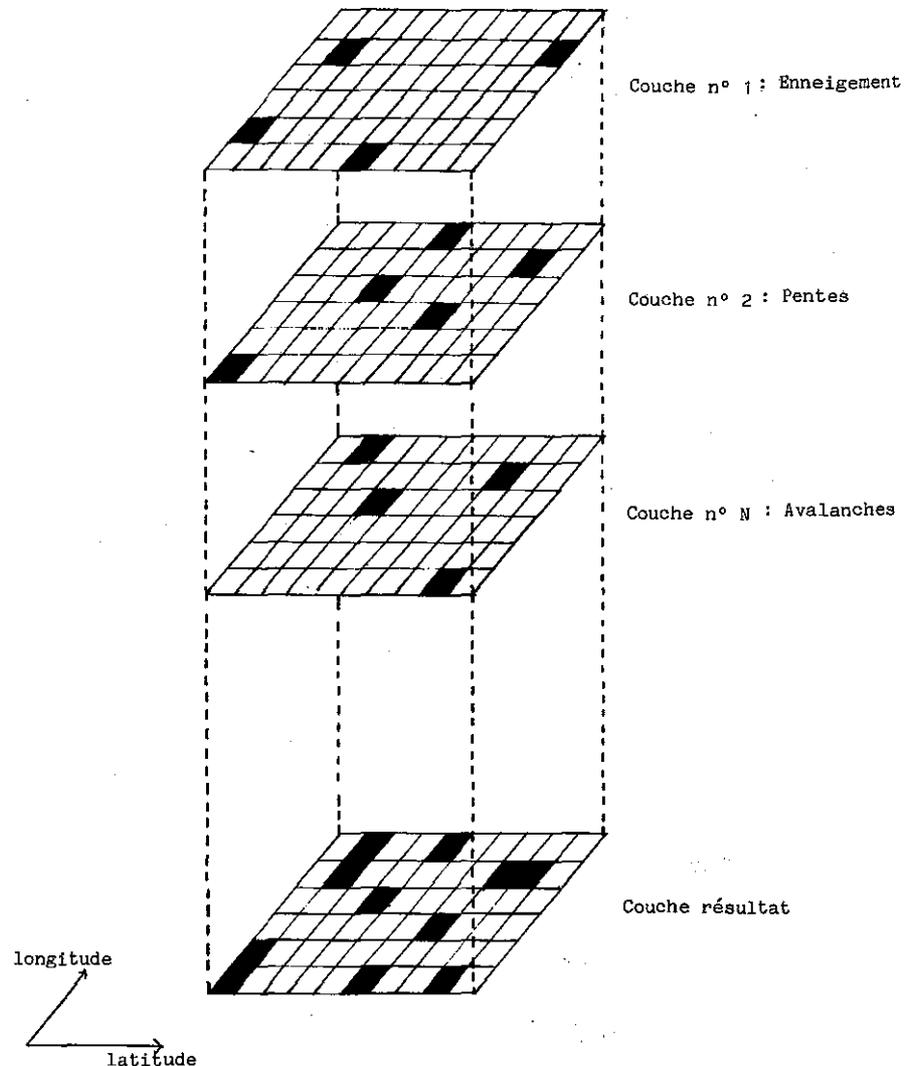


Figure 4.4 : Série de tamis à mailles bouchées ou non. Les mailles bouchées sont représentées en noir. Sur l'image résultat, il n'apparaît que les informations ayant traversé la série de tamis.

4.4 . Résultats et discussion

Les premiers résultats obtenus à la suite du traitement précédent apparaissent sur la figure 4.5. Les zones blanches sont les zones défavorables alors que les zones noires sont les zones favorables. La superposition de ce résultat avec les projets de tracé des pistes de ski montre une incompatibilité entre les projets et les conditions techniques ou de sécurité.

Toutefois certaines contraintes physiques peuvent être éliminées par l'utilisation d'aménagements artificiels tels que la mise en place de pare-avalanches ou de canons à neige. Dans le meilleur des cas, seul un des projets de liaison est viable : le projet C.

L'étude s'est poursuivie par l'examen de l'impact du projet C sur les différents indices biologiques concernant les grands ongulés. Le résultat (figs. 4.6 et 4.7) montre respectivement que ce projet se trouve au milieu d'une zone où les ongulés sont présents lorsque l'enneigement est moyen ou faible, et que, de plus, la jonction de cette zone avec d'autres zones potentielles, c'est-à-dire des zones naturelles favorables au développement des ongulés, est difficile car elle coupe des pistes déjà existantes. Ainsi, si la piste de ski est construite, les ongulés seront dérangés et migreront vers les zones périphériques du Parc National du Mercantour, zones soumises aux pressions cynégétiques.

En définitive, la seule zone d'extension compatible avec les contraintes précédemment évoquées se trouve au fond de la vallée, en continuité avec les pistes déjà existantes.

4.5 . Conclusion

La réalisation de cette étude de faisabilité permet d'énoncer la conclusion suivante :

les SIG sont parfaitement utilisables dans des études d'impact, du moins de ce type. De tels projets sont réalisables de façon rapide et interactive. La méthode de sélection ayant été choisie, il est possible et aisé de recommencer l'étude en changeant les différents seuils attribués aux thèmes.

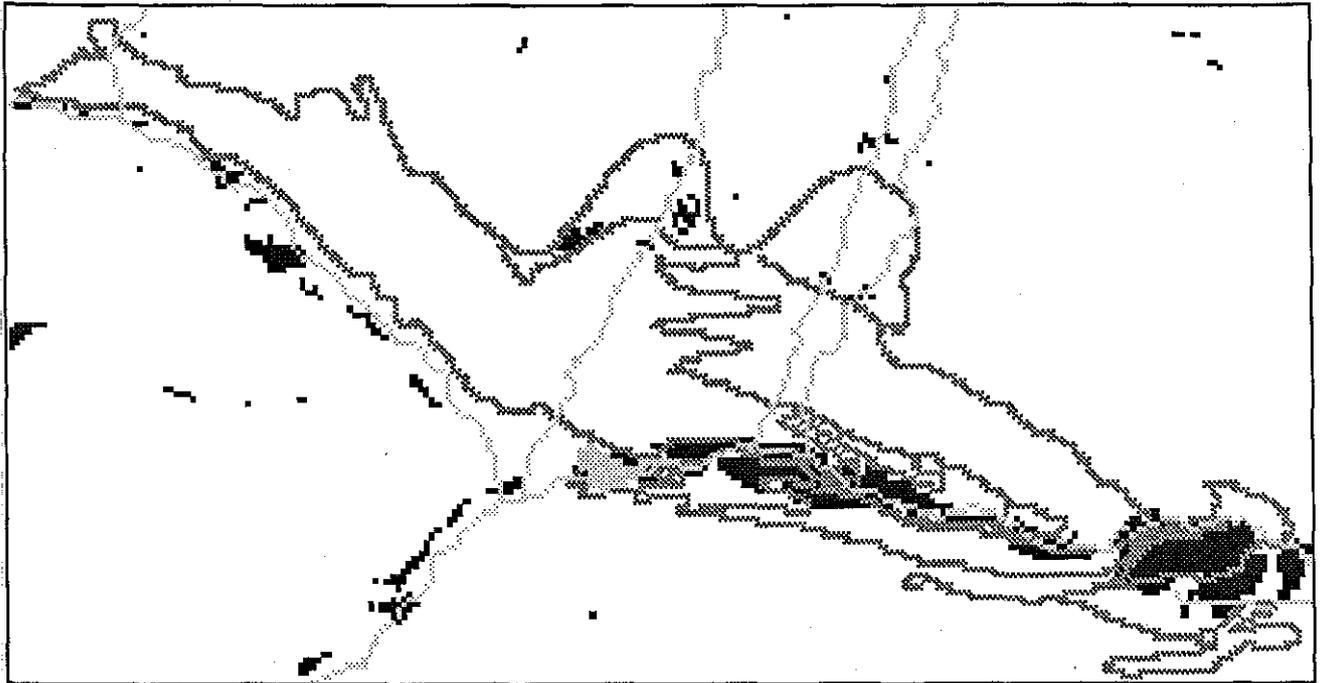


Figure 4.5 : Image résultat du traitement par série de tamis montrant les zones favorables aux pistes de ski (zones noires) et les zones défavorables (zones blanches).



Figure 4.6 : Croisement des thèmes "indice de présence pour un enneigement faible" et "tracé des pistes de ski de fond".

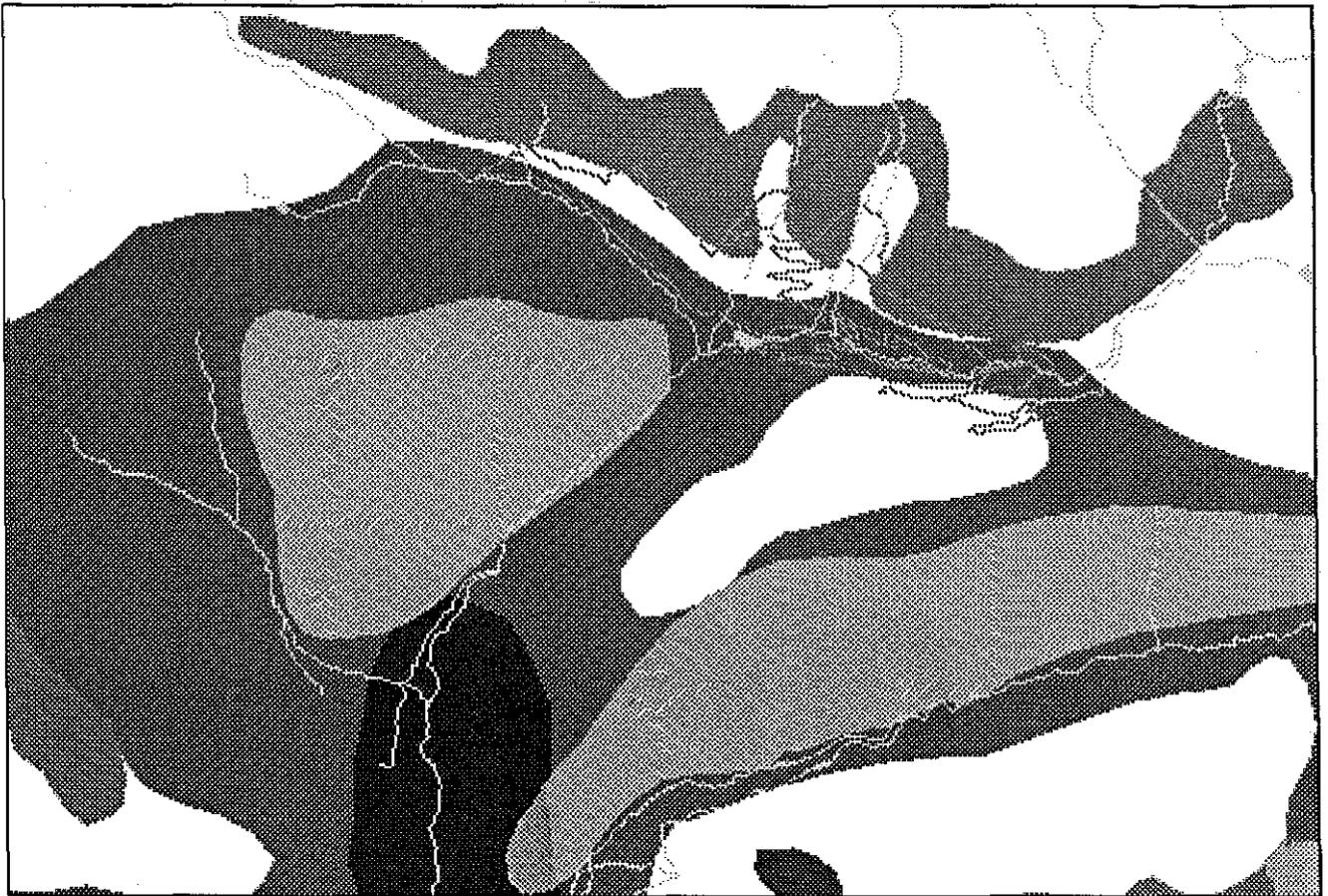
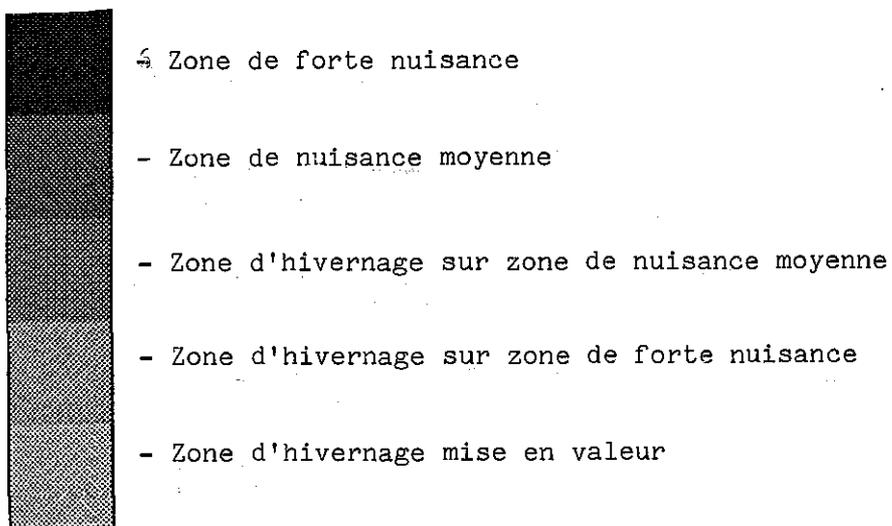


Figure 4.7 : Croisement des thèmes : "tracé des pistes de ski de fond" et "propositions d'amélioration cynégétique".



CHAPITRE 5

Un Système d'Information Géographique

pour la synthèse cartographique des peuplements benthiques

le long des côtes varoises

Dans la pensée scientifique, la méditation de
l'objet par le sujet prend toujours la forme
d'un projet.

Gaston BACHELARD.

5.1 . Introduction

Depuis plusieurs années, de nombreux scientifiques ont cartographié les peuplements benthiques de Méditerranée. Le fait que les cartes aient été établies par différentes méthodes de cartographie et pour différentes finalités (cf. annexe 2) entraîne une certaine disparité de celles-ci.

Ces cartes ont été élaborées, soit dans des projections cartographiques différentes, soit directement reproduites à partir de photographies aériennes sans correction des déformations latérales (cf. annexes 2 et 3).

Enfin, la différence de finalité des cartes a entraîné une multiplication des codes caractérisant les peuplements benthiques. Dans le cadre de ce travail, le terme "peuplements benthiques et type de fonds" correspond, soit à des biocénoses(1) telles qu'elles sont définies par Pérès et Picard (1964), soit à des ensembles de biocénoses, soit à des faciès de biocénoses.

Le but de cette étude et de la création de ce SIG est le besoin de rassembler, ainsi que de synthétiser, de nombreux documents, parfois contradictoires, afin de produire une nouvelle carte dont la fiabilité soit supérieure à celle des précédentes. Avant cette ultime étape, quelques procédures de mise en forme des informations, puis la création du SIG lui-même, ont été nécessaires.

La zone prise en compte par ce SIG est la partie marine d'un rectangle de 41 km x 18 km dont les bornes ouest et est sont respectivement les villes de La Ciotat et de Giens et ceci avec une résolution spatiale de 25 mètres (fig. 5.1). Plus précisément, les coordonnées de ce rectangle sont :

- 43°00'37" N à 43°12'11" N
- 5°32'48" E à 6°06'16" E

ou, dans la projection conique conforme Lambert zone III :

- 3086 N à 3105 N
- 861 E à 910 E

(1) : La biocénose est un ensemble d'espèces animales et végétales qui constitue une population en équilibre vis à vis des facteurs abiotiques, climatiques, édaphiques. Cette notion d'équilibre signifie que les facteurs ont une action directe sur le nombre et le comportement des espèces et que ces êtres vivants sont directement reliés entre eux.

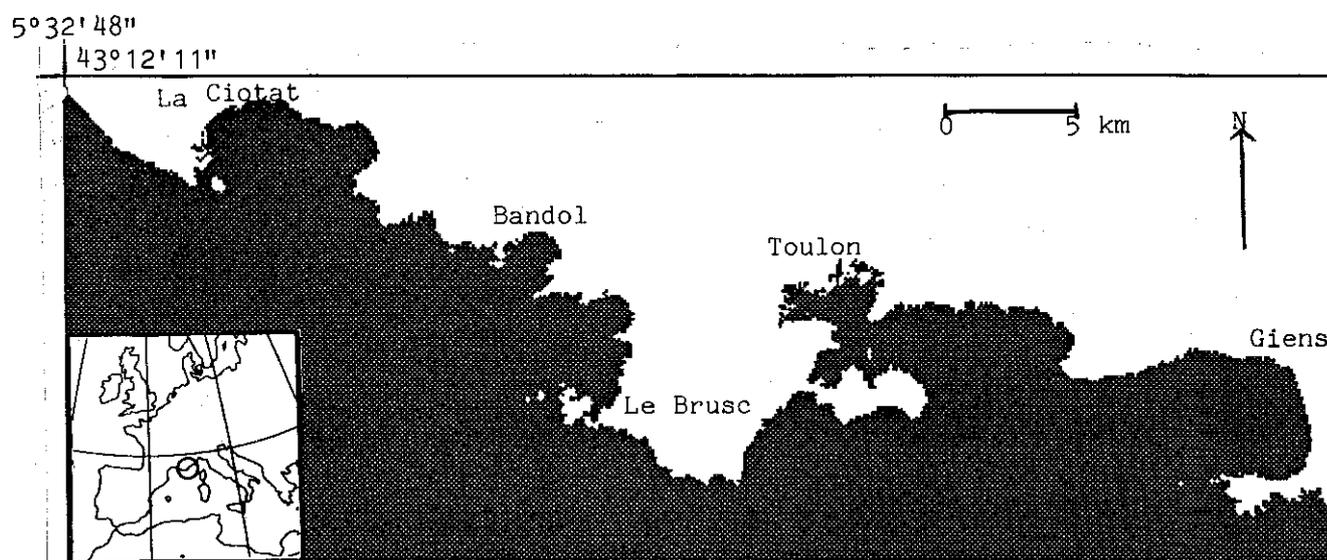


Figure 5.1 : Carte indiquant la situation géographique de la zone étudiée.

5.2 . Mise en oeuvre et réalisation du SIG

La mise en oeuvre et la réalisation de ce SIG passent par plusieurs étapes :

- recherche et synthèse préliminaire des informations,
- mise en forme préliminaire de ces données cartographiques (avec correction géométrique des erreurs importantes),
- acquisition et stockage des informations,
- rectification géométrique précise,
- création du SIG (délimitation des secteurs).

Ces différentes étapes sont succinctement développées dans ce chapitre, mais plus explicitées dans l'annexe 2.

5.2.1 . Sélection des informations

La première partie du travail a consisté à rassembler toutes les informations existant sur la zone d'étude. Celles-ci, répertoriées par Jeudy de Grissac *et al.* (1986), sont d'âges et d'échelles différents. De plus, la spécialité de leur(s) auteur(s), ainsi que les diverses techniques de prélèvements employées (photographie aérienne, observation en plongée sous-marine ou en sous-marin d'observation, sonar latéral, dragages), entraînent une diversification du point de vue de la finalité de chaque carte (biologique, géologique, etc ...).

Les cartes dont l'échelle est inférieure à 1/122 000 ou supérieure à 1/14 000 ont été écartées car, soit elles devenaient trop imprécises, soit elles se présentaient sous forme de schéma sans réelle géométrie et ne couvrant que des zones très limitées. Au total, dix-huit cartes ont été sélectionnées (cf. annexe 2).

Pour notre étude, l'échelle du 1/25 000 a été choisie car, d'une part, elle offre un bon compromis entre la précision des documents et les utilisations possibles de ce SIG, et, d'autre part, elle est compatible avec la résolution spatiale des informations provenant des satellites SPOT (20 m et 10 m de résolution) et Landsat TM (30 m de résolution) rendant celles-ci aisées à inclure dans ce SIG. Le fond de carte choisi est le 1/25 000 de l'Institut Géographique National (IGN).

Comme nous l'avons déjà mentionné antérieurement, la différence de finalité des cartes et de leur moyen d'élaboration entraîne une certaine disparité. Cette disparité se retrouve, en plus de l'échelle, dans les thèmes propres à chaque carte. Certains thèmes identiques portaient des appellations différentes, d'autres étaient beaucoup trop précis pour notre étude. De ce fait, une synthèse sur les thèmes a été effectuée afin de réduire la centaine d'appellations rencontrées (Meaille, 1986) en vingt-trois thèmes, que nous avons appelés classes (cf. annexe 2). Ces vingt-trois classes sont suffisantes pour l'étude, au stade où elle se trouve, mais la liste peut aisément être étendue afin de subvenir à une diversification des thèmes due, par exemple, à une éventuelle extension de ce SIG à toute la Méditerranée, voire plus.

5.2.2 . Intégration des informations

A ce stade d'élaboration du SIG, un problème d'échelle intrinsèque aux cartes est apparu. En effet, par comparaison avec une carte IGN au 1/25 000, il a été aisé de s'apercevoir que certaines cartes pouvaient avoir une échelle variable d'un point à l'autre. Ces erreurs, dues à des oublis de rectification géométrique (erreurs de parallaxe des photographies aériennes) ou à des fonds de carte erronés, ont été corrigées facilement pour la plupart par la méthode décrite au paragraphe 3.2. Pour les erreurs les plus importantes chaque carte fut découpée en deux sous-cartes avec partie commune, qui furent rectifiées séparément, et enfin, réassemblées pour obtenir la carte générale rectifiée.

Une fois ces corrections préliminaires achevées, la transformation des informations cartographiques en données numériques a pu s'effectuer. Elle consiste à numériser, grâce à une table à numériser, le contenu des cartes. L'échelle de la carte à numériser étant le 1/25 000 et la résolution de la table étant fixée à 1 mm, chaque pixel est équivalent à une surface de 25 m x 25 m. Le logiciel d'acquisition calcule à partir de ces données la taille de l'image en nombre de lignes et de colonnes.

Les peuplements benthiques des cartes sont assimilables à des polygones, de compte numérique différent. La technique employée pour enregistrer ces classes consiste à suivre leur contour, et à affecter à ces polygones le compte numérique de la classe leur correspondant (cf. annexe 2).

A cette étape de l'étude, les cartes sont sous forme d'images numériques sans référence à un quelconque repère cartographique. La rectification cartographique va permettre, d'une part, de corriger les déformations géométriques de chaque image, et, d'autre part, de replacer ces images dans un référentiel donné.

Le repère géométrique que nous avons choisi correspond à la projection conique conforme Lambert zone III des cartes IGN à l'échelle du 1/25 000. La rectification des images s'est faite par la méthode explicitée au paragraphe 3.2 (cf. annexe 2). Cette procédure permet de replacer l'image dans un repère connu, mais aussi de rectifier le mieux possible les données originelles. Néanmoins, nous avons constaté que, sur la plupart des images résultats, le trait de côte n'est pas identique à celui trouvé sur l'image référence. Afin de rendre ces images parfaitement superposables et pouvoir effectuer les traitements ultérieurs, le trait de côte référence a été appliqué à toutes les images. Les différences entre les deux traits de côte (carte référentielle et carte résultante de la rectification géométrique) n'excédant jamais un pixel ou deux, celles-ci ont été corrigées de façon manuelle et interactive.

Cette étape de rectification géométrique est une des plus importantes car elle permet de situer chaque carte et donc de connaître très précisément les coordonnées géographiques de chaque pixel, ce qui est important pour les traitements à venir.

5.2.3 . Mise en place du SIG

Une fois les informations de départ structurées et géographiquement référencées, il est apparu nécessaire, pour différentes raisons évoquées ultérieurement, de diviser notre zone d'étude en plusieurs secteurs contigus.

Les dimensions du rectangle contenant la zone d'étude sont de 1960 colonnes pour 760 lignes, ce qui équivaut à un nombre de 1 489 600 pixels pour une seule image, et donc environ 20 fois plus (environ 30 M-octets) pour la mise en oeuvre du SIG, car 18 cartes ont été initialement sélectionnées. Le domaine terrestre représentant environ 50% de ce rectangle, on constate que la plus grande partie des pixels sont sans information. La division en secteurs a ainsi permis de réduire au maximum ces surfaces sans information.

Un second avantage de ce partage est le fait qu'à présent chaque secteur ne dépassant pas la taille de 440 colonnes pour 360 lignes, il est compatible avec la plupart des cartes graphiques présentes sur le marché de la micro-informatique.

L'avantage le plus important réside dans le fait que la structure multi-secteurs de ce SIG lui permet de s'étendre par l'est et/ou par l'ouest. Ainsi, sa taille n'est pas rigide mais dépend seulement de l'acquisition de nouvelles informations concernant de nouveaux secteurs voisins ou non de ceux déjà existants. L'élargissement de la zone initiale de ce SIG par la création d'un huitième secteur (la zone initiale ayant été divisée en sept secteurs comme le décrit l'annexe 2), a d'ailleurs été effectué par Bartholin (1987).

Les secteurs créés, chacun a reçu les informations le concernant. Ainsi, chaque secteur est composé de n couches d'informations, n étant le nombre d'images de peuplements benthiques existant pour cette zone (cf. annexes 2 et 3).

La zone d'étude réunit à présent huit secteurs contigus mais possédant une bande de recouvrement égale à 40 pixels (1 km), comme le montre la figure 5.2. La structure finale de ce SIG peut être dite multi-couches, multi-secteurs et ouverte.

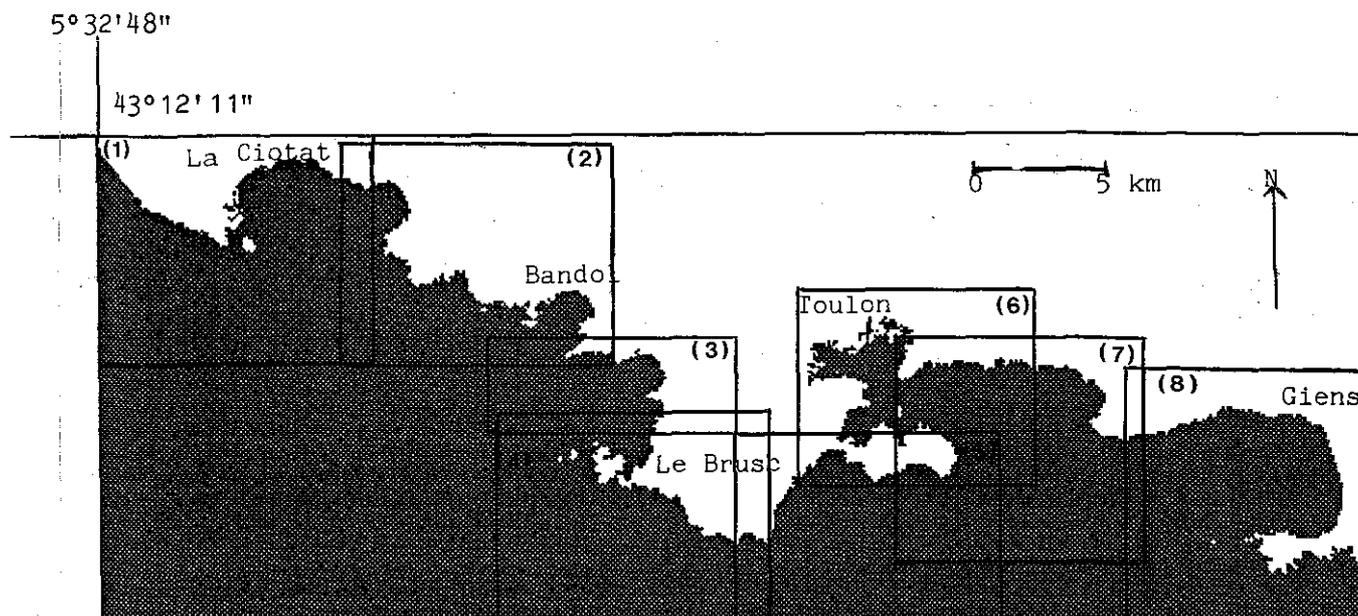


Figure 5.2 : La carte délimite les huit secteurs que nous avons créés sur la zone d'étude.

5.3 . Synthèse cartographique : méthodes

Etant données les difficultés créées par la présence d'une couche d'eau, chaque carte de peuplements benthiques est composée de points et de transects d'observation servant de base à une interpolation. Par conséquent, les modifications de peuplements entre deux cartes peuvent provenir, soit d'une réelle évolution des peuplements dans le temps, soit d'un réseau de points d'observation différents. Dans le SIG présenté ci-dessus, chaque couche est la représentation des mêmes thèmes mais vus de façon différente à chaque couche. Dans ce cas, nous pouvons considérer la cartographie des peuplements benthiques comme un processus possédant des variables régionalisées à deux dimensions (Matheron, 1970), masquant une éventuelle évolution naturelle des peuplements, et où chaque couche est la représentation de ce processus. Il est donc nécessaire de faire une synthèse raisonnée de ces cartes afin d'approcher au mieux la réalité.

Pour cela deux méthodes de synthèse ont été développées afin de synthétiser les informations réunies dans le SIG. Toutes les deux utilisent le concept de fiabilité attribuée, de façon manuelle, à chaque image ou partie d'image du SIG. La fiabilité des cartes dépend d'une part, de l'année à laquelle la carte a été acquise, et d'autre part, des techniques d'observation et de cartographie employée. Cette fiabilité est quantifiée grâce à des coefficients de fiabilité. Le calcul de ceux-ci, encore de type heuristique, a été élaboré grâce aux connaissances d'experts en ce domaine.

La première méthode utilisée calcule deux cartes complémentaires. La première : la carte de synthèse, fait apparaître en chaque pixel le peuplement benthique de plus grande fiabilité, la seconde : la carte des désaccords, fait apparaître en chaque pixel, trois types de désaccord apparus lors de la synthèse.

La seconde méthode est proche de la première en ce qui concerne le calcul de la carte de synthèse. Elle s'appuie sur des bases statistiques bien connues au CTAMN (Bossut, 1986 ; Pivaudran, communication personnelle). Cette nouvelle méthodologie fait appel à la théorie des ensembles flous ("fuzzy sets") (Zadeh, 1965 ; Kaufmann, 1977), théorie succinctement explicitée dans le prochain paragraphe. Cette méthode utilise les coefficients de fiabilité comme des plausibilités d'appartenance à un peuplement benthique considéré alors comme un ensemble flou. Cette seconde méthode calcule deux types de cartes : des cartes de synthèse et des cartes des désaccords. Les premières, comme avec la méthode précédente, sont formées en chaque pixel, de l'information la plus fiable, mais cette information peut varier avec les besoins de l'utilisateur. De même, les cartes des désaccords font apparaître en chaque pixel un code correspondant au conflit le plus important existant entre les cartes du SIG. Le nombre de codes dans une carte des désaccords dépendra alors des besoins de l'utilisateur et de sa sélection de l'information à considérer.

5.3.1 . Généralités et définitions concernant les ensembles flous

Nous tenons à avertir immédiatement le lecteur que les quelques généralités et définitions suivantes ne sont qu'une introduction à la notion d'ensemble flou au sens d'ensemble mal défini. De plus amples informations sur ce concept peuvent être trouvées par exemple dans Prade (1982) d'où les règles suivantes ont été tirées.

Un ensemble flou A sur un référentiel X (appelé aussi univers du discours) est défini par sa fonction caractéristique ou fonction d'appartenance suivante :

$$\mu_A : x \in X \longrightarrow \mu_A(x) \in [0,1]$$

où $\mu_A(x)$ est le degré d'appartenance de $x \in X$ de A , encore appelé plausibilité, et que nous appellerons dans notre cas fiabilité.

Définissons deux sous-ensembles d'un ensemble flou :

l'ensemble $\hat{A} = \{x \in X, \mu_A(x) = 1\}$ = noyau de A ,

l'ensemble $\hat{A} = \{x \in X, \mu_A(x) > 0\}$ = support de A .

Les opérations applicables aux ensembles non-flous (ou ensembles booléens) telles que la complémentation, l'union et l'intersection peuvent être étendues aux ensembles flous.

La définition d'un ensemble flou se confondant avec celle de sa fonction caractéristique μ , il suffit pour définir une opération de construire une fonction faisant passer du ou des μ d'origine à un μ final :

pour la complémentation $c / \forall x \in X, \mu_{\hat{A}}(x) = c(\mu_A(x)),$

pour l'union $u / \forall x \in X, \mu_{A \cup B}(x) = u(\mu_A(x), \mu_B(x)),$

pour l'intersection $i / \forall x \in X, \mu_{A \cap B}(x) = i(\mu_A(x), \mu_B(x)).$

Pour conserver l'appréhension intuitive de ces opérateurs, il semble indispensable de leur faire vérifier un certain nombre de propriétés (commutativité, associativité, etc...).

Parmi les familles d'opérateurs vérifiant ces contraintes, nous opterons pour la plus naturelle et la plus usitée :

$$c(a) = 1 - a.$$

$$u(a,b) = \max(a,b),$$

$$i(a,b) = \min(a,b),$$

Ce choix permet ainsi de garder la plupart des propriétés, intéressantes pour la suite de nos calculs, telles que la mutuelle distributivité des opérateurs :

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C),$$

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C),$$

par contre, les propriétés suivantes de la théorie ensembliste booléenne seront perdues :

- la loi du tiers exclu n'est plus vérifiée :

$$A \cup \overline{A} = X \text{ n'est plus vraie}$$

- la non contradiction non plus :

$$A \cap \overline{A} \neq 0 \text{ n'est plus vraie.}$$

Il n'est pas contraire à l'intuition, comme le dit Prade, qu'apparaissent des zones de chevauchements entre un ensemble flou mal défini, donc aux limites imprécises, et son complémentaire qui ne peut donc être que mal défini.

Cette théorie des ensembles flous mal définis est très intéressante pour la résolution des problèmes liés à l'attribution des fiabilités, car elle peut être associée à la notion de prédicat vague exprimé en langage naturel. De plus, la fonction d'appartenance à un ensemble flou, décrivant un prédicat vague, peut dépendre plus ou moins de l'interprétation individuelle et est donc subjective.

5.3.2 . Notion de cartes de fiabilité

La notion de fiabilité des cartes, notion que l'on peut rapprocher de celle de plausibilité d'appartenance à un taxon ou thème ou classe donné, dépend d'une part des techniques de prélèvement, mais aussi de l'année durant laquelle la carte a été façonnée. Jusqu'à présent, nous pouvons dire que l'attribution d'une fiabilité à une carte ou à une partie de carte est encore heuristique, et dépend plus de la compétence des experts que d'une recherche automatique et objective de ces fiabilités.

Les cartes de base sont d'âges différents, et établies suivant des techniques d'observation et de cartographie différentes et plus ou moins précises. Ainsi, la précision varie d'une carte à l'autre, mais aussi d'un point à l'autre d'une même carte.

Par exemple, la limite inférieure d'un herbier à *Posidonia oceanica* est plus précise lorsqu'elle est cartographiée avec un sous-marin de type "Griffon" (Meinesz et Laurent, 1982) qu'avec une série de dragages à maille lâche, et *a fortiori* lorsqu'elle résulte de photographies aériennes. D'après Boudouresque et Meinesz (1982), cette limite se situe entre 20 et 40 m de profondeur, et sur la côte varoise les fonds ne sont guère visibles, sur des photographies aériennes, au-delà de 15-20 m ; les cartes établies par photo-interprétation peuvent être relativement précises dans les petits fonds, mais sont souvent, au-delà, le résultat d'extrapolations.

Sur une carte établie par photographie aérienne, les limites des peuplements sous faible couverture d'eau sont très fiables, mais la nature des peuplements est incertaine. Le dragage permet de déterminer précisément la nature du peuplement, mais son extension spatiale est incertaine.

Par ailleurs, il est évident que, suivant l'échelle de la carte "mère", les données seront localisées plus ou moins précisément. Ainsi, les limites des biocénoses d'une carte auront un crédit moins important que d'autres provenant d'une autre carte dont l'échelle procure une plus grande précision.

Du fait des considérations précédentes, nous avons attribué un crédit ou une fiabilité à chacun des points des cartes du SIG. Pour ceci, à chaque série de cartes d'un secteur va correspondre une série de cartes jumelles appelées "cartes de fiabilité". Celles-ci sont obtenues par polygonage de zones et attribution à ces polygones d'un coefficient représentant la fiabilité de la zone. Les valeurs prises par ce coefficient sont représentées dans le tableau 5.1.

Une fois ces cartes de fiabilité élaborées, elles vont être utilisées dans les deux méthodes de synthèse cartographique présentées ci-dessous.

Coefficient de fiabilité	Signification
0	Non cartographié
4	Fiabilité nulle : limite placée de façon totalement empirique et sans aucune justification.
8	Fiabilité approximative : limite placée de façon empirique mais en fonction d'une certaine logique. Ex. : dans un secteur donné, la limite inférieure de l'herbier se situe en général entre 30 et 40 m : on a donc suivi les isobathes.
12	Fiabilité moyenne : limite placée en fonction de données concrètes ; l'imprécision vient du type de données ou du repérage.
16	Fiabilité bonne : limite placée en fonction de données concrètes ; maillage serré (1 observation/100m) ; données très précisément localisées(ex. : sonar latéral, transects balisés, photointerprétation avec correction de parallaxe).
20	Totalemment fiable : l'erreur est inférieure ou égale au pixel.

Tableau 5.1 : Ce tableau indique quelques valeurs repères des coefficients de fiabilité et leurs significations. Des valeurs intermédiaires sont utilisées pour les cas intermédiaires.

5.3.3 . Présentation de la première méthode

Pour effectuer la synthèse des cartes, nous avons examiné les valeurs prises par un même point géographique dans une série de cartes. Dans un même secteur, pour chaque pixel de coordonnées (i,j) en ligne et en colonne, on dispose de n cartes de peuplements benthiques et de n cartes de fiabilité. En chaque pixel, on compare les cartes de fiabilité, et on affecte à la carte de synthèse la valeur du pixel de la carte des peuplements benthiques jumeau du pixel de la carte de fiabilité ayant la fiabilité la plus élevée dans la série de cartes. Cette méthode ne retient donc, en chaque pixel, que l'information la plus fiable.

Le calcul de l'histogramme des classes à partir des valeurs cumulées des coefficients de fiabilité nous permet de connaître en chaque pixel la classe modale. Cette classe est comparée avec celle sélectionnée pour la carte de synthèse. La différence entre ces deux classes nous permet d'attribuer une valeur représentant le type de désaccord. Les différents types sont expliqués plus loin.

5.3.4 . Présentation de la seconde méthode

Cette méthode de synthèse des informations du SIG utilise la théorie des ensembles flous explicitée précédemment. Il résulte de ce calcul deux types de cartes nommées cartes de synthèse et cartes des désaccords. En fait, on peut créer plusieurs de ces nouvelles cartes.

Définissons tout d'abord la méthodologie suivie pour faire la synthèse. Nous avons considéré que chaque classe de peuplements benthiques déjà définie peut être assimilée à un ensemble flou A sur un référentiel X correspondant à l'ensemble des pixels d'une image, car il n'est pas certain que ces pixels appartiennent bien à une classe donnée. Ceci revient donc à attribuer aux pixels des plausibilités d'appartenance (ou fiabilité) à une classe choisie. Nous pouvons alors définir l'ensemble flou classe Cl par sa fonction caractéristique d'appartenance cl telle que :

$$cl_{Cl} : P(i,j) \text{ ----> } cl_{Cl}(P(i,j)) \in [0,1]$$

Le noyau de Cl sera donc composé des pixels d'une même classe dont la valeur est 1, i.e. des pixels dont on est sûr qu'ils appartiennent à une classe donnée. Le support de Cl sera lui composé de tous les pixels d'une même classe dont les valeurs sont supérieures à 0, i.e. des pixels dont on pense qu'ils appartiennent à une classe donnée.

La première partie de la synthèse consiste à créer l'ensemble flou général associé à chacune des 23 classes. Pour cela, on considère chaque classe de chaque carte comme un ensemble flou de cette classe, puis par union de ces ensembles, on crée un ensemble appelé ensemble flou de classe. Un ensemble flou de classe est ainsi créé pour chacune des classes. Ces premiers ensembles nous donnent l'extension maximale d'une classe ainsi que les plausibilités maximales de cette extension. On peut ainsi, à la demande, obtenir les 23 cartes de synthèse correspondant aux 23 ensembles flous de classes.

La seconde partie permet de créer la carte de synthèse finale, carte faisant apparaître pour chaque pixel, la classe dont la plausibilité d'apparition est la plus importante. Cette étape se fait par union des tous les ensembles flous de classe précédemment créés. Il est possible de passer par une étape intermédiaire qui consiste à créer un ensemble flou de groupe (un "groupe" est la réunion d'un ensemble de classes thématiquement proches - cf. annexe 2 -) correspondant à l'union des ensembles flous de classe d'un même groupe.

La création d'une ou plusieurs cartes des désaccords utilise l'opérateur intersection sur les ensembles flous (i.e. $i(a,b) = \min(a,b)$). Cette intersection de deux ensembles flous de classe nous donne un nouvel ensemble flou appelé ensemble intersection. L'intersection de deux classes nous indique ainsi les zones de conflit potentiel et le degré de ce conflit : il sera d'autant plus fort que $i(a,b)$ sera élevé. Comme pour les cartes de synthèse, il est possible de calculer les conflits entre deux groupes en utilisant les ensembles flous de groupe calculés précédemment. La création d'une carte finale des désaccords peut se faire par l'union de tout les ensembles flous intersection (qu'ils soient sur les classes ou sur les groupes). Elle montre alors en chaque point, le désaccord le plus important entre deux classes ou deux groupes.

Grâce à l'utilisation de la théorie des ensembles flous, il est possible d'avoir des informations sur une classe, un groupe, ou alors toutes les classes.

5.4 . Résultats et discussion

5.4.1 . Résultats de la première méthode

La banque de données est constituée de huit secteurs. Chacun d'eux comprend la carte de synthèse, la carte des désaccords et les différentes cartes ayant servi à élaborer les deux précédentes. Les huit secteurs étant repérés dans la projection conique conforme Lambert zone III, il est possible de les réunir afin de retrouver une vue d'ensemble (fig. 5.3).

Les cartes des désaccords quantifient, pour chaque pixel, la différence entre la classe retenue pour la carte de synthèse et la classe modale (voir paragraphe 5.3.3). Trois cas peuvent se présenter :

- les deux classes sont identiques ; la valeur 0 est portée sur la carte des désaccords,
- les classes sont distinctes mais appartiennent au même groupe ; la valeur attribuée est 10,
- les classes sont distinctes et appartiennent à des groupes différents ; la valeur attribuée est 20.

La figure 5.4 montre la carte de désaccord du secteur 1.

La carte de synthèse obtenue sur toute la zone comporte des imperfections (cf. annexe 2). Ces imperfections (zones d'herbiers de posidonies touchant au littoral ou alors des taches de "détritique côtier" isolées au milieu d'un herbier de posidonies, par exemple) sont davantage dues à un manque d'informations précises sur ces portions de secteurs qu'à la simplicité de la méthode de synthèse présentée ici. En effet, comme le montre le schéma de la figure 5.5, la présence d'imperfection de ce type est due à la superposition d'une carte à fort crédit et d'une carte plus petite du point de vue de sa taille et à crédit plus faible.

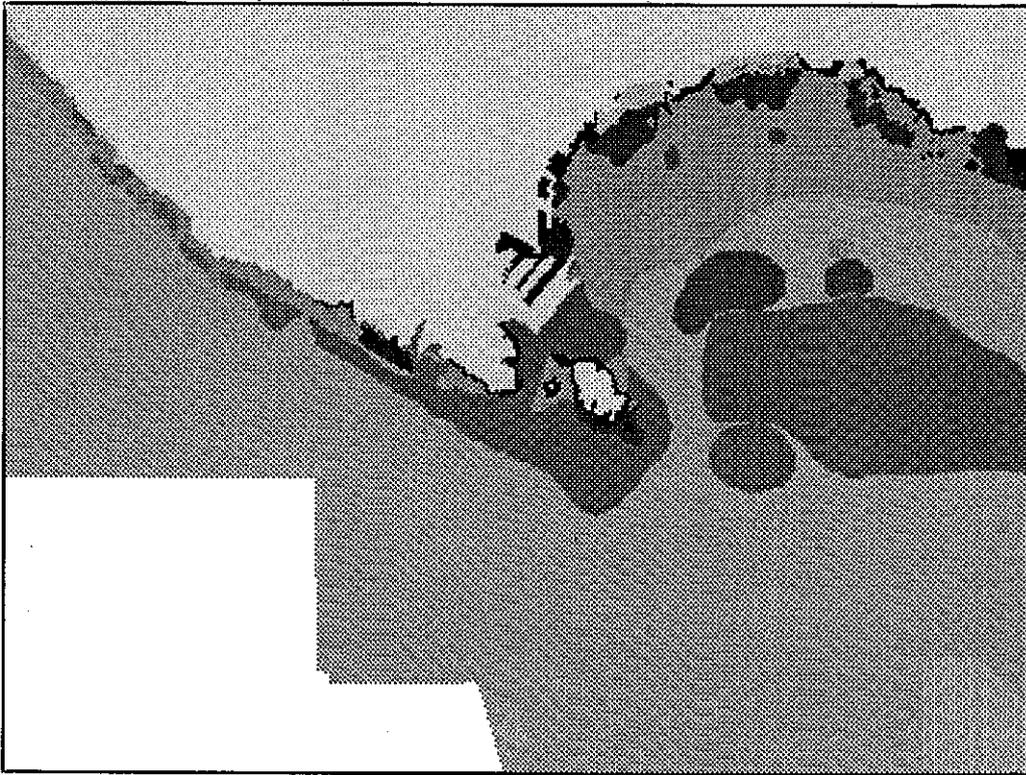


Figure 5.3 : Carte de synthèse du secteur 1 obtenue avec la première méthode.

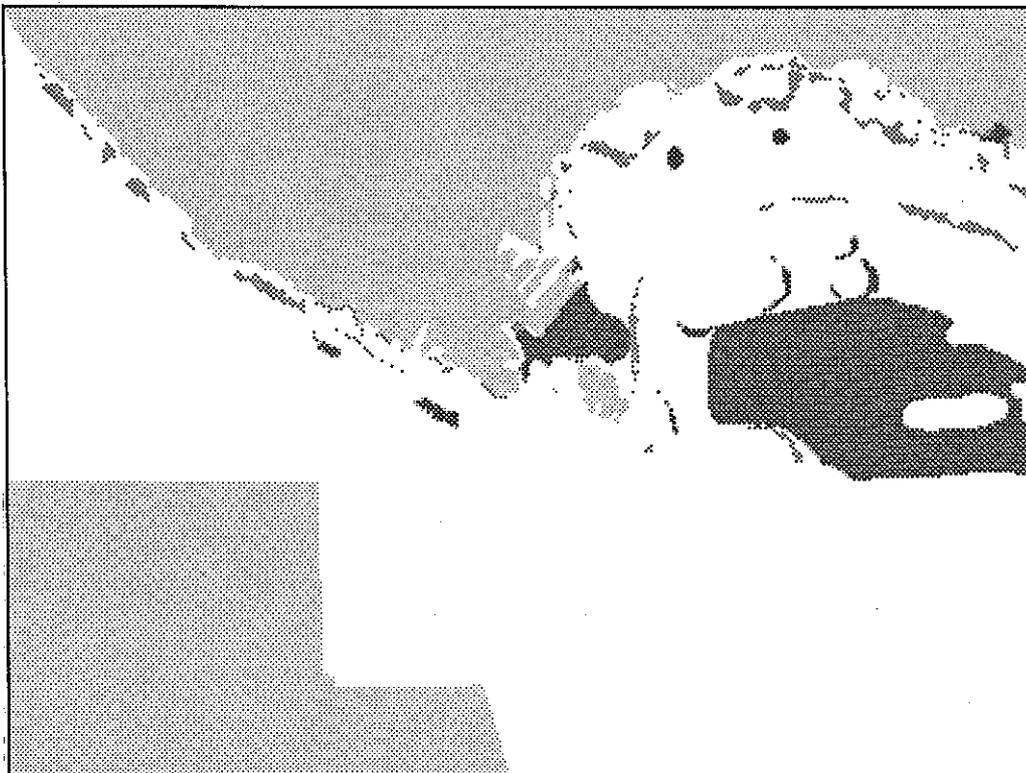


Figure 5.4 : Carte des désaccords du secteur 1 obtenue avec la première méthode.

- a)
- 0 : Zones non cartographiées par l'auteur de la carte.
 - 1 : AP. Algues photophiles.
 - 2 : APd. Algues photophiles appauvries.
 - 3 : APe. Algues photophiles sur éboulis sous-marins.
 - 10 : P. Milieux portuaires, zones fortement polluées.
 - 11 : SVMC. Sable vaseux en mode calme, sans épiflore.
 - 12 : SVMC/z. Herbier à *Zostera noltii* sur SVMC.
 - 13 : SVMC/c. Herbier à *Cymodocea nodosa* sur SVMC.
 - 20 : SFHN. Sables fins de hauts niveaux.
 - 21 : SFBC. Sables fins bien calibrés.
 - 22 : SGCF. Sables grossiers et fins graviers sous influence de courants de fond.
 - 30 : HP. Herbiers à *Posidonia oceanica* non dégradés.
 - 31 : HPD. Herbiers à *P. oceanica* dégradés.
 - 32 : MM. Mattes mortes de *Posidonia oceanica* couvertes d'algues photophiles.
 - 40 : C. Fonds caralligènes (fortement bioconcrétionnés).
 - 41 : PC. Précoralligène (faiblement bioconcrétionné).
 - 50 : DC. Détritique côtier.
 - 51 : DC/c. Détritique côtier plus ou moins concrétionné.
 - 52 : DC/p. Détritique côtier à Peyssonéaliacées libres.
 - 53 : DC/m. Détritique côtier avec maërl ou pralines.
 - 54 : DC/i. Détritique côtier avec faciès d'instabilité.
 - 60 : DE. Détritique envasé.
 - 70 : VTC. Vases terrigènes côtières.
 - 80 : DL. Détritique du large.
 - 250 : Côte. Littoral et terres émergées.

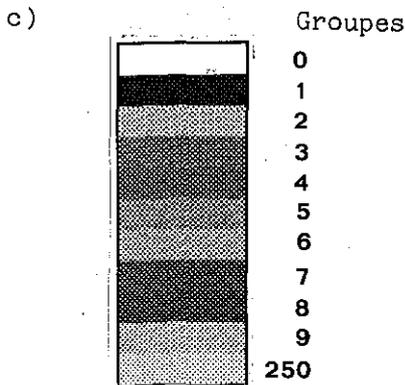
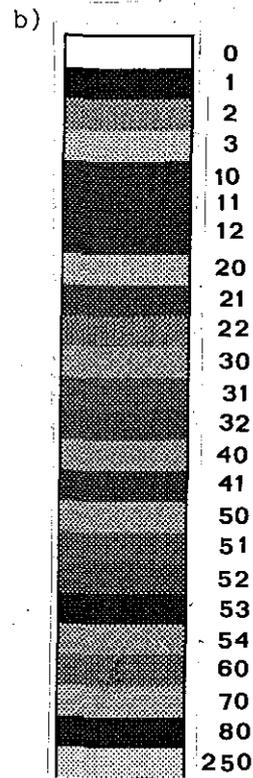


Tableau 5.0 : a) Codes chiffrés décrivant les vingt-trois classes de peuplements benthiques ; b) légende des figures 5.3 et 5.5 ; c) légende de la figure 5.7.

- a)
- 0 : Zones non cartographiées par l'auteur de la carte.
 - 1 : AP. Algues photophiles.
 - 2 : APd, Algues photophiles appauvries.
 - 3 : APe. Algues photophiles sur éboulis sous-marins.
 - 10 : P. Milieux portuaires, zones fortement polluées.
 - 11 : SVMC. Sable vaseux en mode calme, sans épiflore.
 - 12 : SVMC/z. Herbier à *Zostera noltii* sur SVMC.
 - 13 : SVMC/c. Herbier à *Cymodocea nodosa* sur SVMC.
 - 20 : SFHN. Sables fins de hauts niveaux.
 - 21 : SFBC. Sables fins bien calibrés.
 - 22 : SGCF. Sables grossiers et fins graviers sous influence de courants de fond.
 - 30 : HP. Herbiers à *Posidonia oceanica* non dégradés.
 - 31 : HPD. Herbiers à *P. oceanica* dégradés.
 - 32 : MM. Mattes mortes de *Posidonia oceanica* couvertes d'algues photophiles.
 - 40 : C. Fonds caralligènes (fortement bioconcrétionnés).
 - 41 : PC. Précoralligène (faiblement bioconcrétionné).
 - 50 : DC. Détritique côtier.
 - 51 : DC/c. Détritique côtier plus ou moins concrétionné.
 - 52 : DC/p. Détritique côtier à Peyssonéaliacées libres.
 - 53 : DC/m. Détritique côtier avec maërl ou pralines.
 - 54 : DC/f. Détritique côtier avec faciès d'instabilité.
 - 60 : DE. Détritique envasé.
 - 70 : VTC. Vases terrigènes côtières.
 - 80 : DL. Détritique du large.
 - 250 : Côte. Littoral et terres émergées.

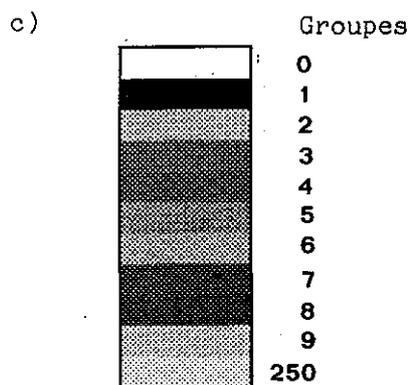
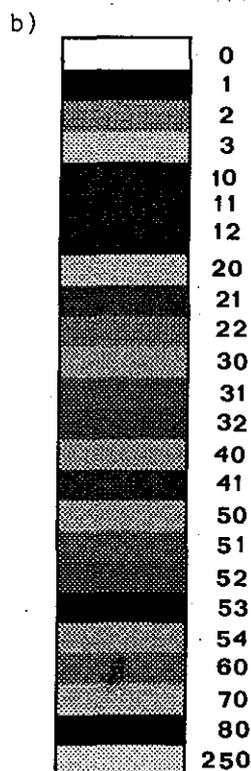


Tableau 5.0 : a) Codes chiffrés décrivant les vingt-trois classes de peuplements benthiques ; b) légende des figures 5.3 et 5.5 ; c) légende de la figure 5.7.

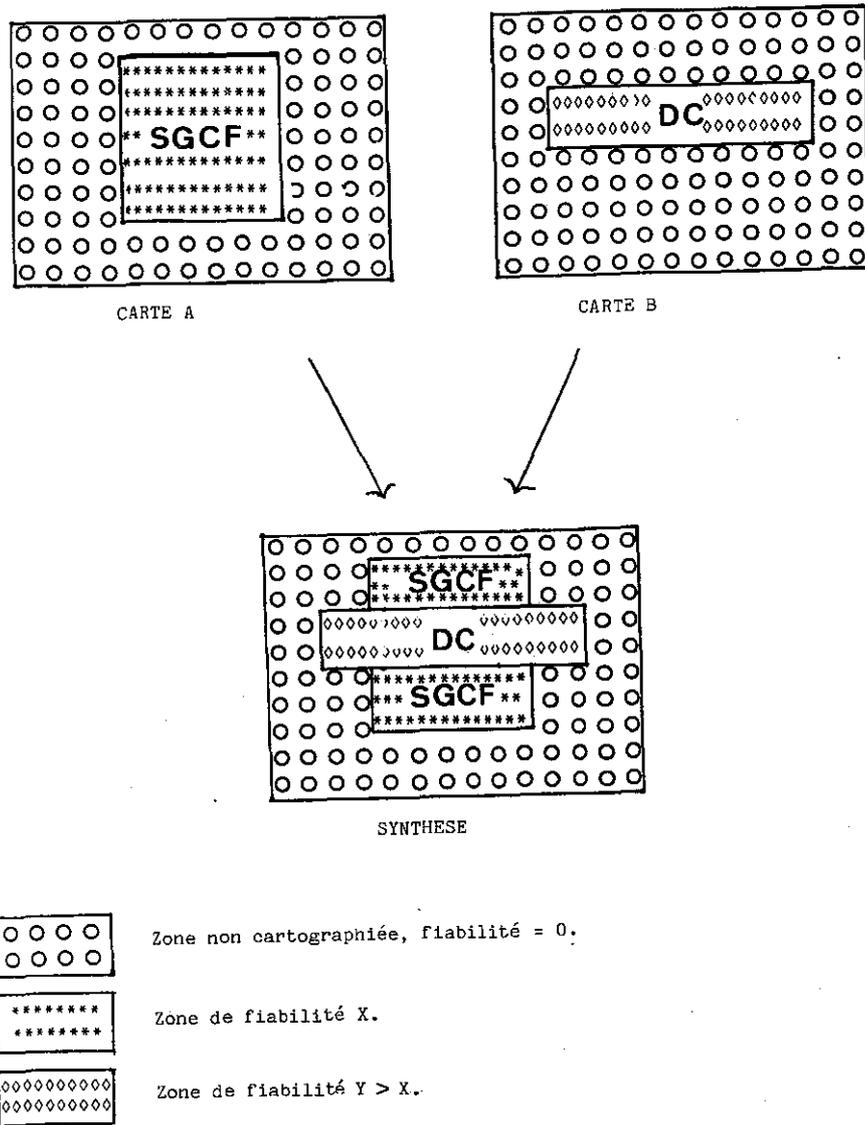


Figure 5.5 : Schéma montrant comment se produisent des aberrations dans la carte de synthèse à cause de la disparité de la zone couverte par chaque carte. Celle présentée ici est due à la superposition d'une carte à fort crédit, où la bande littorale cartographiée en "DC" est étroite et n'inclut que partiellement une zone de "SGCF" située plus au large et cartographiée sur une autre carte de crédit inférieur.

5.4.2 . Résultats de la seconde méthode

Comme nous l'avons souligné au paragraphe 2.3.4, les résultats obtenus avec cette méthode sont de deux types : des cartes de synthèse et des cartes des désaccords.

Les cartes de synthèse obtenues sont constituées, en chaque pixel, des thèmes(2) ayant la fiabilité maximale. Grâce au formalisme de cette méthode, on peut sélectionner au choix des cartes de synthèse faisant apparaître une ou plusieurs classes, un ou plusieurs groupes, un mélange de groupes et de classes. Les deux cartes présentées ici correspondent à la carte de synthèse sur les vingt-trois classes (fig. 5.6) et la carte de synthèse sur les neuf groupes (fig. 5.7). La précision des deux cartes est bien entendue différente. En effet, les groupes étant des réunions de classes, il n'existe que neuf types d'informations différentes.

Les cartes des désaccords obtenues par cette méthode montre d'une part, le désaccord le plus important (du point de vue des fiabilités) et, d'autre part le type de désaccord, i.e. les deux thèmes en compétition. Si l'on désirait construire une carte par intersection possible entre deux thèmes, le nombre serait, soit de 253 cartes différentes si l'on prend en compte les classes, soit de 36 cartes différentes si l'on prend en compte les groupes. Néanmoins certaines de ces cartes ne traduiraient que le fait évident qu'il n'y a pas de conflit. C'est par exemple le cas de l'intersection de la classe des Algues Photophiles et de la classe du Détritique du Large, car leur localisation est très différente. Le nombre de cartes des désaccords possibles étant élevé, il est intéressant de réunir les informations contenues dans chacune d'elles. Les figures 5.8 et 5.9 montrent respectivement les cartes des désaccords entre toutes les classes et tous les groupes. Ces deux cartes ont été créées respectivement par la réunion des 253 et des 36 cartes précédemment citées. Celles-ci font apparaître en chaque pixel, un code représentant le type du conflit, type explicité dans le tableau 5.2. Par exemple, sur la première carte (les classes) la valeur 1 correspondra à un conflit entre la classe des Algues Photophiles et la classe des Algues Photophiles appauvries, alors que sur la seconde carte (les groupes), cette valeur correspondra à un conflit entre le groupe des Algues Photophiles et le groupe des Milieux Portuaires ou Pollués.

Il est également possible de construire, parallèlement à ces cartes des désaccords, des cartes quantifiant le désaccord ce qui permet de voir quelles sont les zones où le désaccord est le plus grand. Dans cet objectif, il est intéressant de souligner que les cartes présentées par les figures 5.8 et 5.9 montrent des désaccords même très petits, et que d'autres cartes peuvent être calculées en donnant un seuil de significativité au désaccord.

(2) : le terme "thème" est ici considéré soit comme une classe, soit comme un groupe.

(a)

CODE D'INTERSECTION DES CLASSES DEUX A DEUX

Compte numérique Type d'intersection

1	1 <----> 2	53	3 <----> 13	105	6 <----> 11	157	9 <----> 18	209	14 <----> 15
2	1 <----> 3	54	3 <----> 14	106	6 <----> 12	158	9 <----> 19	210	14 <----> 16
3	1 <----> 4	55	3 <----> 15	107	6 <----> 13	159	9 <----> 20	211	14 <----> 17
4	1 <----> 5	56	3 <----> 16	108	6 <----> 14	160	9 <----> 21	212	14 <----> 18
5	1 <----> 6	57	3 <----> 17	109	6 <----> 15	161	9 <----> 22	213	14 <----> 19
6	1 <----> 7	58	3 <----> 18	110	6 <----> 16	162	9 <----> 23	214	14 <----> 20
7	1 <----> 8	59	3 <----> 19	111	6 <----> 17	163	10 <----> 11	215	14 <----> 21
8	1 <----> 9	60	3 <----> 20	112	6 <----> 18	164	10 <----> 12	216	14 <----> 22
9	1 <----> 10	61	3 <----> 21	113	6 <----> 19	165	10 <----> 13	217	14 <----> 23
10	1 <----> 11	62	3 <----> 22	114	6 <----> 20	166	10 <----> 14	218	15 <----> 16
11	1 <----> 12	63	3 <----> 23	115	6 <----> 21	167	10 <----> 15	219	15 <----> 17
12	1 <----> 13	64	4 <----> 5	116	6 <----> 22	168	10 <----> 16	220	15 <----> 18
13	1 <----> 14	65	4 <----> 6	117	6 <----> 23	169	10 <----> 17	221	15 <----> 19
14	1 <----> 15	66	4 <----> 7	118	7 <----> 8	170	10 <----> 18	222	15 <----> 20
15	1 <----> 16	67	4 <----> 8	119	7 <----> 9	171	10 <----> 19	223	15 <----> 21
16	1 <----> 17	68	4 <----> 9	120	7 <----> 10	172	10 <----> 20	224	15 <----> 22
17	1 <----> 18	69	4 <----> 10	121	7 <----> 11	173	10 <----> 21	225	15 <----> 23
18	1 <----> 19	70	4 <----> 11	122	7 <----> 12	174	10 <----> 22	226	16 <----> 17
19	1 <----> 20	71	4 <----> 12	123	7 <----> 13	175	10 <----> 23	227	16 <----> 18
20	1 <----> 21	72	4 <----> 13	124	7 <----> 14	176	11 <----> 12	228	16 <----> 19
21	1 <----> 22	73	4 <----> 14	125	7 <----> 15	177	11 <----> 13	229	16 <----> 20
22	1 <----> 23	74	4 <----> 15	126	7 <----> 16	178	11 <----> 14	230	16 <----> 21
23	2 <----> 3	75	4 <----> 16	127	7 <----> 17	179	11 <----> 15	231	16 <----> 22
24	2 <----> 4	76	4 <----> 17	128	7 <----> 18	180	11 <----> 16	232	16 <----> 23
25	2 <----> 5	77	4 <----> 18	129	7 <----> 19	181	11 <----> 17	233	17 <----> 18
26	2 <----> 6	78	4 <----> 19	130	7 <----> 20	182	11 <----> 18	234	17 <----> 19
27	2 <----> 7	79	4 <----> 20	131	7 <----> 21	183	11 <----> 19	235	17 <----> 20
28	2 <----> 8	80	4 <----> 21	132	7 <----> 22	184	11 <----> 20	236	17 <----> 21
29	2 <----> 9	81	4 <----> 22	133	7 <----> 23	185	11 <----> 21	237	17 <----> 22
30	2 <----> 10	82	4 <----> 23	134	8 <----> 9	186	11 <----> 22	238	17 <----> 23
31	2 <----> 11	83	5 <----> 6	135	8 <----> 10	187	11 <----> 23	239	18 <----> 19
32	2 <----> 12	84	5 <----> 7	136	8 <----> 11	188	12 <----> 13	240	18 <----> 20
33	2 <----> 13	85	5 <----> 8	137	8 <----> 12	189	12 <----> 14	241	18 <----> 21
34	2 <----> 14	86	5 <----> 9	138	8 <----> 13	190	12 <----> 15	242	18 <----> 22
35	2 <----> 15	87	5 <----> 10	139	8 <----> 14	191	12 <----> 16	243	18 <----> 23
36	2 <----> 16	88	5 <----> 11	140	8 <----> 15	192	12 <----> 17	244	19 <----> 20
37	2 <----> 17	89	5 <----> 12	141	8 <----> 16	193	12 <----> 18	245	19 <----> 21
38	2 <----> 18	90	5 <----> 13	142	8 <----> 17	194	12 <----> 19	246	19 <----> 22
39	2 <----> 19	91	5 <----> 14	143	8 <----> 18	195	12 <----> 20	247	19 <----> 23
40	2 <----> 20	92	5 <----> 15	144	8 <----> 19	196	12 <----> 21	248	20 <----> 21
41	2 <----> 21	93	5 <----> 16	145	8 <----> 20	197	12 <----> 22	249	20 <----> 22
42	2 <----> 22	94	5 <----> 17	146	8 <----> 21	198	12 <----> 23	250	20 <----> 23
43	2 <----> 23	95	5 <----> 18	147	8 <----> 22	199	13 <----> 14	251	21 <----> 22
44	3 <----> 4	96	5 <----> 19	148	8 <----> 23	200	13 <----> 15	252	21 <----> 23
45	3 <----> 5	97	5 <----> 20	149	9 <----> 10	201	13 <----> 16	253	22 <----> 23
46	3 <----> 6	98	5 <----> 21	150	9 <----> 11	202	13 <----> 17		
47	3 <----> 7	99	5 <----> 22	151	9 <----> 12	203	13 <----> 18		
48	3 <----> 8	100	5 <----> 23	152	9 <----> 13	204	13 <----> 19		
49	3 <----> 9	101	6 <----> 7	153	9 <----> 14	205	13 <----> 20		
50	3 <----> 10	102	6 <----> 8	154	9 <----> 15	206	13 <----> 21		
51	3 <----> 11	103	6 <----> 9	155	9 <----> 16	207	13 <----> 22		
52	3 <----> 12	104	6 <----> 10	156	9 <----> 17	208	13 <----> 23		

(b)

CODE D'INTERSECTION DES GROUPES DEUX A DEUX

Compte numérique Type d'intersection

1	1	<----->	2
2	1	<----->	3
3	1	<----->	4
4	1	<----->	5
5	1	<----->	6
6	1	<----->	7
7	1	<----->	8
8	1	<----->	9
9	2	<----->	3
10	2	<----->	4
11	2	<----->	5
12	2	<----->	6
13	2	<----->	7
14	2	<----->	8
15	2	<----->	9
16	3	<----->	4
17	3	<----->	5
18	3	<----->	6
19	3	<----->	7
20	3	<----->	8
21	3	<----->	9
22	4	<----->	5
23	4	<----->	6
24	4	<----->	7
25	4	<----->	8
26	4	<----->	9
27	5	<----->	6
28	5	<----->	7
29	5	<----->	8
30	5	<----->	9
31	6	<----->	7
32	6	<----->	8
33	6	<----->	9
34	7	<----->	8
35	7	<----->	9
36	8	<----->	9

Tableau 5.2 : Codes des types de conflit possible entre classes (a) et entre groupes (b).

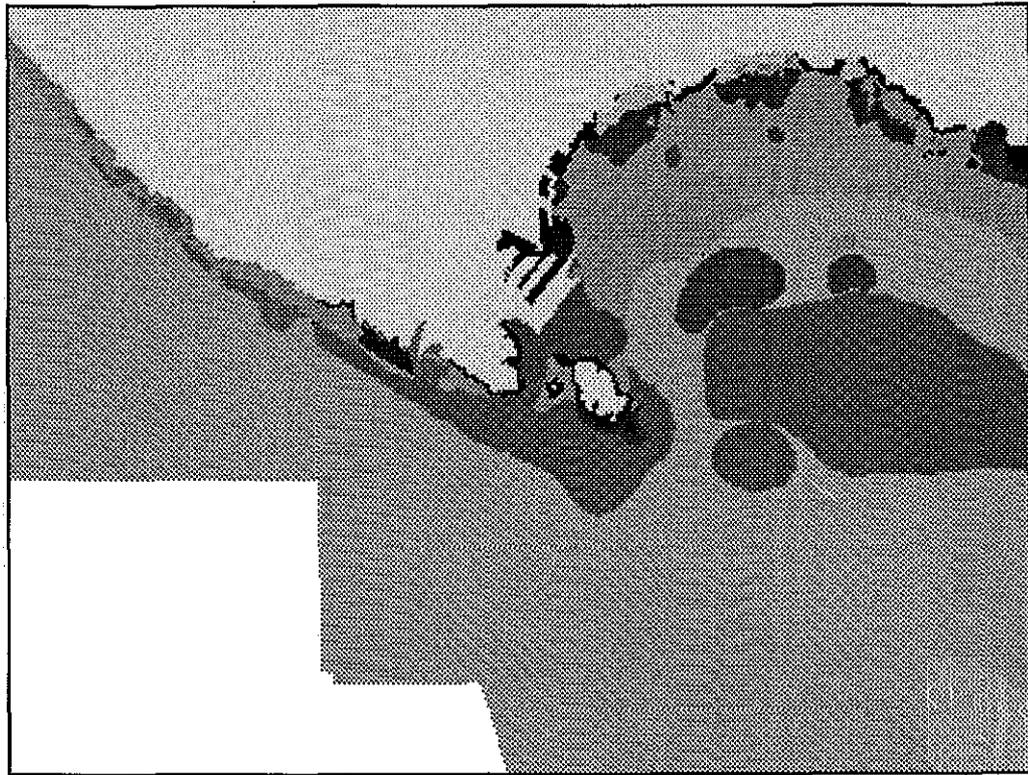


Figure 5.6 : Carte de synthèse sur les classes obtenue avec la seconde méthode.

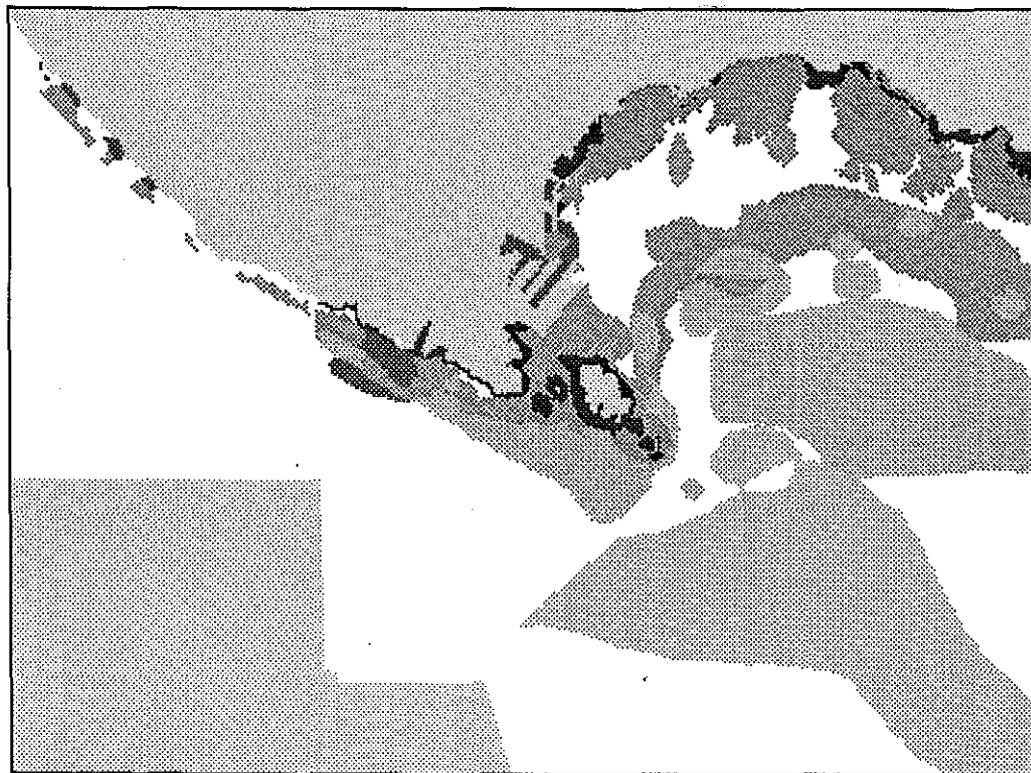


Figure 5.7 : Carte de synthèse sur les groupes obtenue avec la seconde méthode.

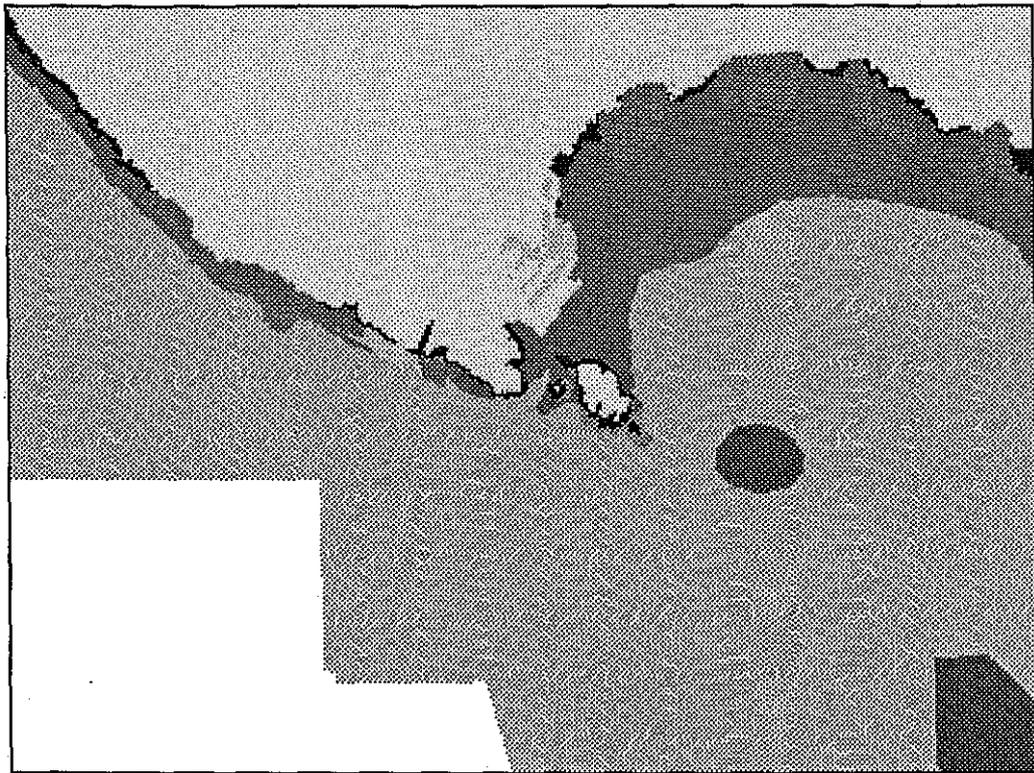


Figure 5.8 : Carte des désaccords entre les classes obtenue avec la seconde méthode.

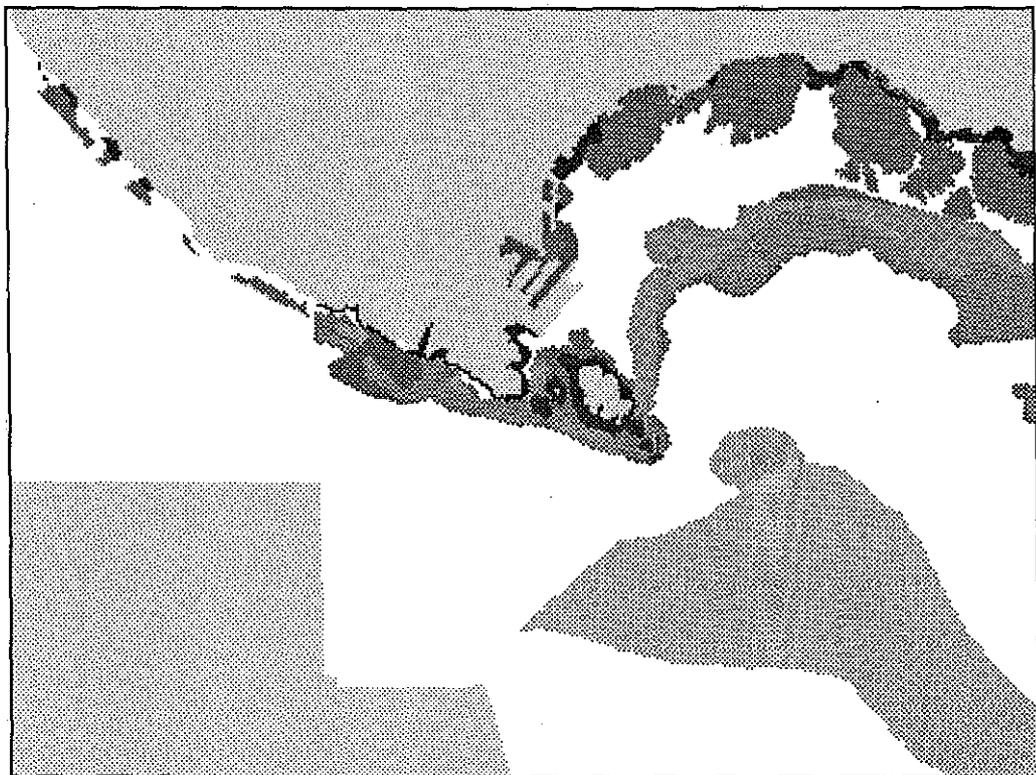


Figure 5.9 : Carte des désaccords entre les groupes obtenue avec la seconde méthode.

5.4.3 . Comparaisons des résultats obtenus par ces méthodes

En ce qui concerne la construction des cartes de synthèse, les deux méthodes proposées emploient le même mécanisme de sélection des informations ce qui conduit au même résultat, du moins du point de vue des classes. En effet, ces deux méthodes sélectionnent les thèmes dont la fiabilité est la plus importante.

Une différence à noter est le fait que la seconde méthode permet de séparer les classes une par une et ainsi de beaucoup mieux isoler et restituer l'information dans le SIG. En effet, il suffit de choisir au départ quels sont les thèmes que l'on veut étudier, et la méthode permettra de calculer une carte de synthèse spécifique aux exigences demandées.

Au contraire des cartes de synthèse, le formalisme propre à chacune des méthodes permettant d'examiner les désaccords entre couches du SIG est différent. La première méthode ne produit qu'une seule carte des désaccords sur laquelle n'apparaissent que trois types de désaccords (cf. paragraphe 5.4.1). Ce résultat est assez pauvre et ne permet pas d'extraire toutes les informations contenues dans ce SIG. De ce fait, la seconde méthode employée donne beaucoup plus d'informations sur ce désaccord. En effet il est possible de construire une carte spécifique à chacun des types de désaccord, avec, si c'est nécessaire, la prise en compte d'un seuil de significativité de ce désaccord. Ces cartes des désaccords peuvent également être élaborées par quantification du désaccord en tenant éventuellement compte du type de désaccord et d'un seuil de significativité.

5.5 . Conclusion

L'intérêt du SIG concernant les peuplements benthiques est multiple. Tout d'abord, il permet de réunir toutes les cartes pertinentes dans un même lieu et dans un format tel que les informations qu'elles contenaient soient facilement accessibles et utilisables. De par sa structure, ce SIG est facilement extensible à une zone beaucoup plus large, ce qui permettrait, par exemple, de l'étendre à toute la zone côtière méditerranéenne française.

L'aspect évolutif de ce SIG est un de ses avantages les plus importants. En effet, la cartographie des peuplements benthiques pouvant être considérée comme un processus stochastique, l'acquisition de nouvelles cartes permet d'une part de mettre à jour la carte ou les cartes de synthèse et ainsi de s'approcher de la réalité, et d'autre part de faire ressortir des évolutions spatiales et/ou temporelles sous-tendant ce processus aléatoire.

Par ailleurs, la ou les cartes des désaccords élaborées avec la seconde méthode permettent de répertorier les zones où les conflits entre les cartes d'une même zone sont importants. De ce fait, elles peuvent être un outil d'une utilité non négligeable dans la préparation de missions de cartographie à venir.

Parmi les deux méthodes de synthèse étudiées, nous pensons que la seconde est beaucoup plus pertinente du fait qu'elle permet d'extraire plus d'information de la série de cartes de chaque secteur. Néanmoins, quelque soit la méthode, l'attribution des fiabilités est encore de type heuristique. Pour pallier cette "faiblesse", il serait intéressant de construire un système-expert qui élaborerait les cartes de synthèse et les cartes des désaccords. Un tel système prendrait lui-même les décisions en se référant à une base de connaissances établie par des experts en ce domaine et comportant des assertions sur la proximité ou l'éloignement entre des peuplements différents, sur les liens entre les peuplements et les isobathes. Un tel système demanderait une étroite collaboration entre les experts et le cogniticien chargé de la mise en place et de la structuration des connaissances.

CHAPITRE 6

Apport de la télédétection à la constitution

d'un Système d'Information Géographique :

l'exemple de la région de Toulon - La Ciotat.

Ca peut être génial sans que ce soit idiot.

Jacques AUDIBERTI.

6.1 . Introduction

De nos jours, les satellites d'observation de la terre fournissent une masse importante de données concernant le milieu où nous vivons. Le traitement de ces données nous permet par la suite de rechercher l'information pertinente pour l'étude en cours parmi l'information apportée par les satellites.

Ce chapitre présente le traitement de deux scènes provenant des satellites Landsat 1 et 3. Ces deux scènes étant déjà sous forme numérique, leur intégration dans le SIG décrit dans le prochain chapitre, a été aisée. Seule une rectification géométrique a été nécessaire afin de replacer ces scènes dans la projection conique conforme Lambert zone III.

L'utilisation des différents canaux offerts par Landsat 1 et 3 nous permet de créer de nouvelles données utiles à l'étude de l'extension du milieu urbain présentée dans le prochain chapitre. Les différents traitements, présentés dans ce chapitre, se composent des étapes suivantes :

- une transformation des données de base en données en réflectance et une prise en compte simultanée des effets atmosphériques,
- une classification supervisée par table d'association biunivoque ou table de Hash,
- un isolement des différents taxons correspondant au milieu urbain,
- une transformation des taxons "urbain" en données de densité de population par pixel.

La conclusion de ce chapitre présente les raisons nous ayant conduit à utiliser des données satellitaires pour l'étude de l'évolution du milieu urbain.

6.2 . Méthode de traitement

Les informations dont nous disposons pour la réalisation de cette étude sont des données provenant des satellites Landsat 1 et Landsat 3. Ces deux satellites possèdent le même type de radiomètre, appelé MSS pour Multi-Spectral Scanner, possédant quatre bandes spectrales dont les caractéristiques sont présentées dans l'annexe 1.

6.2.1 . Adaptation des données de bases

Les deux scènes dont nous disposons sont des scènes acquises le 19 juillet 1976 et le 16 octobre 1981. Leur rectification géométrique a permis de les replacer dans la projection Lambert zone III. Du fait de la différence du mois de leur acquisition et donc, de la différence de caractéristiques optiques de l'atmosphère, les données acquises par le satellite doivent subir une correction afin de minimiser la différence des effets atmosphériques entre ces deux périodes, et ainsi rendre comparable les deux scènes.

Les données de base sont sous forme de comptes numériques qui sont reliés linéairement à la réflectance :

$$R_i = a_i N_i + b_i \quad 6.1$$

où R_i est la réflectance,
 N_i le compte numérique,
 a_i et b_i le gain et l'offset,
 i en indice est la bande spectrale utilisée.

La réflectance R_i mesuré par le radiomètre est reliée à la réflectance du sol R_{gi} par l'équation suivante :

$$R_i = (R_{Ai} + T_i R_{gi}) T_{O3i} \quad 6.2$$

où R_{Ai} est la diffusion par l'atmosphère,
 T_i est la transmittance atmosphérique de l'atmosphère sans l'ozone,
 T_{O3i} est la transmittance de l'ozone.

Ces termes ayant été déterminés (Wald, 1988), les paramètres a_i et b_i sont calculés grâce à deux objets dont on connaît bien la réflectance : la mer et les carrières. On aboutit ainsi au système d'équations 6.3 suivant :

$$\begin{cases} R_{i \text{ mer}} = a_i N_{i \text{ mer}} + b_i \\ R_{i \text{ carrière}} = a_i N_{i \text{ carrière}} + b_i \end{cases} \quad 6.3$$

Le système d'équations 6.3 nous permet ainsi de déterminer a_i et b_i et de trouver ainsi la combinaison linéaire permettant de transformer les données de base en réflectance :

$$a_i = (R_{i \text{ mer}} - R_{i \text{ carrière}}) / (N_{i \text{ mer}} - N_{i \text{ carrière}}) \quad 6.4$$

et

$$b_i = (R_{i \text{ mer}} N_{i \text{ carrière}} - R_{i \text{ carrière}} N_{i \text{ mer}}) / (N_{i \text{ carrière}} - N_{i \text{ mer}}) \quad 6.5$$

Grâce aux équations 6.4 et 6.5, on calcule les paramètres a et b pour chacun des canaux employés (les canaux sont le 4, le 5 et le 7). Ceux-ci sont présentés dans le tableau 6.1.

Bandes spectrales		MSS4	MSS5	MSS7
Gain et ordonnée à l'origine				
a_i	Juillet 76	1,28	1,32	1,23
	Octobre 81	1,12	1,02	1,65
b_i	Juillet 76	89,43	16,74	34,16
	Octobre 81	79,75	44,88	13,38

Tableau 6.1 : Gain et ordonnée à l'origine permettant la correction atmosphérique des canaux MSS 4, 5 et 7 du satellite Landsat.

6.2.2 . Classification supervisée

A partir des trois canaux corrigés de Landsat pour chaque date et d'un canal composé de polygones d'apprentissage ou polygones de vérité terrain repérant le plus précisément possible les différents taxons que l'on veut voir apparaître sur l'image finale, nous avons effectué une classification supervisée par table d'association biunivoque ou table de Hash (Maurer, 1968 ; Bossut, 1986).

On définit une table de Hash de la façon suivante :

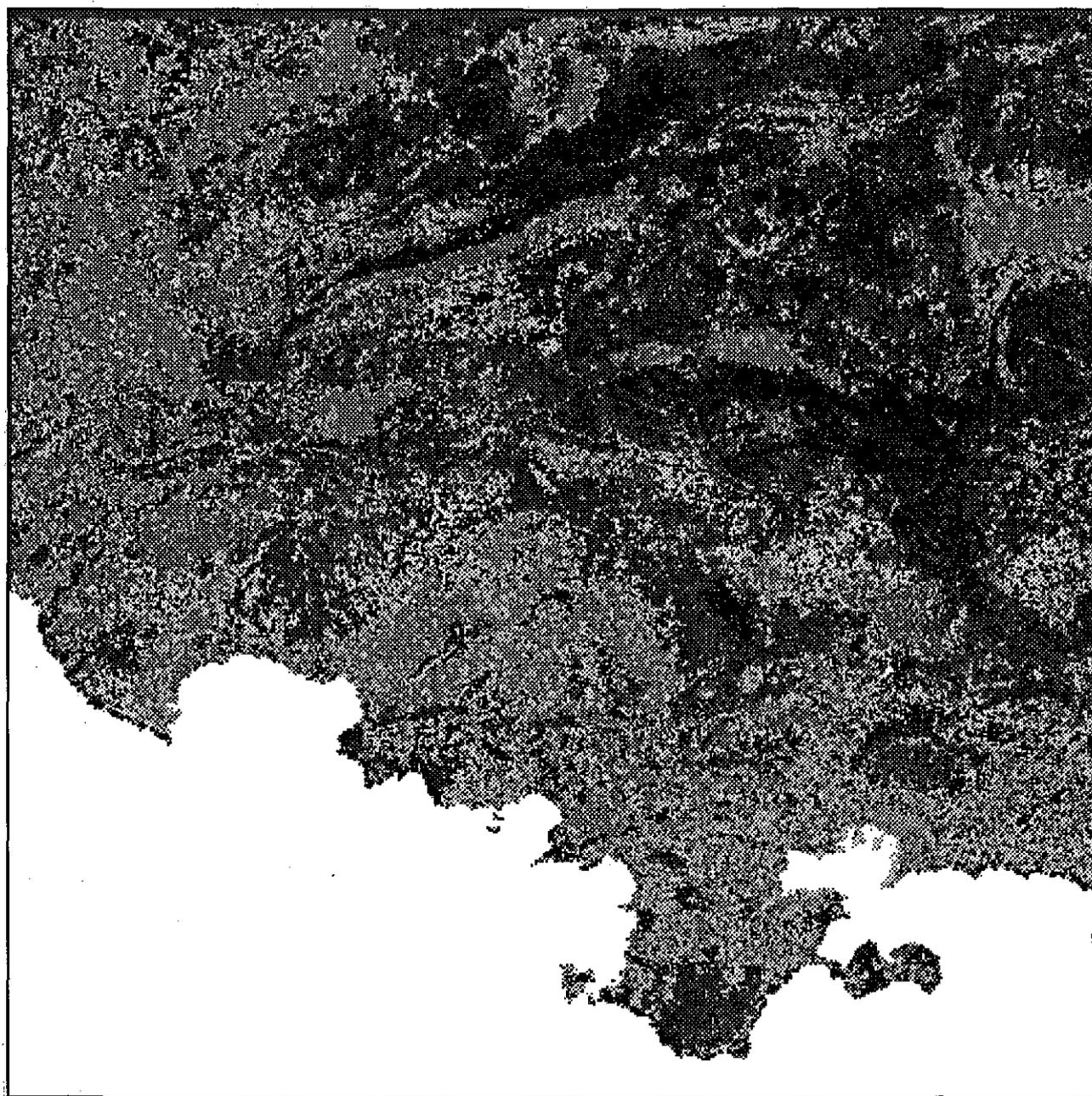
Une table d'association biunivoque est constituée par la liste exhaustive de tous les différents n -uplets rencontrés dans tout ou partie d'une image, munie d'une fonction d'accès directe à l'espace spectral.

Cette méthode a été développée par Bossut (1986) au CTAMN et reprise par Pivaudran (communication personnelle) pour les besoins de ces classifications. Cette méthode permet d'effectuer des classifications de façon interactive et rapide. De plus, plusieurs options de modélisation de la distribution statistiques des taxons sont disponibles. Pour notre part, nous avons utilisé la modélisation par ensembles flous présentée brièvement au chapitre 5. Celle-ci a été choisie car nous avons remarqué que, même après correction atmosphérique des données, les taxons que nous voulions mettre en évidence (i.e. le milieu urbain) se confondaient avec d'autres taxons.

Nous avons donc considéré chacun des taxons comme un ensemble flou. Pour un même taxon, plusieurs signatures spectrales représentées par un n -uplet (ici un triplet) existent. Pour chacun de ces triplets, une plausibilité va être calculée. Elle définit le degré d'appartenance de ce triplet au taxon considéré.

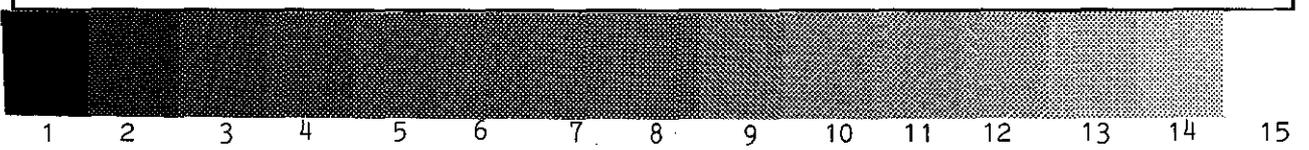
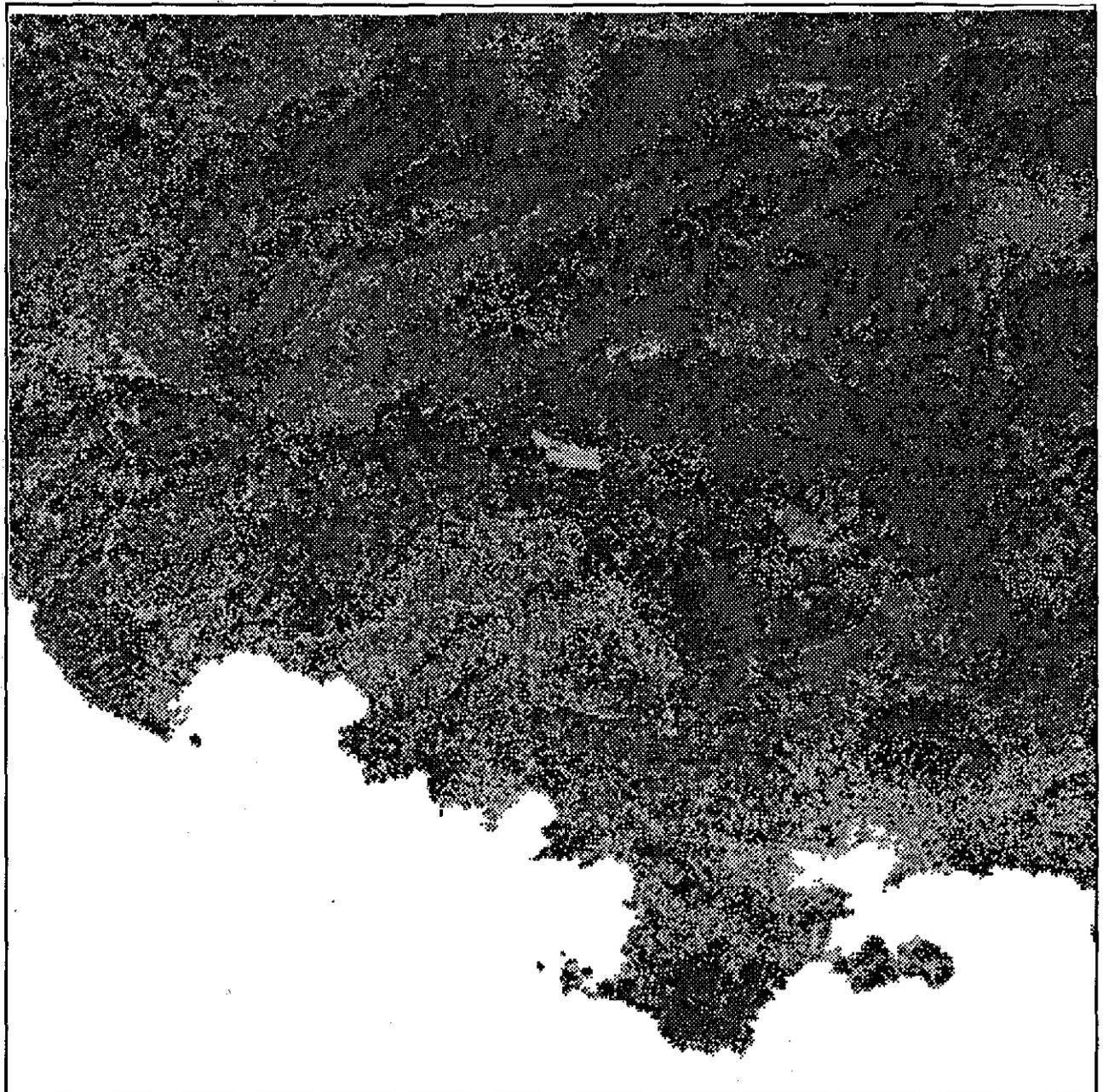
Pour une meilleur discrimination des taxons sélectionnés, nous avons effectué une classification par seuil et par résolution spectrale (i.e. niveau de discrétisation de l'espace spectral). Ainsi, à chacun des niveaux de différentiation, nous avons classifié les points dont l'appartenance au taxon considéré était la plus élevée. Ainsi, de proche en proche, la presque totalité des pixels de l'image ont été classifiés (figs. 6.1 et 6.2).

Au cours de ces classifications, nous avons remarqué que certains taxons, même avec des résolutions spectrales de plus en plus faible (96 niveaux), ne se séparaient pas de façon satisfaisante. C'est surtout le cas pour le taxon "urbain diffus" que l'on distingue difficilement du taxon "zone agricole". Ce problème de discrimination est sûrement dû au fait que les deux scènes ayant été acquises à des mois différents, la signature spectrale des taxons est différente. C'est surtout le cas pour la scène d'octobre où les taxons "urbain diffus" et "zone agricole" sont très proches. Cette situation se retrouve au niveau de l'île des Embiez où il apparaît une vaste zone d'urbain qui n'est pas en coïncidence avec la réalité.



- | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|---|---|---|---|---|---|---|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 1 : Forêt de feuillus | | | | | | | | 9 : Labours | | | | | | |
| 2 : Forêt de résineux | | | | | | | | 10 : Urbain dense | | | | | | |
| 3 : Garrigue de feuillus | | | | | | | | 11 : Urbain moyennement dense | | | | | | |
| 4 : Garrigue de résineux | | | | | | | | 12 : Urbain diffus | | | | | | |
| 5 : Sol nu | | | | | | | | 13 : Autres types d'urbain | | | | | | |
| 6 : Carrière | | | | | | | | 14 : Lande | | | | | | |
| 7 : Brûlis | | | | | | | | 15 : Mer | | | | | | |
| 8 : Zone agraire | | | | | | | | | | | | | | |

Figure 6.1 : Carte de l'occupation des sols réalisée à partir des données des trois canaux MSS 4, 5 et 7 du satellite Landsat 1 acquises le 19 juillet 1976.



- | | |
|--------------------------|-------------------------------|
| 1 : Forêt de feuillus | 9 : Labours |
| 2 : Forêt de résineux | 10 : Urbain dense |
| 3 : Garrigue de feuillus | 11 : Urbain moyennement dense |
| 4 : Garrigue de résineux | 12 : Urbain diffus |
| 5 : Sol nu | 13 : Autres types d'urbain |
| 6 : Carrière | 14 : Lande |
| 7 : Brûlis | 15 : Mer |
| 8 : Zone agraire | |

Figure 6.2 : Carte de l'occupation des sols réalisée à partir des données des trois canaux MSS 4, 5 et 7 du satellite Landsat 3 acquises le 16 octobre 1981.

6.2.3 . Utilisation de la classification

Une fois les classifications supervisées effectuées sur les données Landsat aux années 1976 et 1981, la classification de 1976 a été utilisée en vue de créer l'image initiale pour l'étude de l'évolution du milieu urbain dans la région de Toulon - La Ciotat présentée au prochain chapitre.

Ce traitement a nécessité plusieurs étapes. La première a consisté à isoler les taxons décrivant le milieu urbain : urbain dense, urbain moyennement dense, bitume ; à l'exception du taxon urbain diffus pour les raisons évoquées précédemment.

Une fois ces taxons isolés dans une nouvelle image et affectés du même compte numérique, nous avons, dans une deuxième étape, isolé les pixels de milieu urbain par commune. Pour cela, nous disposions d'une image cartographiant toutes les surfaces communales existant sur la zone de cette étude (cf. chapitre 7). Un croisement entre ces deux images permet d'attribuer à chacun des pixels d'urbain le compte numérique de la commune auquel il appartient, et par conséquent de connaître la surface du milieu urbain par commune.

La troisième étape de préparation de l'image initiale a consisté à attribuer, pour chaque commune, à chacun des pixels d'urbain la valeur de la densité de population ramenée au pixel. Pour cela, pour chaque commune la surface d'urbain a été calculée en nombre de pixels, puis, comme les données de densité de population de l'INSEE (cf. annexe 4) étaient données au km², un simple changement d'unité a permis de les ramener au pixel (80 m x 80 m). A présent, la valeur de chaque pixel correspond à la densité de population ramenée à une surface de 6400 m².

La quatrième étape permet de valider ce changement d'unité. En effet, le résultat est satisfaisant pour les communes totalement incluses dans la zone d'étude, mais souvent inacceptable pour les communes n'étant que partiellement représentées et ceci d'autant plus que le rapport entre la surface incluse sur notre zone d'étude et la surface totale de la commune diminue. Ces communes partiellement représentées sont au nombre de 24 et représentent 45,3 % du nombre total des communes. Pour ces parties de communes, en supposant la population uniformément répartie sur les pixels d'urbain, nous avons évalué la population susceptible d'appartenir à la surface apparaissant dans la zone d'étude en pondérant la population totale par cette surface puis, comme précédemment, nous avons calculé la densité de population ramenée au pixel. L'erreur d'estimation peut être élevée puisque l'hypothèse de répartition uniforme n'est pas *a priori* pleinement justifiée. Toutefois,

cette manière de faire permet de garder les territoires incomplets et ainsi de ne pas trop amputer le domaine d'étude.

La dernière étape consiste à structurer les données précédentes afin de les traiter de façon informatique. Ainsi, la valeur d'un pixel devant être un nombre entier positif inférieur ou égal à 255, les densités de population ultérieurement calculées ont été arrondies à l'entier le plus proche. L'erreur accompagnant cette manipulation n'est jamais supérieure à 10 %, ce qui paraît correct compte tenu que notre étude correspond à une première approche dans ce domaine.

Le résultat de toutes ces étapes se présentent sous forme d'une image (fig. 6.3) montrant les différentes zones d'urbain dont le compte numérique est celui de la densité de population par pixel de la commune considérée.

6.3 . Conclusion

L'intégration des données satellitaires dans un Système d'Information Géographique est assez aisée comme nous l'avons vu. De plus, les différentes informations qu'apportent ces satellites sont très utiles dans différentes études, telles que celle que nous avons présentée. Néanmoins, il est intéressant d'expliquer le bien-fondé de cette utilisation.

La résolution spatiale des données Landsat 1 et 3 étant de 80 m x 80 m, la zone d'étude est assez importante et ne nécessite pas de matériel très onéreux. L'étude de l'évolution du milieu urbain montre qu'il est possible d'utiliser les images provenant des satellites pour des études très différentes. Il aurait été intéressant de faire une étude similaire avec des données acquises grâce à un radiomètre à bord d'un avion. L'Institut Géographique National cartographie la France tout les cinq ans, grâce à des scènes aéroportées, avec une résolution de 25 m x 25 m ou moins. Néanmoins, ces données n'auraient pu être intégrées dans le SIG sans réduction au préalable de l'information, ou alors, au contraire, dilatation des informations déjà présentes dans le SIG. De plus, avec une telle résolution, la masse d'information du SIG aurait beaucoup augmenté, rendant très complexe la manipulation de ces données sur micro-ordinateur.

L'utilisation des données satellitaires avec une résolution spatiale de 80 m x 80 m pour la simulation numérique de l'évolution du milieu urbain est, à notre connaissance, la première à être effectuée. Cette étude, explicitée dans le prochain chapitre, est un premier pas vers une telle utilisation et est donc soumise à controverses. (Être contesté, c'est être constaté. Victor Hugo).

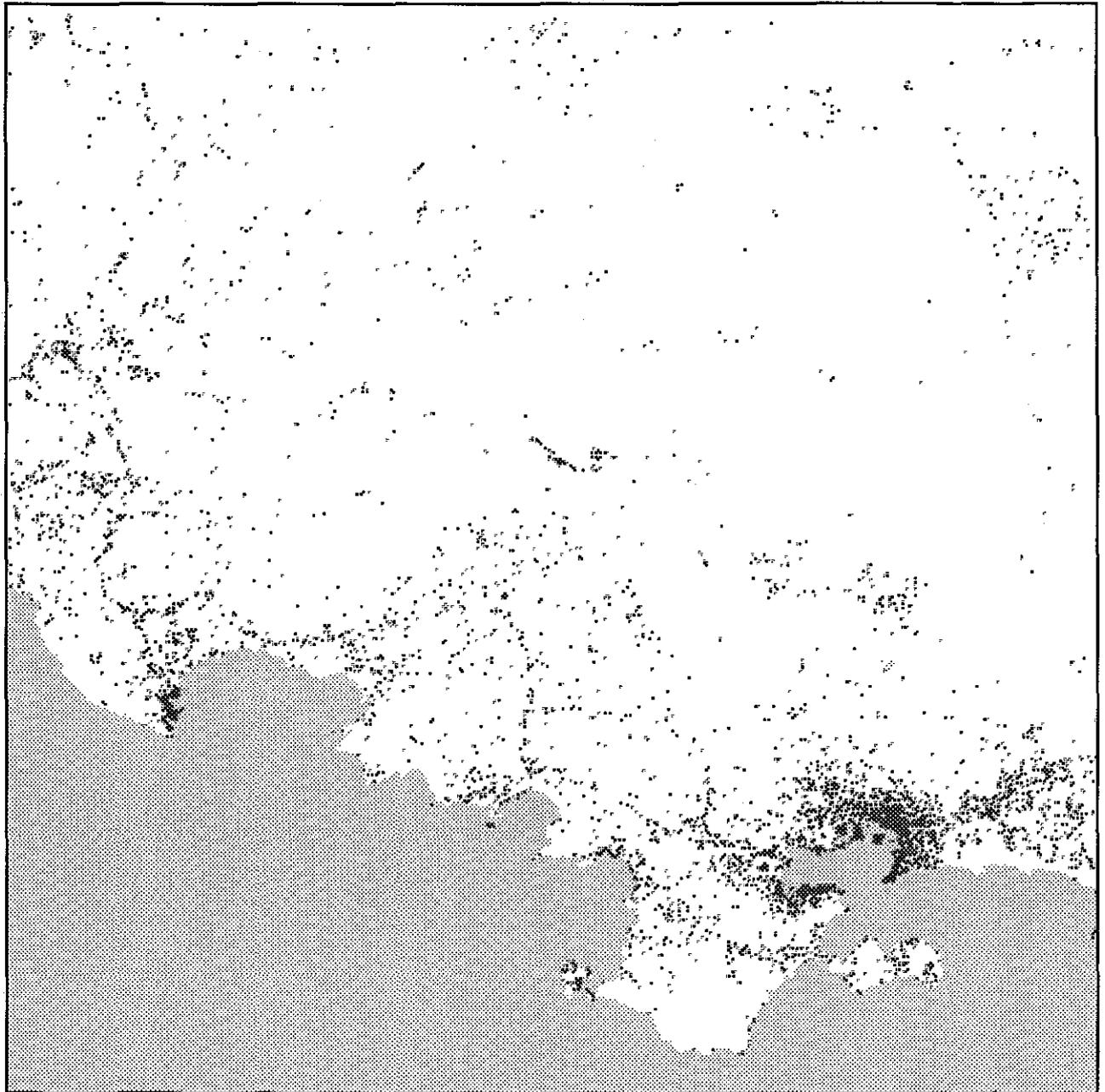


Figure 6.3 : Cette image montre les zones de milieu urbain isolées à partir de la classification de 1976 (fig. 6.1). Le compte numérique est celui de la densité de population par pixel de la commune considérée.

CHAPITRE 7

Intégration d'un Système d'Information Géographique

dans un modèle numérique d'évolution temporelle

7.1 . Introduction - Présentation de l'étude

Ce chapitre présente la démarche entreprise afin de réaliser une étude entrant dans un vaste projet : le Projet Plan Bleu. Celui-ci est par sa nature un projet d'études prospectives orienté vers l'action, dont le but est l'exploration des diverses évolutions possibles à long terme des rapports entre le développement et l'environnement au sein du Bassin Méditerranéen dans une conception globale.

Le projet Plan Bleu comporte trois phases (fig. 7.1). C'est dans la seconde phase que l'étude qui suit prend place. Ce chapitre présente donc la démarche adoptée pour l'étude prospective de l'utilisation de l'espace, ainsi que l'outil élaboré et les résultats obtenus. Cette étude a permis de créer différents scénarios à partir d'un modèle de diffusion simulant une évolution spatiale et temporelle du milieu urbain.

Pour la réalisation de cette étude, nous avons utilisé un Système d'Information Géographique couplé à un modèle numérique d'évolution temporelle.

La surface du SIG utilisée pour cette étude est comprise entre La Ciotat et Toulon (Sud-est de la France). Des informations relatives au milieu physique, au milieu biologique ainsi qu'aux activités humaines y sont réunies. Elles ont une origine soit cartographique, soit satellitaire, soit statistique.

Le modèle numérique d'évolution temporelle retenu est un modèle de diffusion de propriété. Il se compose de trois termes qui sont : un opérateur laplacien exprimant la variation spatiale de la propriété, un coefficient de diffusion quantifiant les contraintes de diffusion et un terme source correspondant à un apport exogène de propriété. Ces trois termes permettent de relier les différentes informations du SIG et le modèle d'évolution. En effet, l'opérateur laplacien sera appliqué aux données de "densité de population" ; le coefficient de diffusion sera calculé à l'aide des différents thèmes du SIG et quantifiera les contraintes ; enfin le terme source exprimera l'apport extérieur de population, apport pouvant prendre les valeurs de différents scénarios.

Dans un premier temps, ce modèle a été appliqué sans utiliser de contraintes sur une image synthétique. Ensuite, l'étude de différentes contraintes apportées par quelques thèmes du SIG relatifs au milieu physique, au domaine vivant et aux activités humaines, a permis de créer de nouvelles informations : les contraintes. Enfin, le modèle a été appliqué aux données de "densité de population" avec utilisation des contraintes et d'un terme source.

La présente étude a pour but de montrer l'évolution spatiale du milieu urbain aux deux années suivantes : 2000 et 2025. Ces résultats sont présentés et discutés en fin de chapitre.

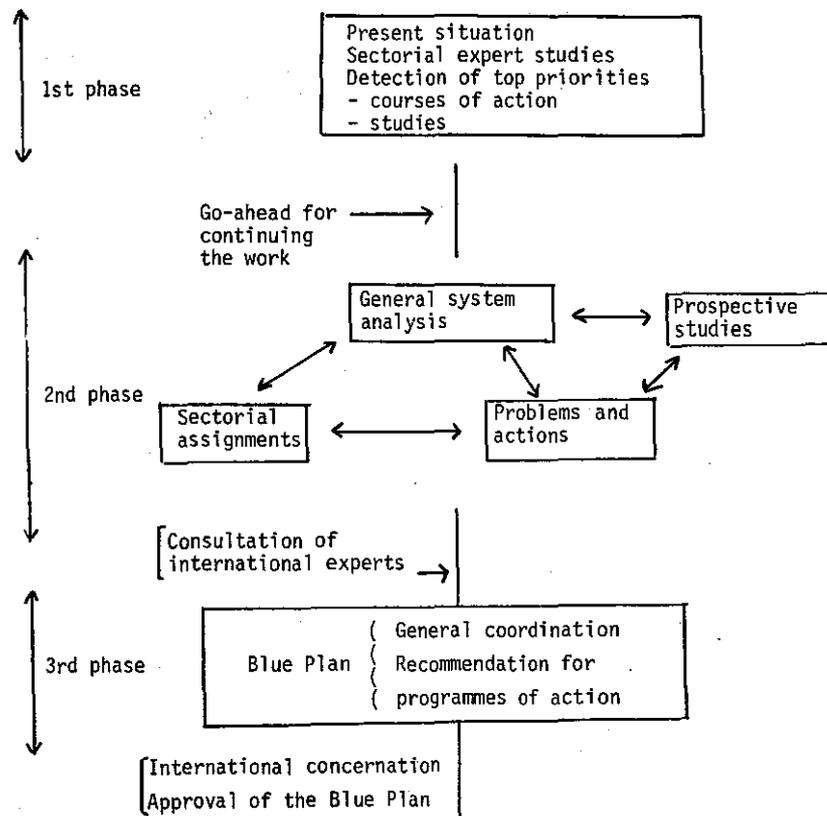


Figure 7.1 : Les trois phases du projet Plan Bleu.

7.2 . Présentation du Système d'Information Géographique utilisé

Le SIG utilisé pour cette étude couvre une surface égale à 40 km x 40 km, soit 1600 km², et s'étend en latitude du littoral à Brignoles et en longitude d'Aubagne à Brignoles. Les coordonnées géographiques exactes de ce carré sont :

- de 43°03'43" à 43°22'20" nord,
- de 5°30'40" à 6°01'07" est ,

ce qui correspond dans la projection conique conforme Lambert zone III à :

- de 3088 à 3128 nord,
- de 860 à 900 est.

La résolution spatiale de ce SIG a été fixée à 80 m pour des raisons de compatibilité avec les scènes provenant des satellites Landsat 1 et 3.

Les informations contenues dans le SIG peuvent être classées soit par leur origine, soit par leur nature.

Leur origine est quadruple. Elles proviennent :

- soit de données cartographiques numérisées : cas de la topographie, des limites administratives, du régime de propriété forestière, des formations végétales, du pouvoir de rétention en eau, du réseau routier, des secteurs détruits par le feu ainsi que des infrastructures de la Défense des Forêts Contre les Incendies (DFCI),
- soit d'informations acquises par les satellites d'observation de la Terre Landsat 1 et 3, présentées au chapitre précédent,
- soit de données statistiques telles que les chiffres du recensement général de la population de 1982 pour les départements des Bouches-du-Rhône et du Var, présentées au chapitre précédent,

- soit des informations calculées à partir de celles précédemment citées, comme les dérivés de la topographie : pentes, orientation des pentes, ensoleillement potentiel, ombres portées, les classifications supervisées élaborées à partir des données satellitaires (cf. chapitre 6), ou alors la distance aux voies de circulation calculée à partir d'un modèle de transformée en distance (Bianchi, 1988).

Leur nature est triple :

- données physiques comme la topographie et ses dérivés,
- données biologiques comme les formations végétales,
- données sociales (activités humaines) comme le réseau routier ou les limites communales.

Les informations contenues dans ce SIG sont présentées de façon exhaustive dans le tableau 7.1.

- scène Landsat 1 du 19-06-76
- scène Landsat 3 du 16-10-81
- topographie (source : carte IGN)
- classifications supervisées 1976 et 1981 à partir des données Landsat
- pouvoir de rétention en eau
- limites administratives et surfaces communales (source IGN)
- secteurs détruits par le feu
- éclosion des feux
- éclosion des feux par communes
- régimes de propriété forestière
- infrastructure de la Défense des Forêts Contre les Incendies (DFCI)
- modèle numérique de terrain - pentes
- orientation des pentes
- ensoleillement potentiel au mois de juillet
- formations végétales
- réseau routier (source IGN)
- densité de population par commune
- Plan d'Occupation des Sols (pour quatre communes seulement)

Tableau 7.1 : Liste thématique des informations contenues dans le SIG.

7.3 . Modèle numérique d'évolution

Les modèles numériques permettant de simuler l'évolution du milieu urbain sont assez nombreux. Ceux que nous avons étudiés sont succinctement explicités dans le prochain paragraphe. Néanmoins, ces modèles ont été écartés car, pour la plupart, ils utilisaient des données économiques telles que les revenus par famille, le coût des terrains, le marché de l'emploi, les activités du secteur tertiaire. De plus, les modèles économiques rencontrés ne simulaient pas une évolution spatiale, mais surtout une évolution temporelle de facteurs socio-économiques. Enfin, tout ces modèles sont pour la plupart soit des modèles micro-économiques applicables à une ville ou à un quartier, soit des modèles macro-économiques applicables à un pays entier.

Du fait de la taille de notre zone d'étude, des données employées, i.e. des sous-scènes des satellites Landsat 1 et 3, et de la résolution spatiale de cette étude, qui n'est autre que celle des scènes, 80 m x 80 m, les modèles ci-dessus ne peuvent être utilisés. Nous allons toutefois présenter ces différents modèles afin de montrer leur inaptitude dans notre étude. Le modèle que nous avons sélectionné est un modèle de diffusion de propriété et est développé dans un paragraphe prochain.

7.3.1 : Bibliographie des modèles existants

L'organisation du Plan Bleu a mis à notre disposition un rapport faisant mention de différents modèles globaux et études globales étant intervenues sur le monde méditerranéen. Ces modèles sont soit multisectoriels, soit agro-alimentaires, soit énergétiques, mais sont tous utilisables pour des zones couvrant un ou plusieurs pays. De ce fait, ces dix-sept modèles et études n'ont pas été retenus.

Parmi les méthodes que nous avons également étudiées, la plus proche de notre étude est celle employée par Dauphine *et al.* (1980). En effet, elle utilise un modèle de diffusion qui, suivant la zone rencontrée, correspond à une diffusion contigüe ou à une diffusion au hasard. Ce modèle conduit à une équation proche de celle de la théorie de l'information dont la forme est la suivante :

$$D_n(y) = \sum y_r \log 1/y_r + \sum y_r ((y_i/y_r) \log (y_r/y_i))$$

où

$D_n(y)$ est la mesure de la diffusion totale,

y_i est le pourcentage d'adoption de chaque parcelle,

y_r est le pourcentage d'adoption de chaque zone,

telle que

$$y_r = 1,0.$$

Ce modèle divise la zone d'étude en parcelles et calcule sur chaque parcelle quelques paramètres physiques jouant alors le rôle de contraintes. A chaque pas de temps une valeur d'adoption de chaque parcelle est calculée. Lorsque cette valeur dépasse un seuil, la parcelle est considérée comme urbanisée.

Ce modèle, quoiqu'intéressant, ne pouvait être appliqué à nos données. De plus, la dimension de la zone d'étude utilisant ce modèle est très restreinte avec une résolution spatiale élevée permettant de prendre en compte des facteurs très précis et localisés, facteurs inutilisables à l'échelle de notre étude.

L'étude, menée par Steinitz et Brown (1981) sur une zone de 768 km² au sud-est de Boston (Massachusetts, U.S.A.), montre le développement d'outils spécifiques pour l'assistance dans la gestion du développement des cités urbaines. Ce modèle, très complexe, utilise dix-sept paramètres de contrainte. Pour chacun de ces paramètres, un sous-modèle est utilisé et permet de simuler le devenir de ce paramètre au cours du temps. De plus, chaque sous-modèle utilise également un nombre important de paramètres. Par simplification, il n'y a pas d'interaction entre chaque sous-modèle. Les résultats de ces sous-modèles sont réunis dans le modèle principal qui calcule alors une estimation de l'extension du milieu urbain.

Nous allons à présent citer quelques modèles utilisant des données de type économique rencontrés dans la littérature. L'étude faite par Kellerman et Krakover (1986) prend en compte la distribution de la croissance de plusieurs secteurs économiques grâce à un modèle de régression polynômial capable de traiter des séries détaillées spatiales et temporelles. Cette étude a été appliquée au milieu urbain de Philadelphie (Pennsylvanie, U.S.A.).

Une autre étude menée cette fois-ci sur les cinquante-huit comtés de l'Etat de Californie a été effectuée par Ballard (1983). Elle comprend une analyse multi-régionale économique-démographique qui incorpore la construction de modèles à partir de zones à faible dimension relative à une plus grande région diversifiée. De plus cette méthode est dynamique du point de vue temporelle.

Pour sa part, Brotchie (1982) utilise dans son modèle des paramètres tels que les coûts et les bénéfices à l'intérieur d'une activité, ou alors le coût des transport, etc... Alors que Steinnes (1982) s'intéresse dans son modèle aux emplois et en déduit à partir de séries temporelles de données que ce sont les emplois qui suivent les gens (vers les zones périphériques) et non le contraire.

La méthode proposée par Allen et Sanglier (1981) utilise également comme variables les emplois et les habitants ainsi que les interactions entre ces deux variables. Pour simuler l'évolution, ils utilisent un modèle dynamique dérivé du concept de structures dissipatives permettant d'expliquer le choix de telle ou telle bifurcation prise lors de fluctuations des variables.

Différents concepts dérivés de la physique ont également été envisagés. C'est le cas du concept de percolation ou de celui proposé par Albinet *et al.* (1986) qui étudient la propagation d'un front dans un milieu aléatoire en utilisant le concept de dimension fractale.

Du fait, soit de leur complexité de mise en oeuvre (pour les concepts physiques), soit du manque de données socio-économiques (pour les modèles socio-économiques), ces modèles n'ont pas été retenus pour l'étude qui nous intéresse.

7.3.2 : Description du modèle choisi

Le modèle que nous avons sélectionné pour cette étude est un modèle de type "diffusion de propriété" pouvant être formalisé de la façon suivante :

$$C_t(t, \underline{x}) = [C_{xx}(t, \underline{x}) + C_{yy}(t, \underline{x})] K(\underline{x}) + S(t, \underline{x}) \quad 7.1$$

où

\underline{x} est le vecteur des coordonnées espace,

x et y en indice correspondent aux fonctions dérivées selon l'axe des x et des y ,

t en indice correspond à la fonction dérivée selon le temps t ,

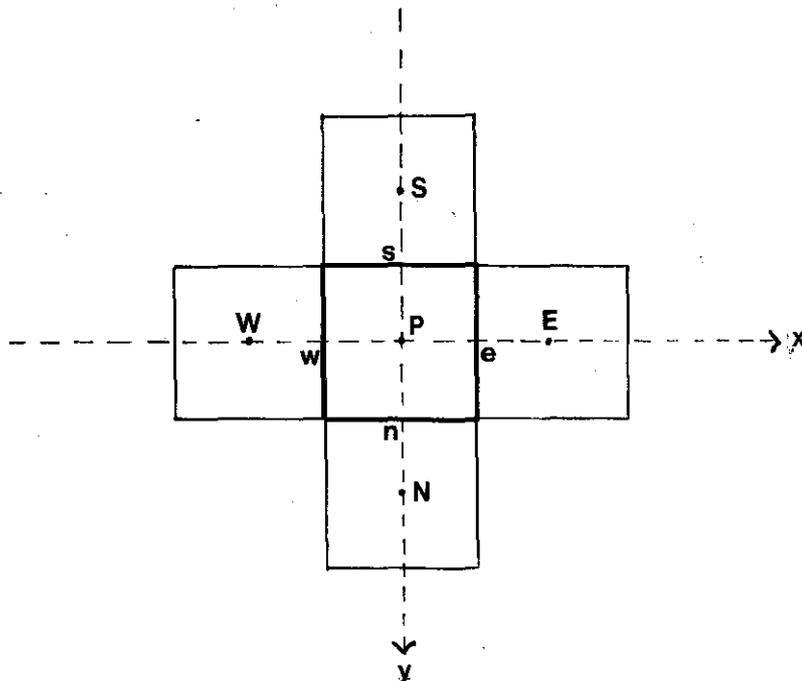
C est la densité de population par pixel,

K est le coefficient de diffusion,

S est le terme source.

Cette équation doit être résolue numériquement en chaque point de l'image E et pour chaque pas de temps. Elle est composée de trois termes : le premier correspond à la fonction de diffusion qui simule l'extension du milieu urbain (par l'intermédiaire de la densité de population par pixel) sans contraintes ; le second correspond au coefficient de diffusion qui indique les contraintes intervenant contre l'extension du milieu urbain ; enfin, le dernier terme est la fonction source qui indique le changement de population par communes et par an.

Pour résoudre numériquement l'équation 7.1, nous avons choisi d'utiliser la méthode des volumes finis. La discrétisation de 7.1 s'effectue en intégrant cette équation sur le pixel P .



où

P est le pixel central et N, S, E, W sont les 4-voisins de P,

n, s, e, w sont les frontières entre P et respectivement N, S, E, W.

L'intégration de l'équation 7.1 par rapport à x et y est :

$$\iint_{s,w}^{n,e} C_t \, dx dy = \iint_{s,w}^{n,e} K(\underline{x}) C_{xx} \, dx dy + \iint_{s,w}^{n,e} K(\underline{x}) C_{yy} \, dx dy + \iint_{s,w}^{n,e} S(t, \underline{x}) \, dx dy \quad 7.2$$

Dans un but de simplification, le terme source est posé nul. La quantité C_t est constante sur les frontières n, s, e, w et il vient :

$$\iint_{s,w}^{n,e} C_t(t, \underline{x}) \, dx dy = C_t(t, P) \delta x \delta y \quad 7.3$$

où δx et δy sont les dimensions du pixel.

Le second membre de l'équation 7.2 devient :

$$\begin{aligned} & \int_s^n K(\underline{x}) [C_x(e) - C_x(w)] \, dy + \int_w^e K(\underline{x}) [C_y(n) - C_y(s)] \, dx \\ &= \int_s^n K(\underline{x}) C_x(e) \, dy - \int_s^n K(\underline{x}) C_x(w) \, dy + \int_w^e K(\underline{x}) C_y(n) \, dx - \int_w^e K(\underline{x}) C_y(s) \, dx \\ &= K(\underline{x}) C_x(e) \delta y - K(\underline{x}) C_x(w) \delta y + K(\underline{x}) C_y(n) \delta x - K(\underline{x}) C_y(s) \delta x \end{aligned} \quad 7.4$$

L'équation 7.4 est une somme de quatre termes similaires. Pour le premier, on peut écrire :

$$K(\underline{x}) C_x(e) \delta y = K(e) C_x(e) \delta y$$

$$K(e) = [K(P) + K(E)] / 2$$

$$C_x(e) = [C(P) - C(E)] / \delta x$$

d'où

$$K(\underline{x}) C_x(e) \delta y = [K(P) + K(E)] [C(P) - C(E)] \delta y / (2 \delta x) \quad 7.5$$

On obtient des résultats similaires pour les trois autres termes. Par conséquent, il vient :

$$\begin{aligned} & [K(P) + K(E)] [C(P) - C(E)] \delta y / (2 \delta x) - [K(P) + K(W)] [C(P) - C(W)] \delta y / (2 \delta x) \\ & + [K(P) + K(N)] [C(P) - C(N)] \delta x / (2 \delta y) - [K(P) + K(S)] [C(P) - C(S)] \delta x / (2 \delta y) \end{aligned}$$

$$= (\delta y / 2 \delta x) [C(E)(K(P) + K(E)) - C(P)(K(E) + 2K(P) + K(W)) + C(W)(K(P) + K(W))] \\ + (\delta x / 2 \delta y) [C(N)(K(P) + K(N)) - C(P)(K(N) + 2K(P) + K(S)) + C(S)(K(P) + K(S))] \quad 7.6$$

L'équation 7.6 est l'équation générale discrétisée qui s'applique à tous les pixels de l'image lorsque l'on pose le terme source nul.

La dérivée temporelle s'exprimera de la façon suivante :

$$C_t(t,P) = [C^t(P) - C^{t-1}(P)] / \delta t \quad 7.7$$

Contrairement à l'équation 7.5 qui exprime une différence finie centrée, l'équation 7.7 correspond à une différence finie retardée. En effet, la différence est faite entre les densités à l'instant t , $C^t(P)$, et à l'instant précédent $t-\delta t$, $C^{t-1}(P)$. Ainsi, on simule l'évolution à l'instant présent (t) en appliquant l'équation suivante :

$$C^t(P) = C^{(t-1)}(P) \\ + (\delta y \delta t / 2 \delta x^2) [C^{t-1}(E)(K^{t-1}(P) + K^{t-1}(E)) + C^{t-1}(W)(K^{t-1}(P) + K^{t-1}(W)) \\ - C^{t-1}(P)(K^{t-1}(E) + 2K^{t-1}(P) + K^{t-1}(W))] \\ + (\delta x \delta t / 2 \delta y^2) [C^{t-1}(N)(K^{t-1}(P) + K^{t-1}(N)) + C^{t-1}(S)(K^{t-1}(P) + K^{t-1}(S)) \\ - C^{t-1}(P)(K^{t-1}(N) + 2K^{t-1}(P) + K^{t-1}(S))] \quad 7.8$$

Ici C est la concentration exprimée en nombre d'habitants par pixel. Ainsi, les coefficients de diffusion K expriment pour leur part un nombre de pixels par unité de temps ou de façon explicite l'évolution surfacique par unité de temps. Plus K est faible, plus l'évolution sera lente, le milieu opposant une forte résistance à la diffusion de l'urbain. Ces coefficients sont positifs et inférieurs ou égaux à 1.

Une image de la concentration fournit la condition initiale temporelle nécessaire à la résolution. Quant à la condition aux limites, on pose :

$$C_n^t = 0 \quad 7.9$$

où n désigne la normale à la frontière.

Cette condition s'écrira suivant le cas :

$$C_x = 0 \text{ ou } C_y = 0 \quad 7.10$$

Le système est fermé, c'est-à-dire le flux de la population à travers les limites de l'image est nul. Le flux de population en provenance (ou en partance vers) des communes situées en dehors du domaine D doit alors être simulé à l'aide du terme source.

On peut montrer alors que la masse totale de la concentration est conservée au cours du temps. La conservation s'écrit :

$$\int_D C^{t+1}(\underline{x}) d\underline{x} = \int_D C^0(\underline{x}) d\underline{x} \quad 7.11$$

ou

$$\int_D C^{t+1}(\underline{x}) d\underline{x} = \int_D C^t(\underline{x}) d\underline{x} \quad 7.12$$

or $C^{t+1}(\underline{x}) = C^t(\underline{x}) + \delta t K \Delta C^t$

d'où, si K ne dépend pas de \underline{x}

$$\int_D C^t(\underline{x}) d\underline{x} = 0 = \int_D \text{div}(\text{grad } C^t(\underline{x})) d\underline{x} \quad 7.13$$

D'après le théorème d'Ostrogradsky et si T désigne le périmètre du domaine D, $\underline{n}(\underline{x})$ la normale à T et s la coordonnée curviligne décrivant T, on obtient :

$$\begin{aligned} \int_D \text{div}(\text{grad } C^t(\underline{x})) d\underline{x} &= \int_T \text{grad } C^t(\underline{x}) \cdot \underline{n}(\underline{x}) ds \\ &= \int_T C_n^t(\underline{x}) ds \end{aligned} \quad 7.14$$

or $C_n^t = 0$, d'où la vérification de 7.10, c.q.f.d..

Ces termes étant expliquées, il faut à présent les quantifier. En ce qui concerne C, elle est exprimée par la carte de la densité de population décrite ultérieurement (cf. chapitre 6). La diffusion étant considérée comme isotrope le coefficient K sera, pour un même pixel P, le même quelque soit la direction de la diffusion. Ainsi, un coefficient de diffusion $K(\underline{x})$ sera calculé en chaque pixel, grâce aux différents thèmes du SIG utilisé, exprimant ainsi les compétitions (attractions ou répulsions) entre le développement des cités urbaines et la résistance de l'environnement. Chaque thème engendrera la carte d'un coefficient partiel

$k_i(\underline{x})$. Ce thème pourra également être pondéré en fonction de son importance vis-à-vis de l'urbanisation par un facteur a_i .

Le coefficient de diffusion final sera la moyenne pondérée conditionnée de la distribution des coefficients partiels :

$$\text{Si } \forall i, k_i \neq 0 \text{ alors } K = \frac{\sum_{i=1}^n a_i k_i}{\sum_{i=1}^n a_i}$$

$$\text{Si } \exists i \text{ tel que } k_i = 0 \text{ alors } K = 0$$

Le modèle proposé doit aussi répondre à la condition de stabilité de la discrétisation suivante :

$$\|C^{t+1}(\underline{x})\| \leq \|C^t(\underline{x})\| \quad 7.15$$

ou encore :

$$\|C^{t+1}(\underline{x})\| \leq \|C^t(\underline{x})\|$$

Ce qui donne si on replace cette inégalité dans l'équation 7.8 :

$$\delta t \leq 1/2 [\min(\delta x^2 \delta y^2 / (\delta x^2 + \delta y^2))] / \max K(\underline{x}) \quad 7.16$$

Le pas de temps dépend aussi de la variable source car la densité de population ne pouvant être négative, il faut que :

$$C^{t+1}(\underline{x}) \geq 0$$

c'est-à-dire :

$$t \leq C^t(\underline{x}) / S(t, \underline{x}) \quad 7.17$$

7.3.3 . Essai du modèle d'évolution sur une image synthétique

Dans un premier temps, nous avons testé la validité de notre modèle sur une imagerie synthétique afin d'appréhender le mode de la diffusion de propriété et vérifier le bien-fondé de ce modèle. Pour cela, nous avons créé une imagerie (fig. 7.2).

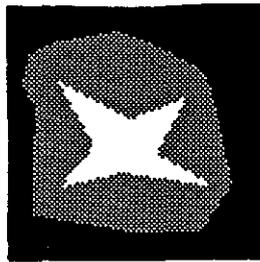


Figure 7.2 : Imagerie synthétique créée pour tester le modèle numérique. La zone blanche a pour compte numérique 99, la zone grise 50 et la zone noire 0.

Nous avons alors appliqué à cette imagerie le modèle d'évolution sans contrainte et sans source, c'est-à-dire avec :

$$K(\underline{x}) = 1$$

$$S(t, \underline{x}) = 0$$

L'équation 7.1 du modèle général devient alors :

$$C_t(t, \underline{x}) = C_{xx}(t, \underline{x}) + C_{yy}(t, \underline{x}) \quad 7.18$$

ou discrétisée :

$$\begin{aligned} C^t(P) = C^{(t-1)}(P) \\ + (\delta y \delta t / \delta x^2) [C^{t-1}(E) + C^{t-1}(W) - 2C^{t-1}(P)] \\ + (\delta x \delta t / \delta y^2) [C^{t-1}(N) + C^{t-1}(S) - 2C^{t-1}(P)] \end{aligned} \quad 7.19$$

La figure 7.3 correspond à une série de simulations à partir de l'imagette de départ. On s'aperçoit dès la seconde image que les frontières, précises sur la première image, se dégradent sous l'effet de la diffusion. De proche en proche, les frontières se transforment en plages de plus en plus larges pour parvenir, à la dernière image correspondant au résultat après cent pas de temps, à une certaine homogénéisation de toute l'imagette. Si l'on étudie les histogrammes associés à chacune des simulations (fig. 7.4), on s'aperçoit que ceux-ci tendent à s'aplanir. En effet, le premier histogramme montre trois modes (0, 50 et 99) correspondant aux trois codes de l'image initiale. Les histogrammes suivants montrent une augmentation des valeurs intermédiaires aux trois valeurs précédentes. Sur l'histogramme de la dernière imagette, les modes sont relativement peu importants du point de vue du nombre de pixels. Ceci permet de dire que la distribution tend à devenir homogène. Si les simulations se poursuivaient, l'image à l'infini serait une image homogène ayant atteint un équilibre stable.

Grâce aux histogrammes, on peut dire que sans terme source la dynamique de l'image n'a pas augmenté, i.e les valeurs sont toujours comprises entre 0 et 99. Néanmoins du fait des valeurs discrètes que peut prendre une image (ces valeurs appartiennent à l'ensemble $B = \{x \in \mathbb{N}^+ / 0 \leq x \leq 255\}$), la propriété de conservation de la masse de ce système fermé n'est que partiellement gardée. En effet, la masse totale a augmenté du fait des approximations effectuées lors du calcul du laplacien. Par conséquent, afin d'éviter ce problème, les calculs suivants ont été réalisés dans l'ensemble des réels et approximés en fin de simulation pour reformer une image.

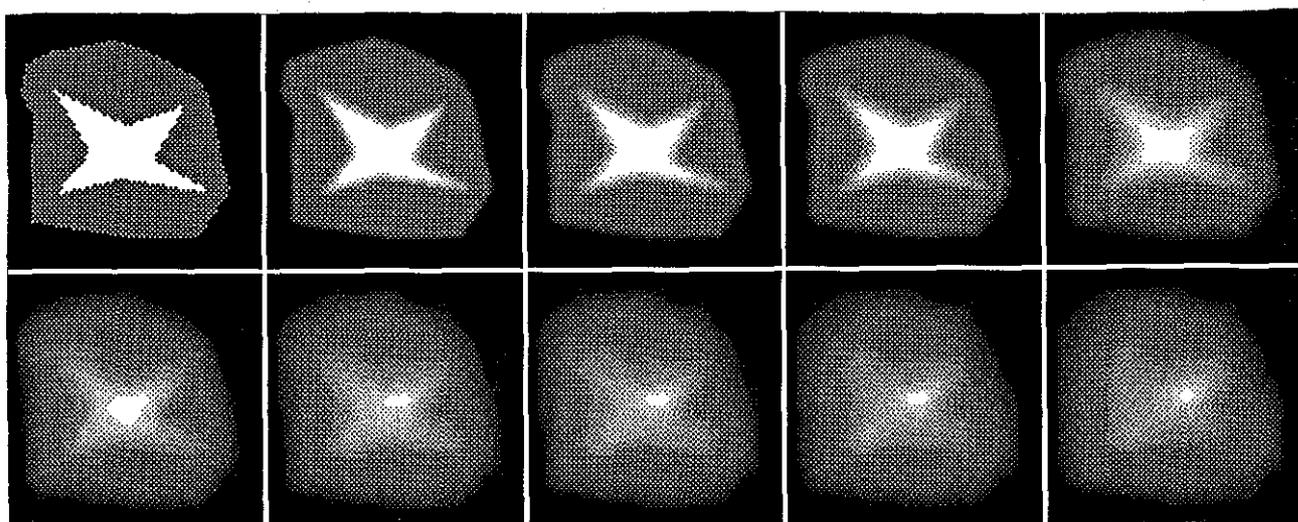


Figure 7.3 : Série de dix imagettes montrant l'évolution des trois codes de l'imagette de départ (première imagette). La dernière imagette est le résultat après 100 pas de temps.

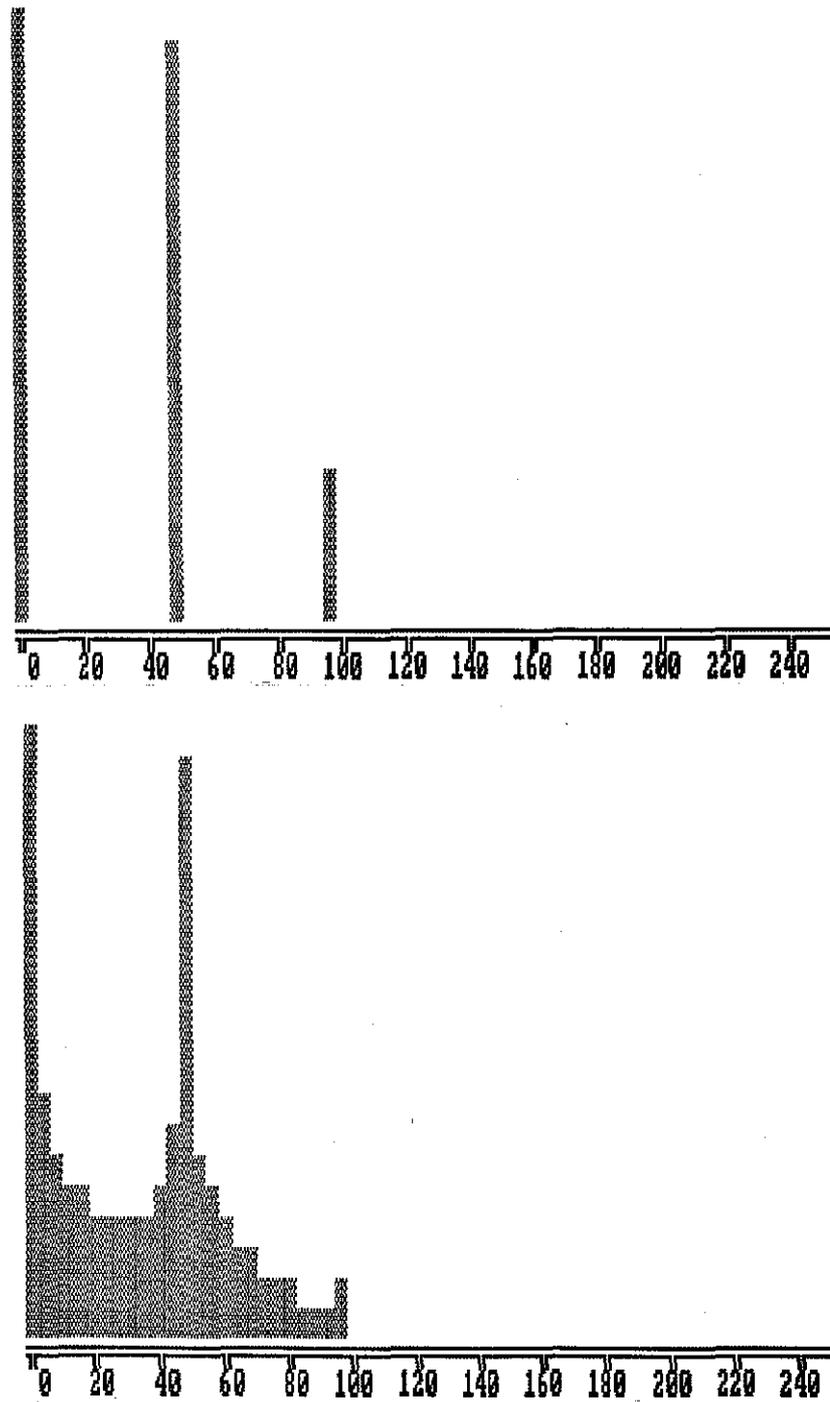


Figure 7.4 : Les deux histogrammes présentés ci-dessus correspondent aux histogrammes de la première imagerie et de la dernière imagerie. On constate que des valeurs intermédiaires aux trois modes de départ sont apparues, traduisant ainsi le phénomène de diffusion.

7.3.4 . Etalonnage du modèle numérique d'évolution

Ce modèle numérique a ensuite été appliqué aux données de densité de population par pixel, données servant de valeurs initiales à notre modèle. Puis, les différentes contraintes dues au milieu environnant ayant été calculées (cf. paragraphe 7.4) et le terme source choisi grâce aux données de l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE), nous avons fait une simulation entre les années 1976 et 1981. Cette simulation doit nous permettre de caler le modèle numérique choisi. En effet, nous disposons de deux classifications effectuées sur des données du satellite Landsat des 1976 et 1981 (cf. chapitre 6). Sur ces deux classifications, nous avons isolé le taxon milieu urbain nous permettant ainsi de connaître l'extension du milieu urbain au cours de cette période par simple différence des deux images. Appelons l'image résultat de la classification faisant apparaître le milieu urbain en 1981 : **image actuelle**, et l'image résultat de la simulation : **image simulée**. Afin de caler le modèle numérique d'évolution, il faut minimiser la différence existant entre l'image actuelle et l'image simulée.

Néanmoins, une différence existe entre ces deux images. En effet, l'image actuelle présente des pixels de milieu urbain disséminés alors que, de par le modèle numérique, le milieu urbain est continu sur l'image simulée. Afin de calculer un coefficient correcteur A, nous avons considéré sur chacune des deux images la surface totale du milieu urbain calculée en nombre de pixels comme des cercles de rayons R_a et R_s pour les images respectivement actuelle et simulée. Ce travail a été réalisé pour chacune des communes existant sur la zone d'étude, mais, en raison des problèmes de reconnaissance du milieu urbain évoqués au chapitre précédent et des résultats souvent inexploitable au niveau des petites communes de la zone d'étude, nous avons envisagé d'utiliser le terme correcteur A calculé sur Toulon et les communes alentour comme terme correcteur pour toute la zone.

Connaissant donc les rayons R_a et R_s , les densités de population aux années 1976 et 1981 ainsi que l'augmentation de population entre ces deux années, l'équation 7.1 nous permet de calculer un terme K_a représentant les contraintes intervenant entre l'image initiale et l'image actuelle. On calcule également un K_s correspondant à la moyenne des contraintes intervenues lors de l'extension du milieu urbain entre l'image initiale et l'image simulée.

Ainsi nous pouvons écrire que :

$$K_a = A K_s \implies A = K_a / K_s \quad 7.20$$

Ainsi, les contraintes dues au milieu environnant varieront à présent entre 0 à A (= 0,0054548433). Afin de vérifier l'exactitude de ce terme correcteur, une simulation a été effectuée en sa présence. Les résultats obtenus sont dans l'ensemble satisfaisants. On observe toutefois une surface légèrement supérieure pour le milieu urbain simulé. Ceci est dû au fait que l'image initiale est constituée de pixels à fort compte numérique, i.e. les pixels représentant les densités de population, et de pixels dont la valeur est nulle. De ce fait, au cours des premiers pas de temps de la simulation, l'amplitude entre les pixels de densité de population et les pixels de valeur nulle est telle que, même en présence d'un terme correcteur, la diffusion est très importante. Néanmoins, après quelques pas de temps, l'amplitude entre pixels voisins a diminué, donnant des structures en forme de cloche. La différence notée entre les pixels d'urbain des images actuelle et simulée avec terme correcteur, correspond à des pixels de valeur de densité de population égales à 1 ou 2, c'est-à-dire de très faible densité.

De ce fait, le terme correcteur A a été considéré comme valable et a été appliqué à toutes les simulations effectuées jusqu'à l'année 2025.

7.4 . Définition des contraintes utilisées

L'équation 7.1 comporte trois termes. Le terme qui nous intéresse dans ce paragraphe est le terme $K(\underline{x})$ appelé coefficient de diffusion. Dans notre étude, ce coefficient sera considéré comme isotrope, c'est-à-dire identique quelque soit la direction. Il va être défini en chaque pixel de l'image grâce aux différents thèmes du SIG. En effet, à chaque thème du SIG choisi comme contrainte va correspondre un coefficient de diffusion partiel : $k(\underline{x})$. Celui-ci représente la contrainte à l'extension du milieu urbain spécifique au thème étudié et est compris entre 0 et 1. Pour une valeur nulle de $k(\underline{x})$, la contrainte sera maximale et donc l'évolution est stoppée ; pour une valeur égale à 1, aucune contrainte ne s'oppose à l'extension des zones urbaines. Les thèmes choisis comme contraintes sont au nombre de sept et sont présentés ultérieurement. En chaque pixel, un coefficient de diffusion final $K(\underline{x})$ sera obtenu par une moyenne pondérée et conditionnée des sept coefficients partiels $k(\underline{x})$.

Il est nécessaire de dire dès à présent que les coefficients partiels attribués aux sept thèmes choisis sont de type heuristique, et ont été fixés grâce à la collaboration de notre équipe et de géographes compétents.

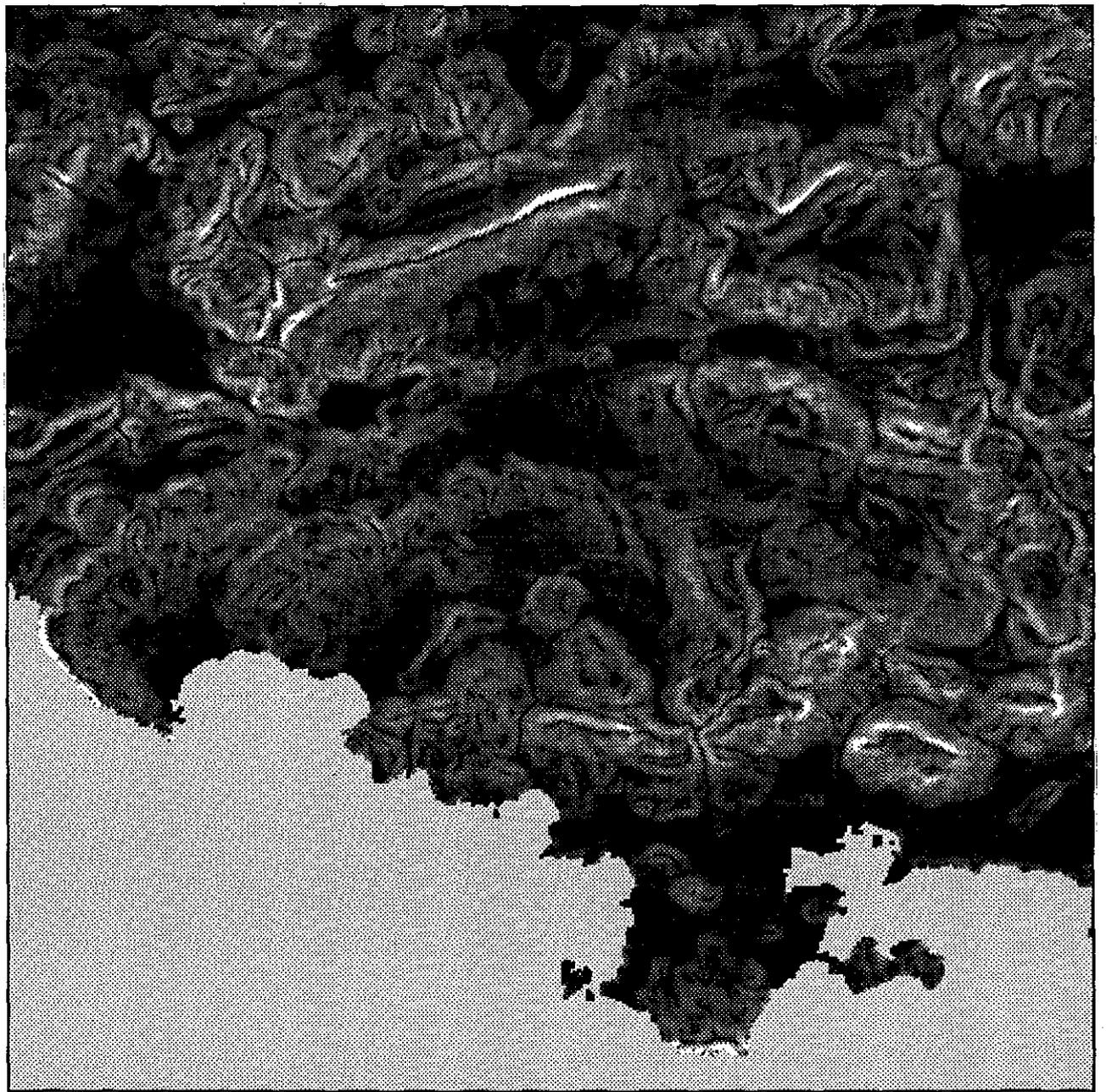
7.4.1 . Modèle numérique de terrain - Pentas

Le thème pente présent dans le SIG est un dérivé du thème topographie par calcul de la valeur de l'angle que fait le gradient altitudinal en x et y en chaque pixel P(x,y) avec le plan (O,x,y). Ces pentes sont exprimées en pourcentage.

On peut considérer que la valeur des pentes est une contrainte à l'avancement du milieu urbain. Ainsi, le milieu urbain sera moins freiné dans un secteur où les pentes n'excèdent pas 15% que dans un secteur où les pentes dépassent 30%. Pour exprimer ces contraintes, les pentes ont été partagées en six intervalles. Lorsque la pente est négligeable, $k(\underline{x})$ est égal à 1. Ensuite, $k(\underline{x})$ diminue jusqu'à la valeur 0 de façon linéaire par segment jusqu'à une valeur de pente égale à 75%. Au-delà, il égale 0. Ce calcul des contraintes dues à la pente est présenté ci-dessous :

Pente en %	$k(\underline{x})$ en %
0 à 10	100
11 à 25	$100 - [(Pente - 10) \times 2]$
26 à 40	$70 - [(Pente - 25) \times 4]$
41 à 49	$10 - (Pente - 40)$
50 à 75	1
> 75	0

La figure 7.5 représente les contraintes dues à la pente.



$k(x)$
(en %)

63 Mer

Figure 7.5 : Image des contraintes dues à la pente.

7.4.2 . Exposition - Orientation des pentes

Comme le thème pente, le thème orientation des pentes est un thème dérivé de la topographie. Cette orientation est donnée par l'azimuth de la normale à la pente, c'est-à-dire par l'angle compris entre la projection de la normale sur le plan (O,x,y) et l'axe des y.

Il a été remarqué que l'extension de l'urbanisation est plus rapide sur les versants sud que sur les versants nord. Le plus souvent, les versants sud commencent à s'urbaniser, puis lorsque la concentration urbaine est arrivée à son maximum local, l'urbanisation gagne vers le nord en passant par l'est et par l'ouest. Du fait des remarques précédentes, nous avons choisi les contraintes dues aux différentes orientations des pentes de la façon suivante :

Exposition	$k(\underline{x})$ en %
Pas d'exposition (surface plane)	100
Sud	100
Sud-est, sud-ouest	90
Est, ouest	80
Nord-est, nord-ouest	70
Nord	50

La figure 7.6 montre les contraintes dues à l'orientation des pentes.

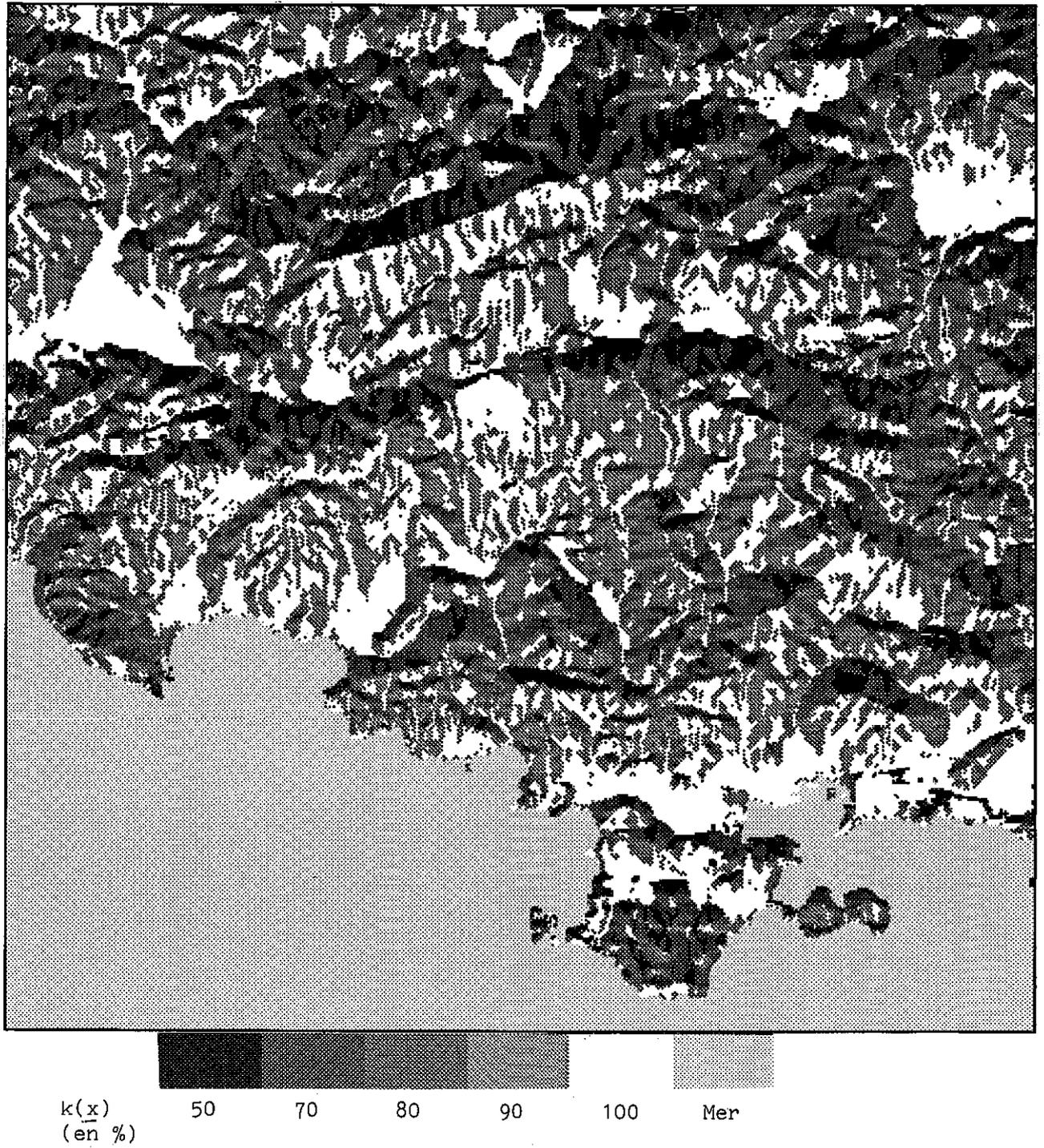


Figure 7.6 : Image montrant les contraintes dues à l'exposition des pentes.

7.4.3 . Régime de propriété forestière

Les forêts comprises dans la zone d'étude sont classées en trois régimes de propriété forestière : les forêts domaniales, les forêts départementales et les forêts communales. Ces forêts sont toutes protégées de façon plus ou moins efficace et plus ou moins durable. Ainsi, tant que les autorités responsables ne décident pas de déclasser des parcelles de forêt, il est pratiquement impossible de pouvoir construire. Néanmoins, il faut remarquer que les pouvoirs politiques sont plus influençables au niveau communal qu'au niveau départemental et enfin qu'au niveau national. De ce fait, la fragilité des domaines forestiers sera plus importante pour les communaux que pour les départementaux, et à plus forte raison pour les domaniaux. Ainsi, il est apparu inexact de déclarer toutes ces forêts comme des contraintes absolues. Seules, les zones de forêts domaniales ne pourront être dégradées et auront une contrainte maximale. Les autres forêts pouvant voir leur régime évoluer plus facilement, les contraintes à appliquer ne sont pas très élevées. Par conséquent, les contraintes dues à ce thème seront les suivantes :

Régime de propriété forestière	$k(\underline{x})$ en %
Forêts domaniales	0
Forêts départementales	50
Forêts communales	75
Autre	100

La figure 7.7 montre la répartition spatiale de ces contraintes.



Figure 7.7 : Image des contraintes dues aux régimes de propriété forestière.

7.4.4 . Éclosions des feux

Le SIG utilisé dans cette étude possède un thème répertoriant tous les lieux d'éclosions de feux entre les années 1972 et 1982. Ces lieux sont codés suivant la superficie parcourue par ce feu. Il nous est apparu important d'utiliser ce thème car il est un fait que les zones où un incendie a dégradé le milieu environnant sont souvent des zones à hauts risques où le milieu urbain ne s'étendra que très doucement. De ce fait, nous avons quantifié les éclosions des feux en fonction de l'importance de la superficie parcourue par celui-ci. Pour les incendies de petite taille, la contrainte est assez faible, et elle augmente jusqu'aux incendies ayant parcouru une zone de cent hectares et plus. Les contraintes que nous avons appliquées sont les suivantes :

Superficie parcourue par le feu	$k(\underline{x})$ en %
zones sans éclosion	100
- de 1 ha	98
1 à 9 ha	90
10 à 99 ha	75
100 ha et +	50

Ces contraintes sont présentées dans la figure 7.8.

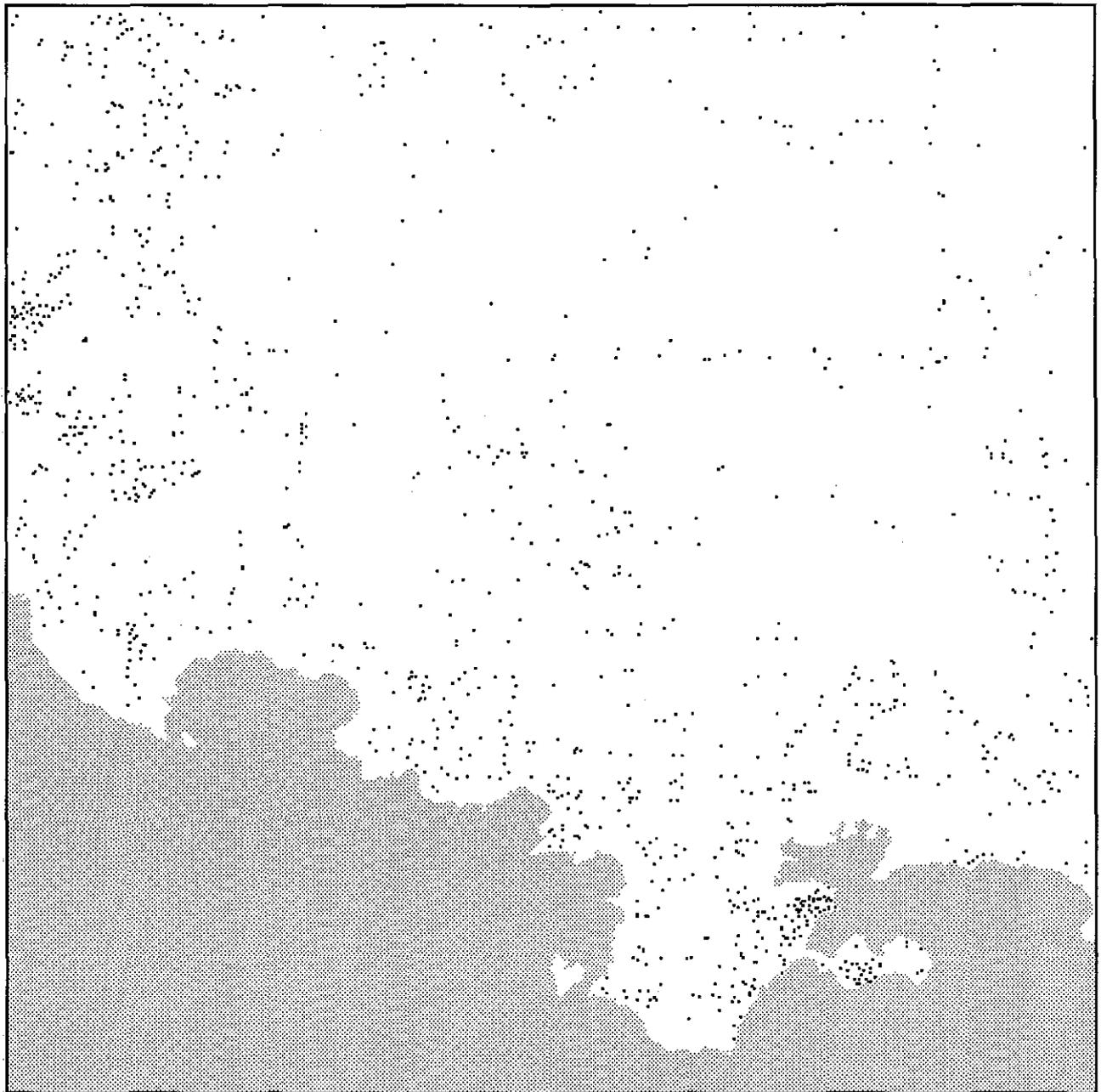


Figure 7.8 : Image présentant les contraintes dues à l'éclosion des feux.

7.4.5 . Distance aux citernes de la Défense des Forêts Contre les Incendies

Le second thème concernant les incendies de forêts utilisé dans cette étude correspond aux citernes de la Défense des Forêts Contre les Incendies (DFCI). Ces citernes sont disséminées dans des endroits à risque d'incendie élevé. Mais du fait de leur présence, on peut considérer ces lieux et leurs alentours proches comme propices au développement de l'urbain car relativement protégés. Nous avons pour cela considéré comme protégé les alentours de chaque citerne jusqu'à une distance de 800 m équivalent à dix pixels. Les zones hors alentours sont alors considérés comme des zones à plus hauts risques. De part ces considérations, nous avons établi les contraintes suivantes :

Distance aux citernes	$k(\underline{x})$ en %
80 m	100
160 m	95
320 m	90
800 m	80
+ de 800 m	60

La localisation de ces contraintes sont présentée dans la figure 7.9.

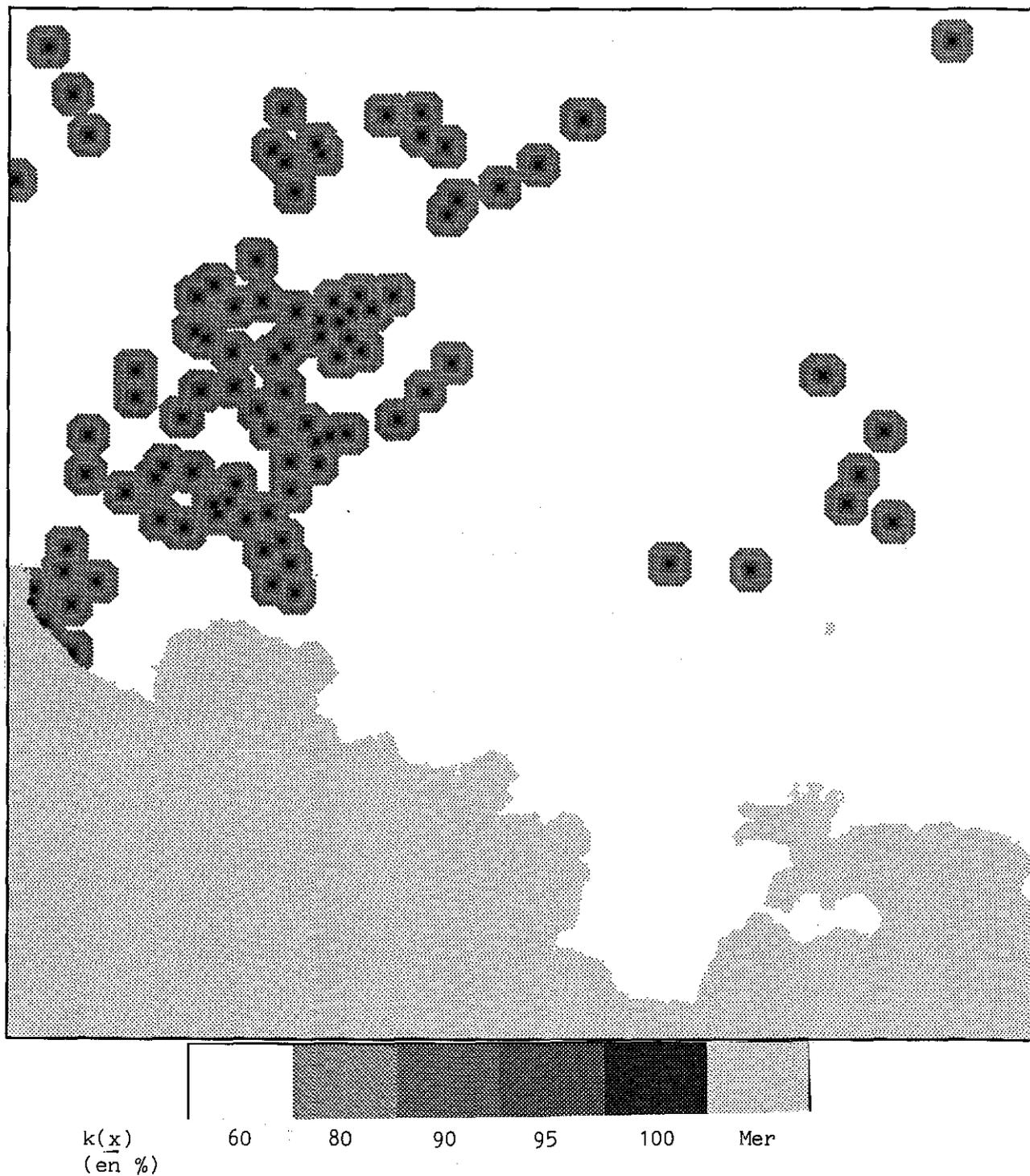


Figure 7.9 : Image présentant les contraintes dues à la présence de citernes de la Défense des Forêts Contre les Incendies.

7.4.6 . Occupation des sols

A partir de la classification supervisée effectuée sur les données du satellite Landsat 1, nous avons essayé d'attribuer des contraintes aux différents types d'occupation des sols présents.

En ce qui concerne les taxons milieu urbain dense, moyennement dense et diffus ainsi que des taxons se rapprochant du milieu urbain, nous avons attribué une contrainte nulle. Les sols nus ont pour leur part reçu une faible contrainte. Cette contrainte a ensuite augmenté avec les landes, puis les garrigues et les forêts. Nous avons aussi attribué une contrainte assez élevée au taxon "agraire", car en effet, ce taxon regroupe les vignes qui dans cette région sont très rentables et donc très difficiles à remplacer par des zones urbaines. Le dernier taxon auquel nous avons attribué une contrainte absolue est le taxon "carrière". En effet, il nous est apparu évident que le milieu urbain ne se développerait pas sur des zones de carrière qui ne sont pas attractives et le plus souvent placée dans des endroits éloignés des centres urbains.

Les contraintes apportées par ces différents types d'occupation des sols sont les suivantes :

type d'occupation des sols	$k(\underline{x})$ en %
Forêts de feuillus	50
Forêts de résineux	50
Garrigues de feuillus	75
Garrigues de résineux	75
Sols nus	95
Carrières	0
Zones agraires	10
Lande	85
Urbain dense	100
Urbain moyennement dense	100
Urbain diffus	100
Autres type d'urbain	100

La figure 7.10 montre la localisation de ces différentes contraintes.

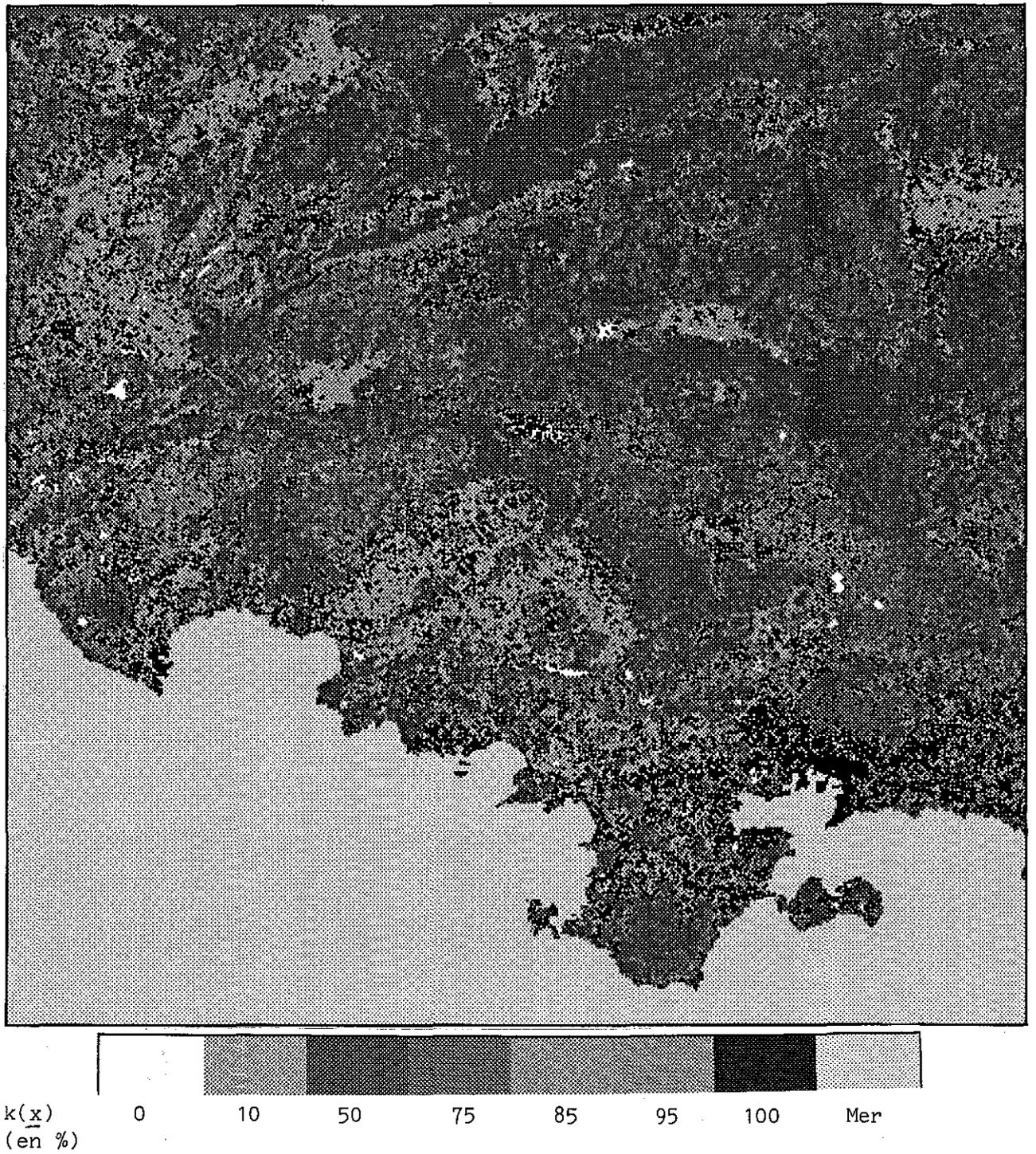


Figure 7.10 : Image des contraintes dues aux types d'occupation des sols.

7.4.7 . Réseau routier

Le dernier thème du SIG pris en compte pour le calcul des contraintes est le réseau routier. Celui-ci, selon le type d'aménagement, peut avoir deux effets sur l'extension du milieu urbain : un effet répulsif et un effet attractif.

Les autoroutes ou les voies de chemin de fer ont plutôt un effet néfaste et donc répulsif sur l'extension du milieu urbain ; alors que les routes secondaires peuvent avoir un effet attractif sur le milieu urbain. En effet, il est plus aisé de construire le long des routes, qu'éloigné de toute voie de communication. Notons qu'à l'échelle de notre étude (i.e. le pixel est égal à 80 m x 80 m), il est apparu évident de ne pas cartographier les chemins plus ou moins entretenus. Par contre, à une échelle plus grande, cela aurait été utile et avantageux pour l'étude.

Dans l'étude de cette contrainte, nous avons utilisé le concept de distance à la route la plus proche. Celui-ci exprime en quelque sorte une contrainte à l'extension du milieu urbain. En effet, plus on est éloigné d'une route, plus la construction d'un édifice est onéreuse et par conséquent plus la contrainte est forte.

La création du fichier de contraintes correspondant au réseau routier a nécessité deux étapes. La première considère seulement les éléments pouvant être répulsifs tels que les autoroutes. Afin de concrétiser cet effet, nous avons délimité une zone de nuisance autour de l'autoroute égale à 80 m (1 pixel), zone où le milieu urbain ne pourra se développer. Dans ces zones-là, la contrainte sera donc maximale. La seconde étape s'intéresse aux voies de communication attractives. Après les avoir isolées, un modèle de transformée en distance (Bianchi, 1988) calcule pour chaque pixel de l'image, la distance à la voie la plus proche et affecte à ce pixel cette distance.

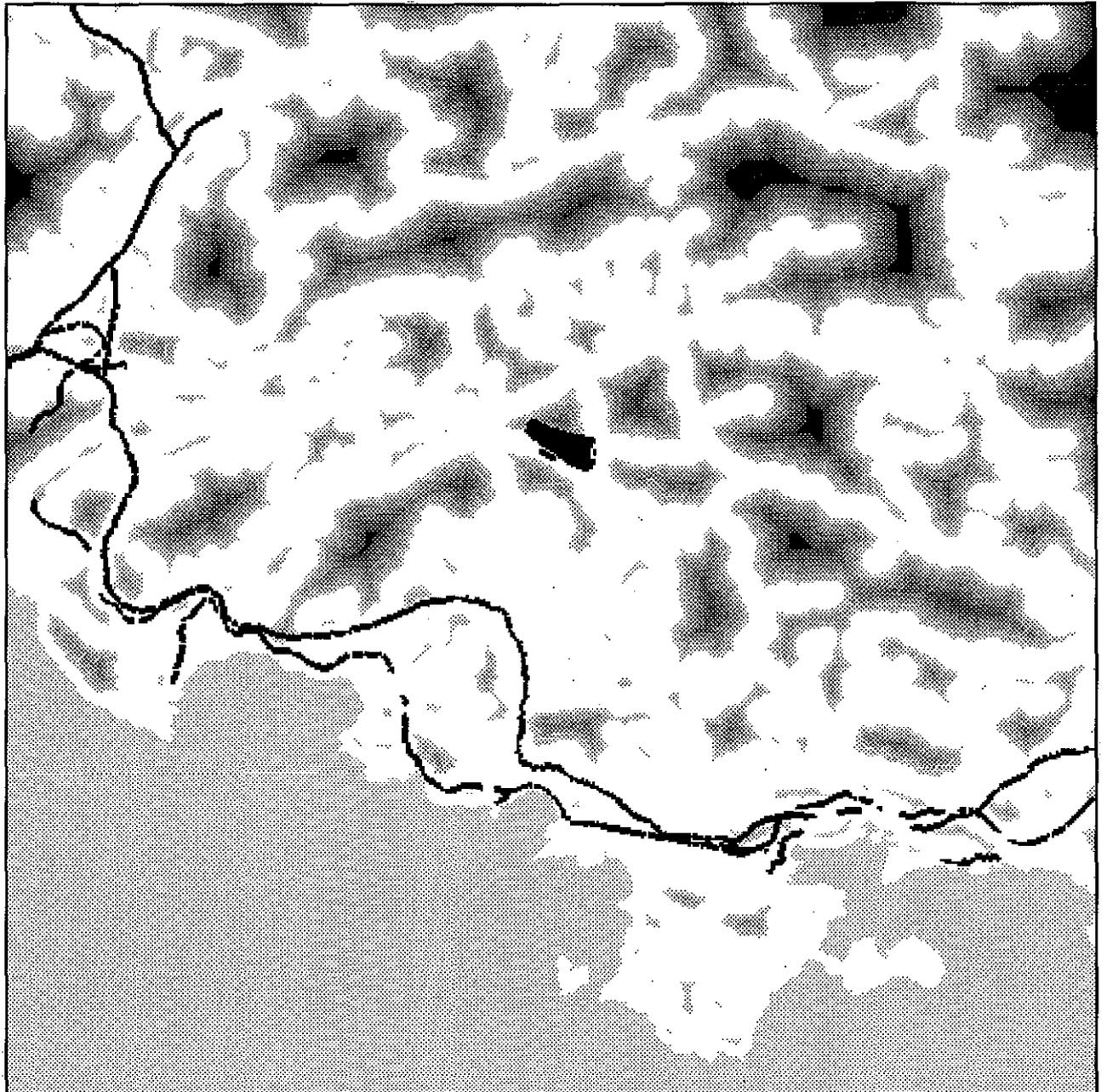
Dans notre étude, aucun pixel n'est éloigné d'une route de plus de 24 pixels, c'est-à-dire de 1920 m. Nous avons alors affecté une contrainte croissante avec la distance de la manière suivante :

- de 0 à 400 m d'une route, pas de contrainte ;
- de 400 m à 1920 m, le coefficient $k(x)$ diminue de 1 à 0,5 exprimant ainsi une augmentation des contraintes avec l'éloignement à la route.

En résumé, on peut noter ces contraintes de la façon suivante :

Réseau routier répulsif	$k(\underline{x})$ en %
Chemin de fer	0
Autoroute + 1 pixel autour	0
Circuit automobile	0
Distance aux voies attractives (en mètre)	$k(\underline{x})$ en %
0 à 400	100
480	98
560	96
640	94
720	92
800	90
880	87
960	84
1040	81
1120	78
1200	75
1280	72
1360	69
1440	66
1520	63
1600	60
1680	57
1760	54
1840 à 1940	50

La figure 7.11 représente ces contraintes liées aux voies de communication.



$k(\underline{x})$
(en %)

0

50

100

Mer

Figure 7.11 : Image présentant les contraintes dues aux voies de communication.

7.4.8 . Contraintes finales

Jusqu'à présent, les coefficients de diffusion que nous avons quantifiés sont des coefficients partiels $k(\underline{x})$ n'intéressant qu'un seul thème et donc qu'un type de contraintes. Ces données de contraintes peuvent être utilisées de deux manières différentes. Soit elles sont scrutées l'une après l'autre pour chaque pixel de l'image lors des simulations, soit elles sont condensées dans un fichier final qui sera le seul à être utilisé dans les simulations. La seconde manière a été choisie car elle offre deux avantages importants :

- le temps machine se trouve réduit, le modèle n'utilisant qu'un seul fichier,
- la définition d'un plus grand nombre de contraintes ne modifie pas le nombre de fichier (un) puisque les contraintes sont condensées.

La méthode de calcul choisie pour réaliser le fichier de contraintes final correspond à une moyenne pondérée conditionnée des coefficients $k_i(\underline{x})$ en chaque point de l'image. Cette moyenne est pondérée car nous avons pensé que certains des thèmes avaient une importance moindre que les autres. C'est le cas pour les contraintes dues à l'orientation des pentes et aux citernes DFCI. Comme la quantification des contraintes, cette pondération est heuristique mais s'appuie sur les connaissances intuitives humaines. De plus, cette moyenne est conditionnée car, pour un pixel donné, si il existe un coefficient égal à 0 dans la série des sept coefficients, le coefficient final $K(\underline{x})$ en ce pixel sera égal à 0. Ceci traduit le fait que lorsque le milieu urbain ne peut se développer dans une zone à cause d'une seule contrainte absolue, l'utilisation d'une moyenne non conditionnée rendrait cette zone constructible, ce qui n'est pas le cas.

Le formalisme de cette méthode peut se transcrire de la manière suivante :

$$\forall x \in T \text{ et } \forall i \text{ tel que } k_i(\underline{x}) = 0 \text{ alors } K(\underline{x}) = \frac{\sum_{i=1}^N a_i k_i(\underline{x})}{\sum_{i=1}^N a_i}$$

$$\forall x \in T, \text{ si } \exists i \text{ tel que } k_i(\underline{x}) = 0 \text{ alors } K(\underline{x}) = 0$$

N est le nombre de contraintes employées, ici $N = 7$,

a_i sont les coefficients de pondération définis de la manière suivante :

Thème de contrainte	Coefficient de pondération a_i
Pentes	1,0
Orientation des pentes	0,8
Régime de propriété forestière	1,0
Eclosion des feux	1,0
Distance aux citernes DFCI	0,8
Types d'occupation des sols	1,0
Réseau routier	1,0

Cette méthode étant utilisée pour les sept thèmes précédemment cités, on obtient le résultat de cette moyenne sous forme d'un histogramme et d'une image (fig. 7.12).

La lecture de l'histogramme permet de découvrir trois grands groupes. Le premier est le groupe des $K(\underline{x}) = 0$, groupe qui réunit toutes les zones où le milieu urbain ne pourra pas s'étendre à l'exception du domaine marin. Le domaine marin constitue un groupe à part et est codé $K(\underline{x}) = 249 = f_R$. En fait, cette valeur est une valeur de rejet et donc totalement arbitraire. Elle signifie seulement que le domaine marin est considéré comme un masque, c'est-à-dire une zone où le milieu urbain ne peut s'étendre. Enfin le troisième groupe est formé des coefficients de diffusion $K(\underline{x})$ exprimés en pourcentage. Ces coefficients s'échelonnent de 50 % (ou 0,5) à 100 % (ou 1). On peut remarquer qu'une grande partie de la zone d'étude a des coefficients de diffusion compris entre 75 % et 86 % ce qui ne représente pas une contrainte très importante. Néanmoins, les zones où n'apparaissent aucune contrainte sont très restreintes. En effet, il n'existe que 10 pixels, c'est-à-dire 64 hectares où l'extension du milieu urbain sera libre.

La figure 7.12 montre les zones où l'extension du milieu urbain est impossible (zones en noir) jusqu'aux zones où aucune contrainte n'apparaît (zones en blanc).

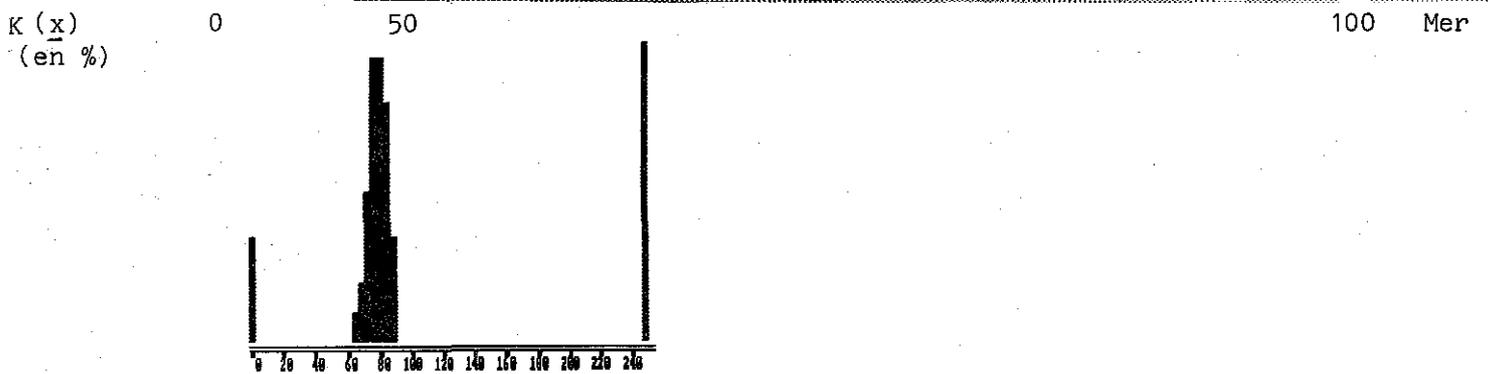
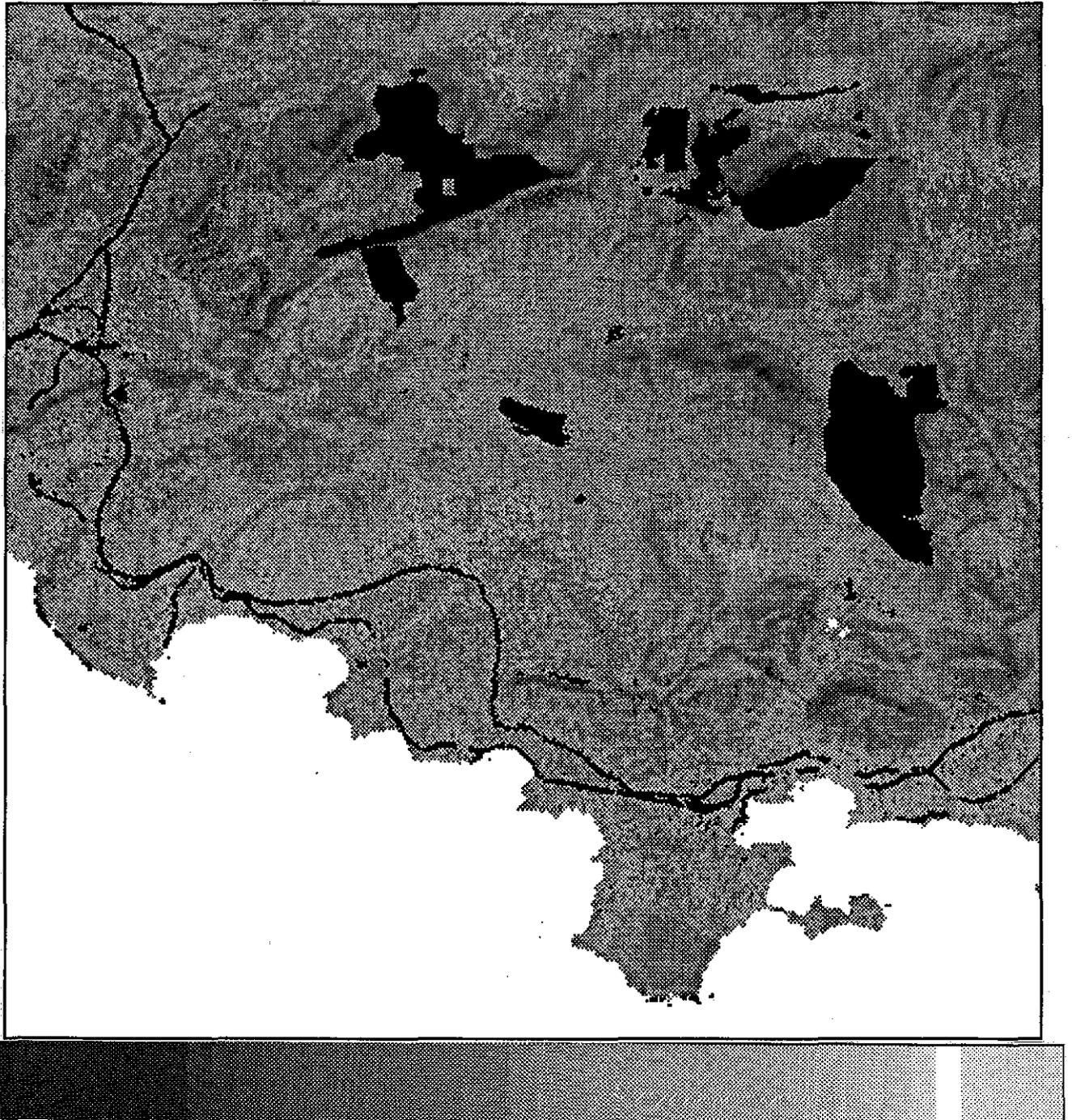


Figure 7.12 : Image montrant les contraintes finales ; l'histogramme ci-dessus est celui associé à cette image.

7.5 . Termes source utilisés

Le dernier terme de l'équation 7.1 que nous allons à présent détailler est le terme source $S(t,x)$. Il correspond à un renouvellement et à un accroissement de la population au sein de chaque centre urbain. Cette valeur peut varier et permet ainsi d'intégrer les différents scénarios utilisés. De plus, le terme source définit la valeur du pas de temps de calcul, celui-ci devant être compatible avec les conditions dictées par le modèle utilisé afin d'éviter les problèmes d'instabilité numérique.

Pour notre étude, le fichier va prendre trois apparences correspondant à trois périodes différentes.

La première période est celle s'étendant de l'année de départ, c'est-à-dire 1976, jusqu'à l'année 1982. En effet, sur cette période sont connues les variations annuelles de population (données INSEE - cf. annexe 4 -) pour chacune des communes de la zone d'étude.

La seconde période s'étend de 1982 à 1985. Durant cette période, les données sont moins précises que les précédentes car elles ne concernent que les départements de la zone d'étude (i.e. les Bouches-du-Rhône et le Var) et non plus les communes. Les valeurs de la source sont les suivantes :

Département	Variation 1982 - 1985 (en %)
Bouches-du-Rhône	+ 0,7
Var	+ 4,8

La troisième période s'étend de 1985 à 2025. Le modèle utilise alors comme source des valeurs calculées par des personnes compétentes dans la définition de scénarios d'évolution démographique. Cette période a été divisée en deux sous-périodes : l'une de 1985 à 2000 et l'autre de 2000 à 2025. Sur chacune des deux sous-périodes, deux scénarios nommés T1 et A2, correspondant à deux valeurs du terme source ont été étudiés. Le premier scénario simule une évolution faible de la population, alors que le second simule une évolution plus importante. Les valeurs du terme source pour ces deux scénarios sont données ci-dessous :

Scénario	Valeur du terme source(% par an)
T1	0,08
A2	1,33

A présent, tous les termes de l'équation 7.1 ont été définis. L'image initiale à partir de laquelle les simulations vont commencer est l'image de densité de population par pixel présentée au chapitre 6.

7.6 . Résultats et discussion

Les résultats obtenus pour les années 1985, 2000 et 2025 se présentent sous forme d'images sur lesquelles apparaît seulement le milieu urbain. Une comparaison entre l'état initial et la fin de chaque période a été effectuée afin de quantifier la surface acquise par le milieu urbain et de montrer quelles sont les tendances spatiales de l'évolution de ce milieu. La comparaison entre l'évolution et la classification de l'occupation des sols de 1976 montre également quels sont les types d'occupation des sols envahis par le milieu urbain et dans quelles proportions. Afin de mieux visualiser les comparaisons et les évolutions, nous avons regroupé les taxons présents dans la classification en quatre groupes plus généraux : les zones naturelles, les sols nus, les zones agraires et l'urbain diffus.

Le groupe "zones naturelles" englobe :

- les forêts de feuillus,
- les forêts mixtes feuillus/résineux à résineux dominants,
- les garrigues de feuillus,
- les garrigues de résineux,
- les landes.

Le groupe "sols nus" concerne :

- les sols nus,
- les carrières et affleurements rocheux.

Le groupe "zone agricole" comprend :

- les zones agraires (vignes et vergers).

Le groupe "urbain diffus" reprend l'urbain diffus que nous n'avons pas considéré dans l'évolution.

7.6.1 . Résultats pour l'année 1985

De l'année 1976 jusqu'à l'année 1985, l'évolution du milieu urbain est passé par deux périodes. La première de 1976 à 1982 utilise un terme source par commune et par an, alors que la seconde, de 1982 à 1985, utilise un terme source par département et par an (cf. paragraphe 7.5). La figure 7.13 montre l'extension du milieu urbain. Les valeurs de cette augmentation sont données en nombre de pixels et en pourcentage d'augmentation, et sont présentées dans le tableau 7.2.

L'augmentation de surface du milieu urbain est très importante et est excessive. En fait, comme nous l'avons déjà signalé au paragraphe 7.4.3, on s'aperçoit que cette augmentation de surface correspond surtout à des zones où la concentration de population est peu élevée. En effet, pour les densités de population comprises entre 1 et 4 habitants par pixel, la surface passe de 462 pixels en 1976 à 5676 pixels en 1985 soit une augmentation de 1128 %. Cette importante augmentation est due à l'amplitude de densité de population à la périphérie des zones urbaines initiales. En effet, à ces périphéries, les pixels d'urbain ont une valeur de densité élevée (110 pour la plus élevée) alors que les pixels voisins ont une densité nulle, ce qui entraîne, lors du calcul de diffusion, une très forte diffusion (l'opérateur laplacien étant d'autant plus élevé que l'amplitude entre les 4-voisins est élevée), et ceci malgré le terme correcteur.

Si on fait des coupes au travers d'une ville en 1976 et en 1985 (fig. 7.14), on remarque que la première a une forme de créneau de grande amplitude, alors que la seconde a une forme de cloche due à l'augmentation de surface à faible densité de population sous l'effet de la diffusion. Les simulations aux années 2000 et 2025 montrent une augmentation moins importante entre l'année 1985 et ces années, concrétisant ainsi le fait que le modèle a atteint son équilibre.

Afin de connaître les différents taxons ayant progressé vers le milieu urbain, nous avons fait une comparaison entre la classification 1976 et l'année 1985. Les résultats sont présentés dans le tableau 7.3. et la figure 7.15.

Le pourcentage de transition des zones agraires en zone d'urbain est assez important avec 25,1 % de la surface totale d'augmentation du milieu urbain. En effet, ces zones agraires sont pour la plupart aux alentours de villes ou villages et sont donc les premières envahies, malgré les contraintes élevées sur ces zones. Ceci explique donc cette augmentation.

Transition	Surfaces	
	en pixels	% d'augmentation
Urbain initial	5020	
Urbain en 1985	12199	143,01

Tableau 7.2 : Résultats de l'augmentation entre 1976 et 1985.

Transition	Zones naturelles	Sols nus	Zones agraires	Urbain diffus
surface en %	30,8	13,3	25,1	30,8

Tableau 7.3 : Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 1985.

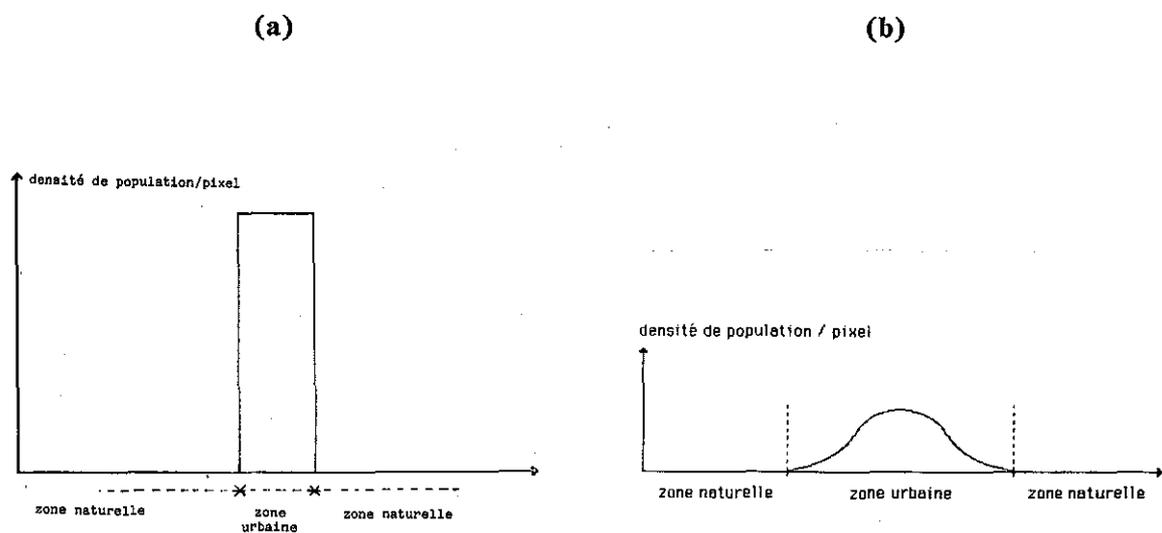


Figure 7.14 : Coupe effectuée au travers d'une zone de milieu urbain aux années 1976 (a) et 1985 (b).

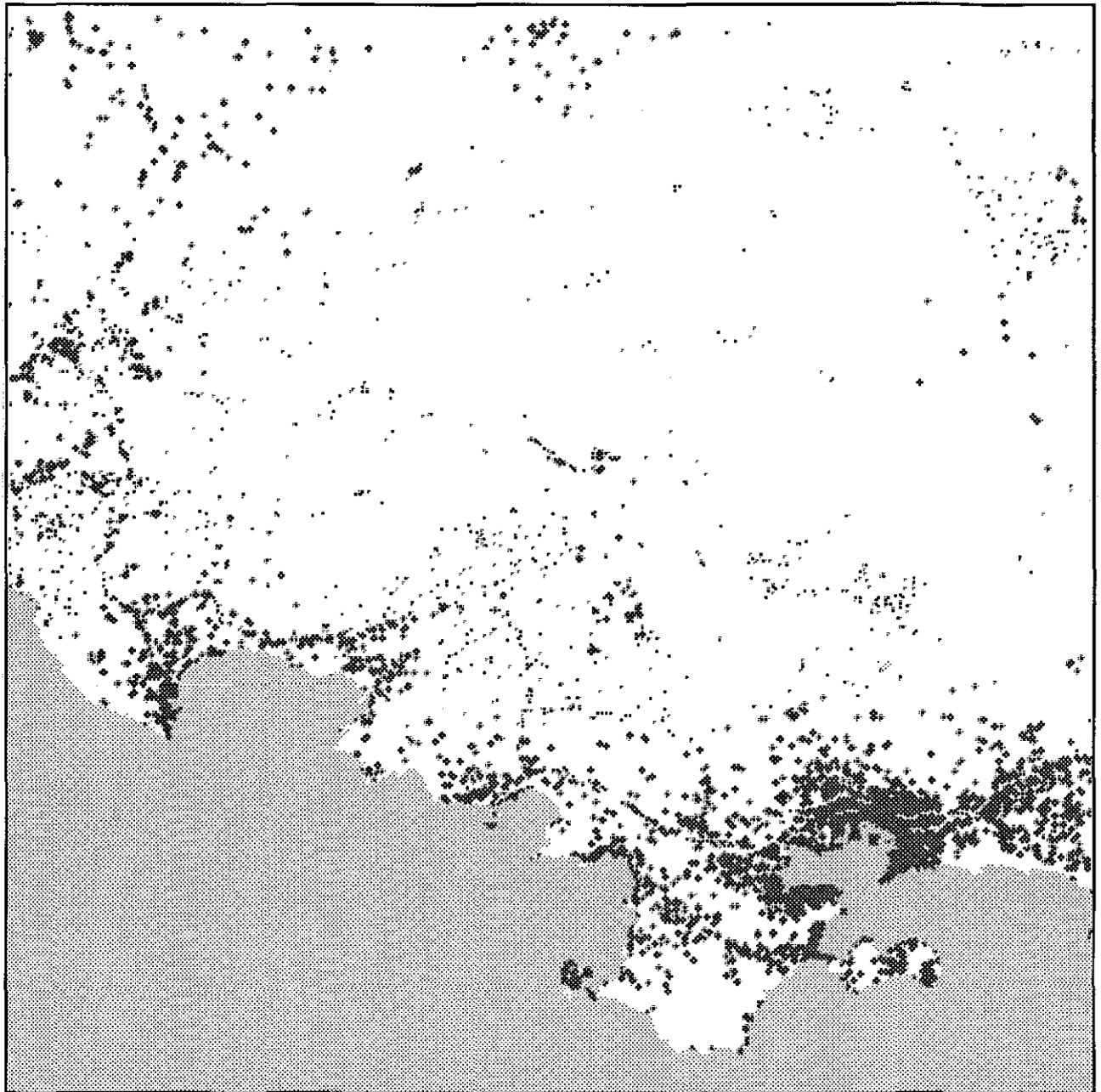
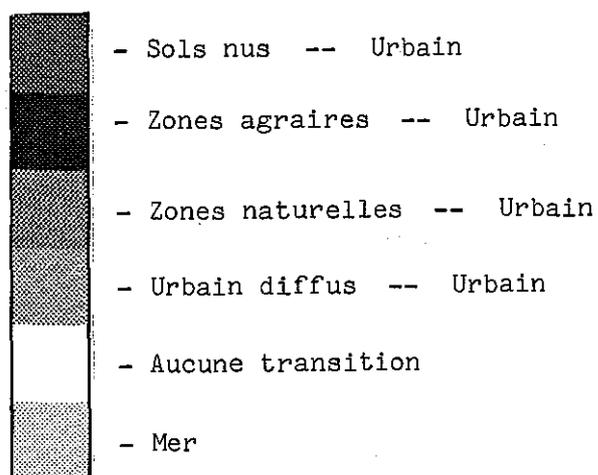


Figure 7.13 : Résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 1985.



Légende valable pour les figures 7.15, 7.18, 7.19, 7.22 et 7.23.

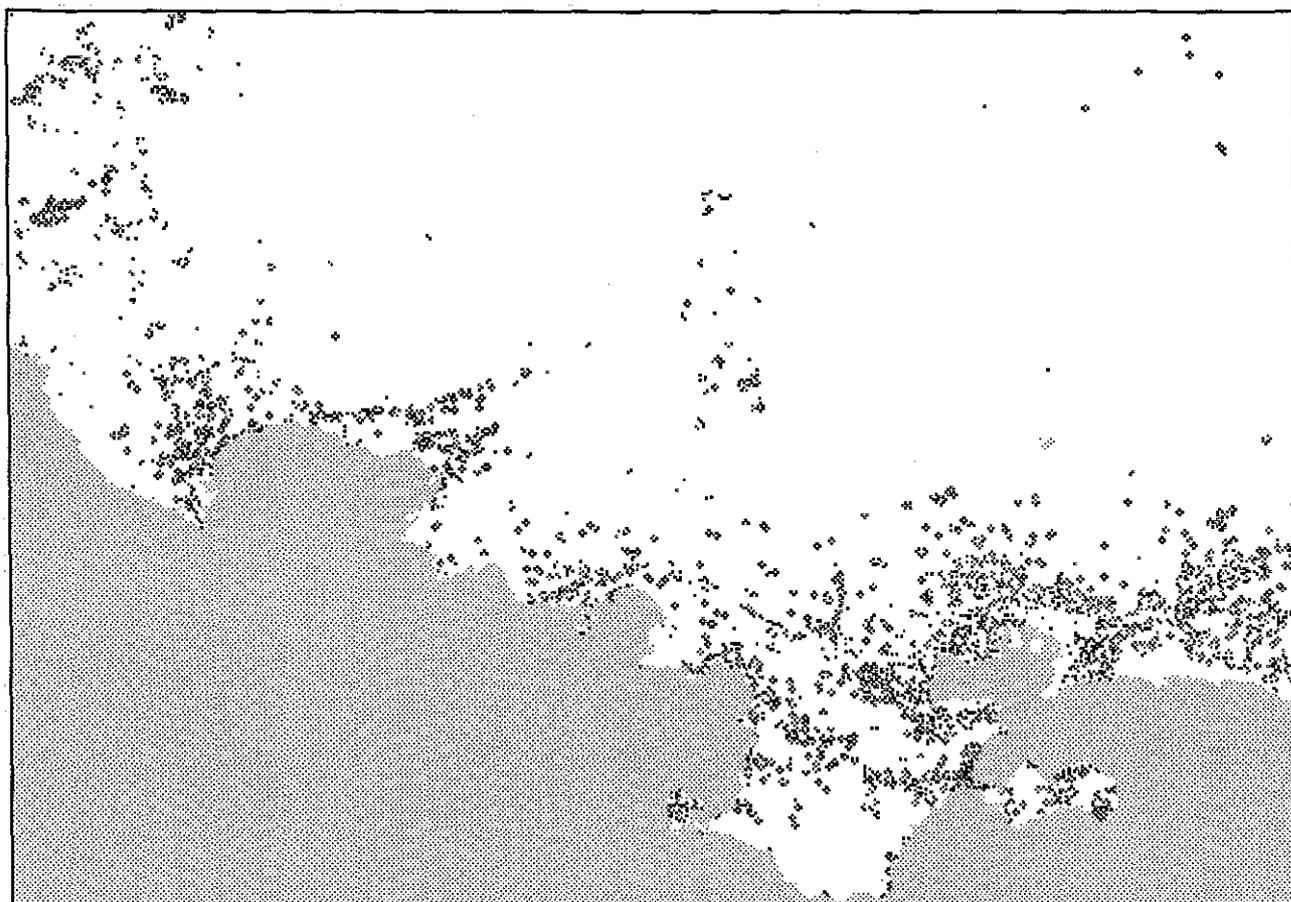


Figure 7.15 : Cette image montre la surface de milieu urbain gagnée sur chacun des quatre thèmes retenus et pour l'année 1985.

7.6.2 . Résultats pour l'année 2000

A partir de l'année 1985, les données de variation de la population sont des données prédictives choisies afin de simuler une augmentation faible et une augmentation forte de la population. Ces données sont partagées en deux scénarios appelés T1 et A2. Ceux-ci correspondent à des cas de croissance démographique dans les régions méditerranéennes françaises et ont été données au paragraphe 7.5.

Ces scénarios ont comme point de départ commun l'image simulée de 1985. Chacun va ensuite évoluer grâce à sa propre valeur de variation de population. Les résultats de ces deux scénarios sont sous forme d'image montrant l'extension du milieu urbain et sont présentés par les figures 7.16 et 7.17 respectivement pour les scénarios T1 et A2.

L'histogramme associé à chacune de ces images nous permet de mettre en évidence les variations de surface au cours de cette période. Ces résultats sont présentés dans les tableaux 7.4 et 7.5.

La comparaison avec les données de la classification de 1976 nous donne les résultats présentés dans les tableaux 7.6 et 7.7 et les figures 7.17 et 7.18, respectivement pour les scénarios T1 et A2.

Dans l'ensemble, on remarque que les surfaces envahies par le milieu urbain sont plus importantes pour le scénario A2, les pourcentages pour chacun des groupes sont équivalents.

Transition	Surfaces	
	en pixels	% d'augmentation
Urbain initial (1985)	12199	
Urbain en 2000	16247	33,18

Tableau 7.4 : Résultats de l'augmentation entre 1985 et 2000 pour le scénario T1.

Transition	Surfaces	
	en pixels	% d'augmentation
Urbain initial (1985)	12199	
Urbain en 2000	17189	40,90

Tableau 7.5 : Résultats de l'augmentation entre 1985 et 2000 pour le scénario A2.

Transition	Zones naturelles	Sols nus	Zones agraires	Urbain diffus
surface en %	35,8	13,5	25,2	25,5

Tableau 7.6 : Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 2000 et le scénario T1.

Transition	Zones naturelles	Sols nus	Zones agraires	Urbain diffus
surface en %	36,7	13,2	25,3	24,8

Tableau 7.7 : Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 2000 et le scénario A2.

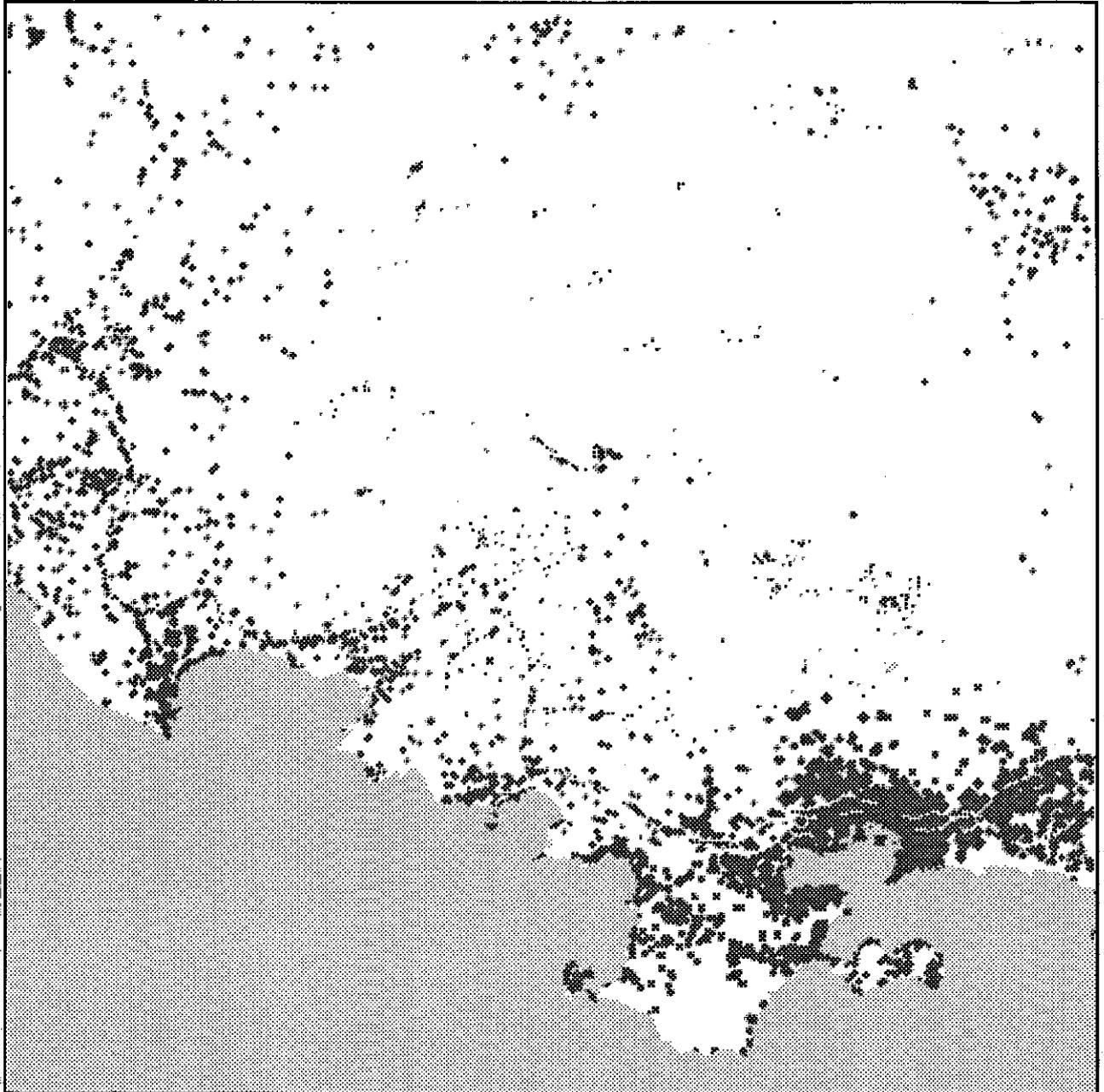


Figure 7.16 : Image résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 2000 et le scénario T1.

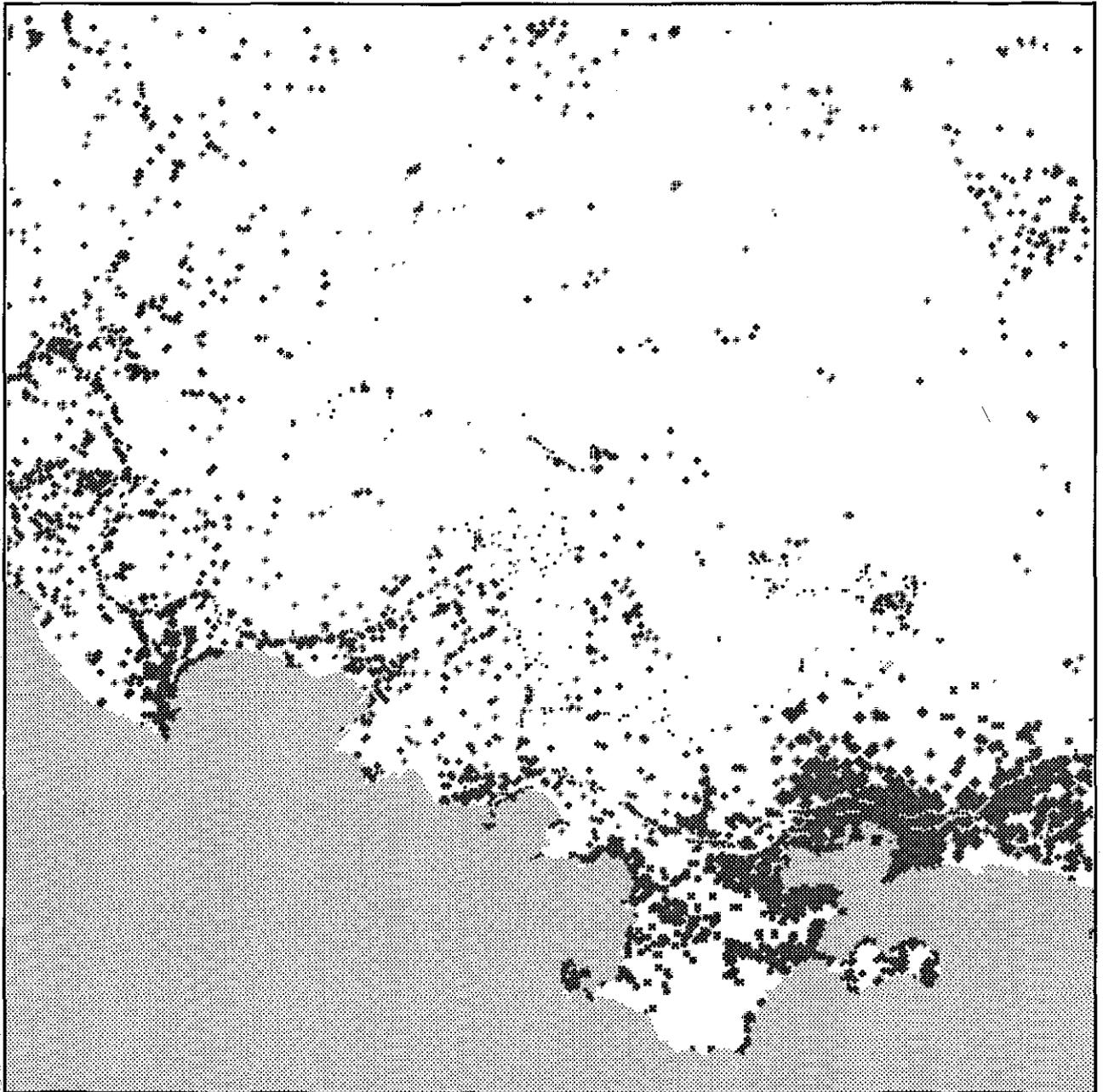


Figure 7.17 : Image résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 2000 et le scénario A2.

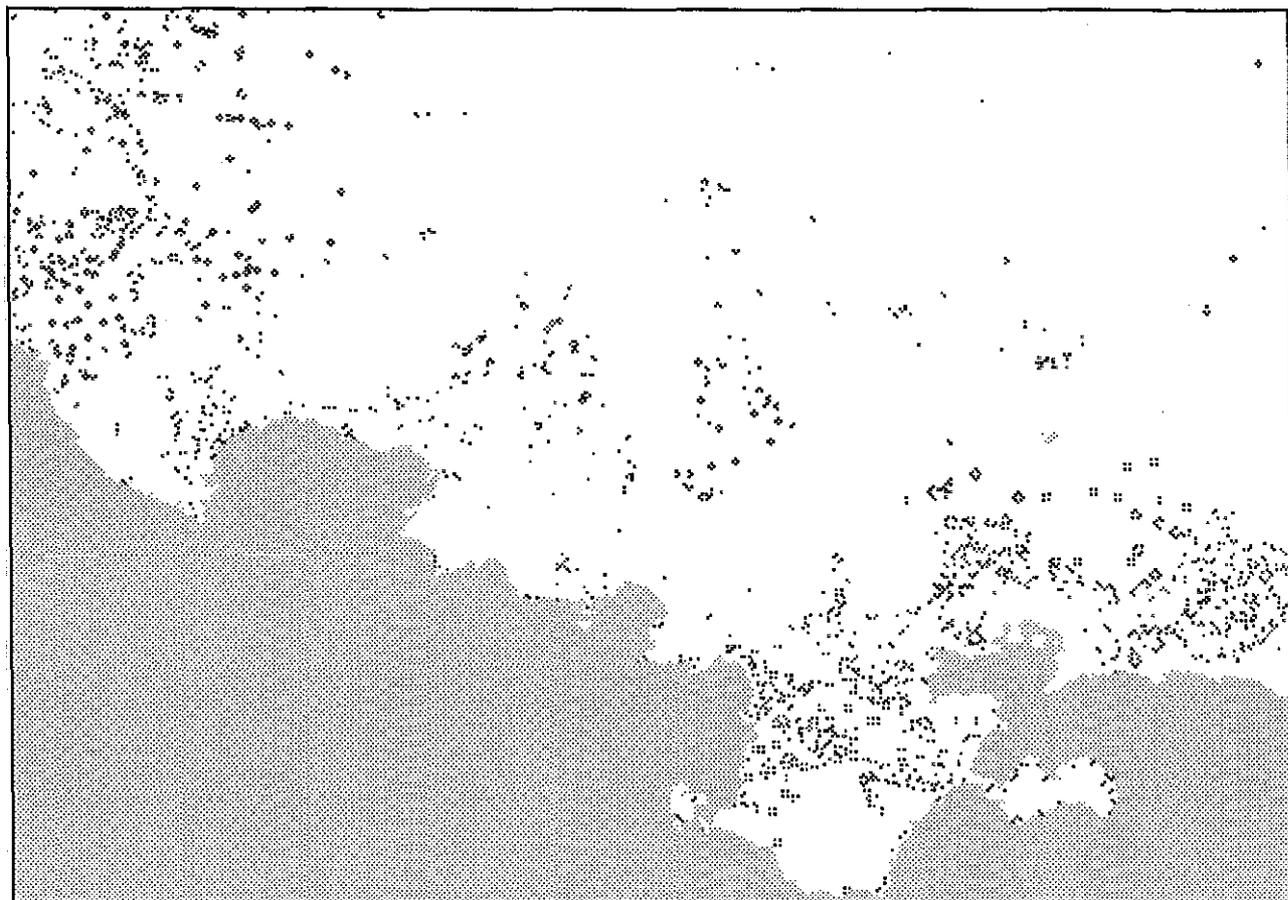


Figure 7.18 : Image montrant les types des zones acquises par le milieu urbain entre les années 1985 et 2000 pour le scénario T1.

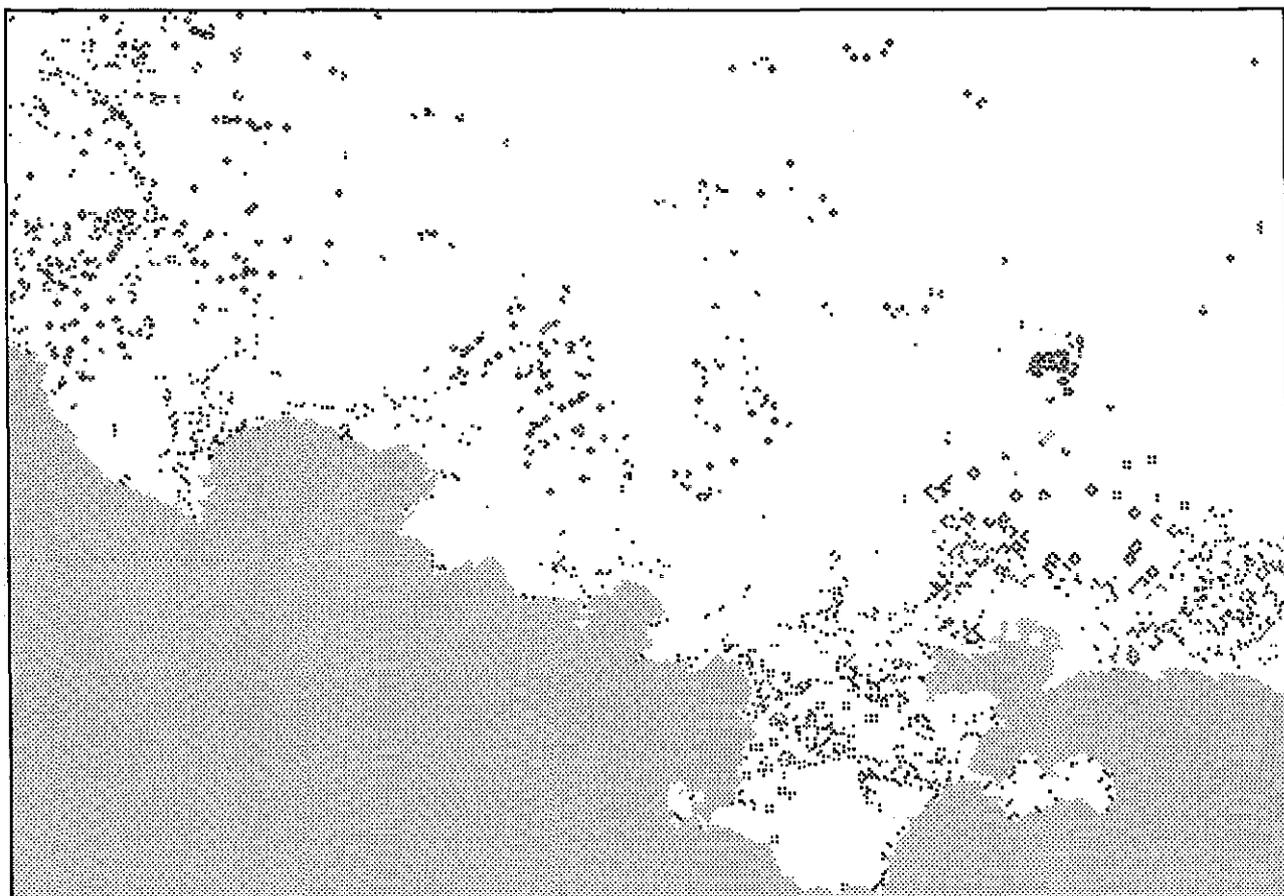


Figure 7.19 : Image montrant les types des zones acquises par le milieu urbain entre les années 1985 et 2000 pour le scénario A2.

7.6.3 . Résultats pour l'année 2025

Les données de variation de population entre les années 2000 et 2025 sont identiques à celles de la période précédente. Il existe donc deux scénarios T1 et A2. La période de simulation est néanmoins plus longue que la précédente : 25 ans au lieu de 15 ans. Les résultats de ces simulations sont présentés par les figures 7.20 et 7.21. Les tableaux 7.8 et 7.9 montrent de façon quantitative l'extension du milieu urbain au cours de la période 2000 - 2025 pour les scénarios T1 et A2.

On remarque que l'extension du milieu urbain a diminué au cours de cette période par rapport à la période précédente, et ceci d'autant plus que les périodes sont de longueurs différentes. De ce fait, on peut dire que le milieu urbain rencontre de plus en plus de contraintes à son avancement.

Les tableaux 7.10 et 7.11 ainsi que les figures 7.22 et 7.23 nous montrent quels sont les types d'occupation des sols envahis.

La comparaison entre les années 2000 et 2025 en ce qui concerne l'évolution de chacun des groupes montre une certaine augmentation dans la transition zones naturelles - milieu urbain. De plus, l'urbain diffus étant remplacé par le milieu urbain, celui-ci tend à diminuer au cours du temps.

Transition	Surfaces	
	en pixels	% d'augmentation
Urbain initial (2000)	16247	
Urbain en 2025	19477	19,88

Tableau 7.8 : Résultats de l'augmentation entre 2000 et 2025 pour le scénario T1.

Transition	Surfaces	
	en pixels	% d'augmentation
Urbain initial (2000)	17189	
Urbain en 2025	21907	27,45

Tableau 7.9 : Résultats de l'augmentation entre 2000 et 2025 pour le scénario A2.

Transition	Zones naturelles	Sols nus	Zones agraires	Urbain diffus
surface en %	40,9	10	25,0	24,1

Tableau 7.10 : Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 2025 et le scénario T1.

Transition	Zones naturelles	Sols nus	Zones agraires	Urbain diffus
surface en %	40,3	10,1	25,5	24,1

Tableau 7.11 : Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 2025 et le scénario A2.

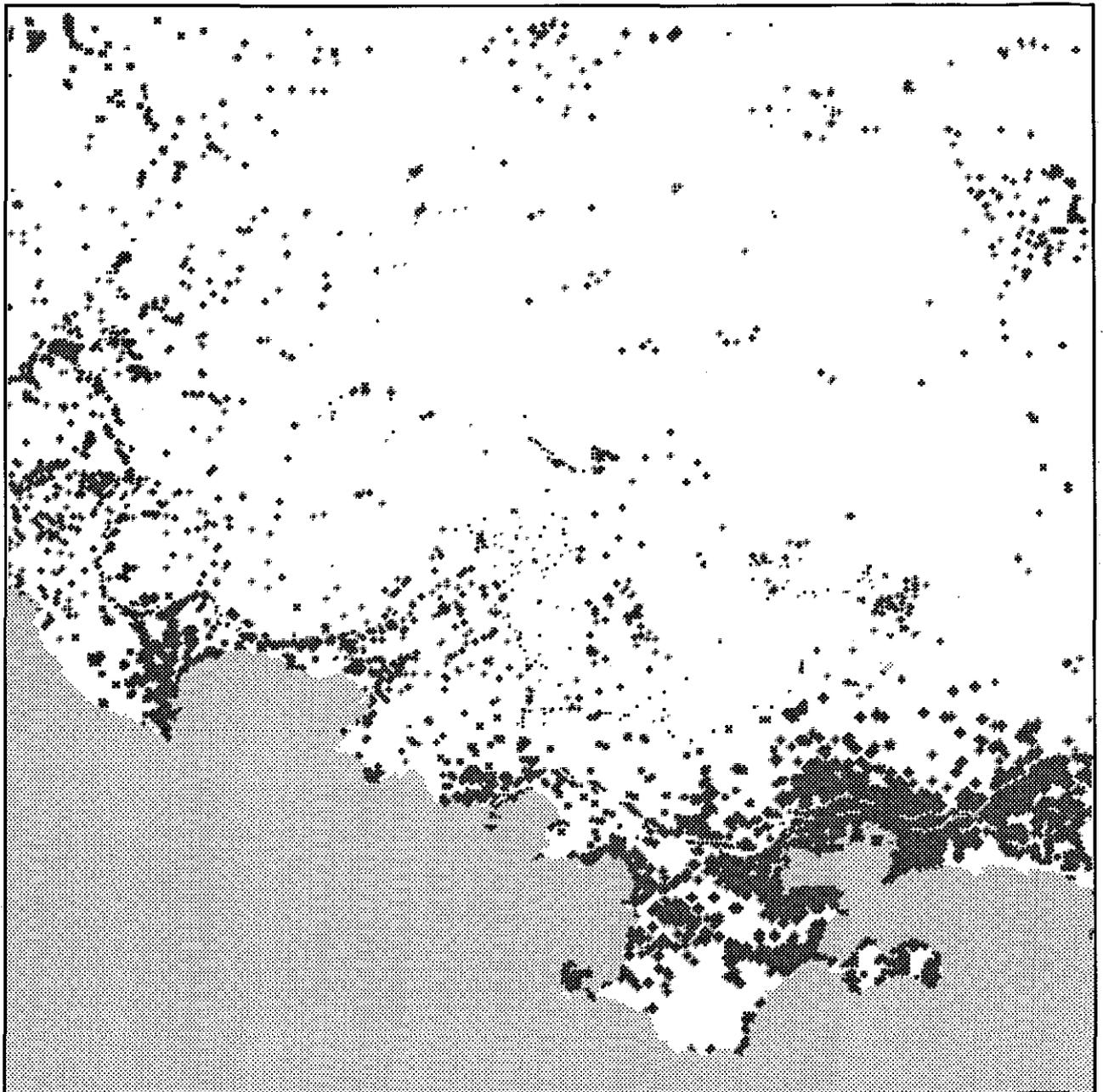


Figure 7.20 : Image résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 2025 et le scénario T1.

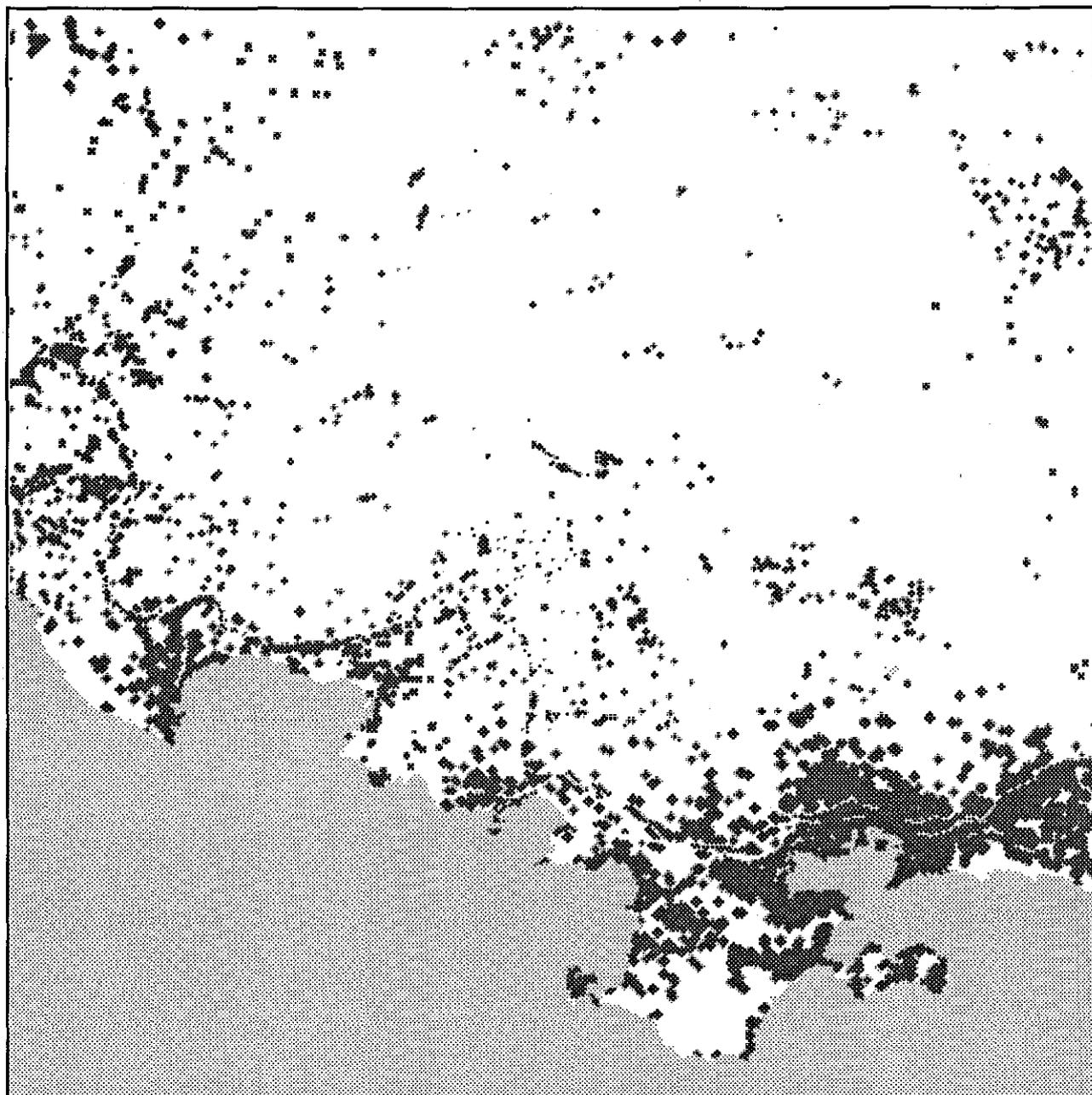


Figure 7.21 : Image résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 2025 et le scénario A2.

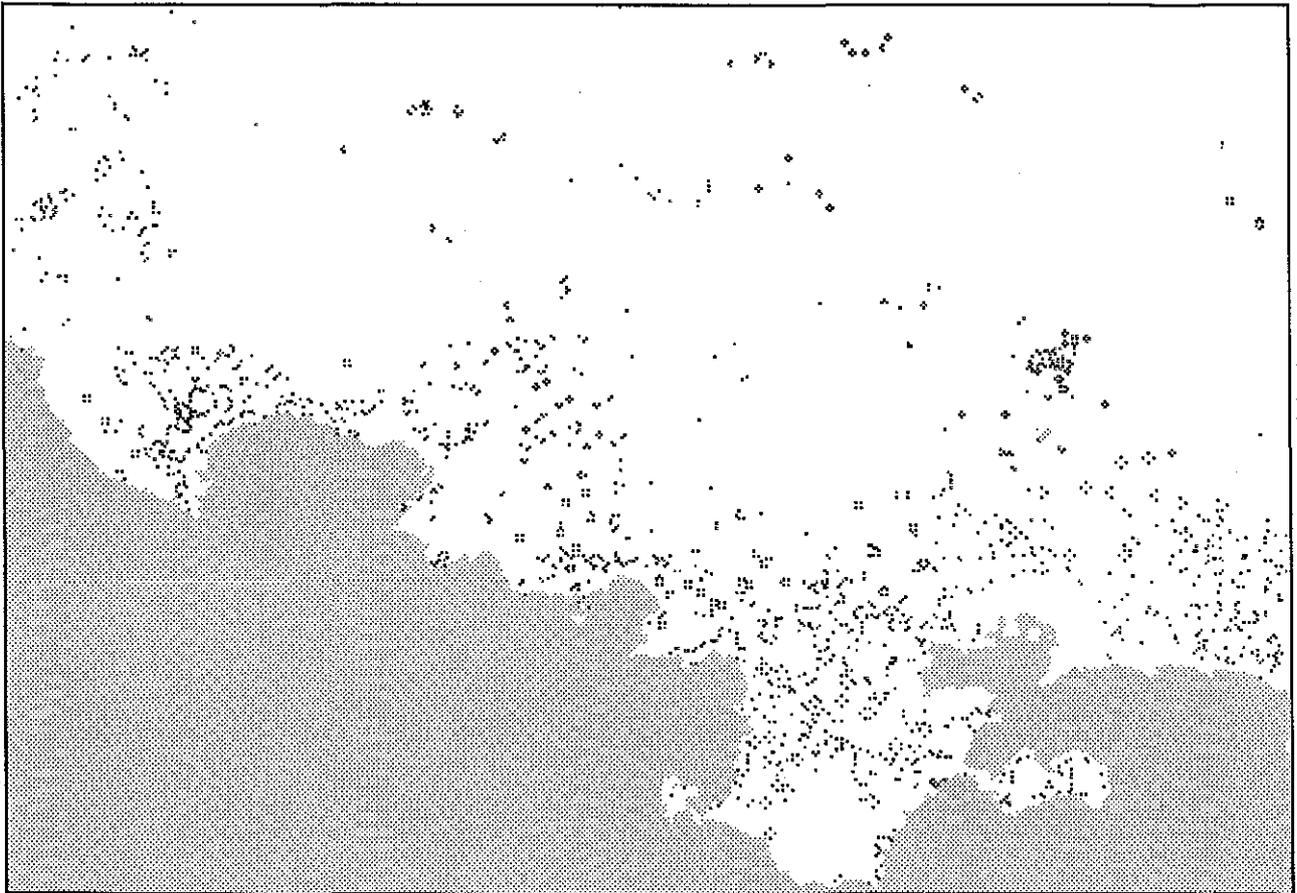


Figure 7.22 : Image présentant les surfaces des différents types d'occupation des sols acquises par le milieu urbain entre les années 2000 et 2025 pour le scénario T1.

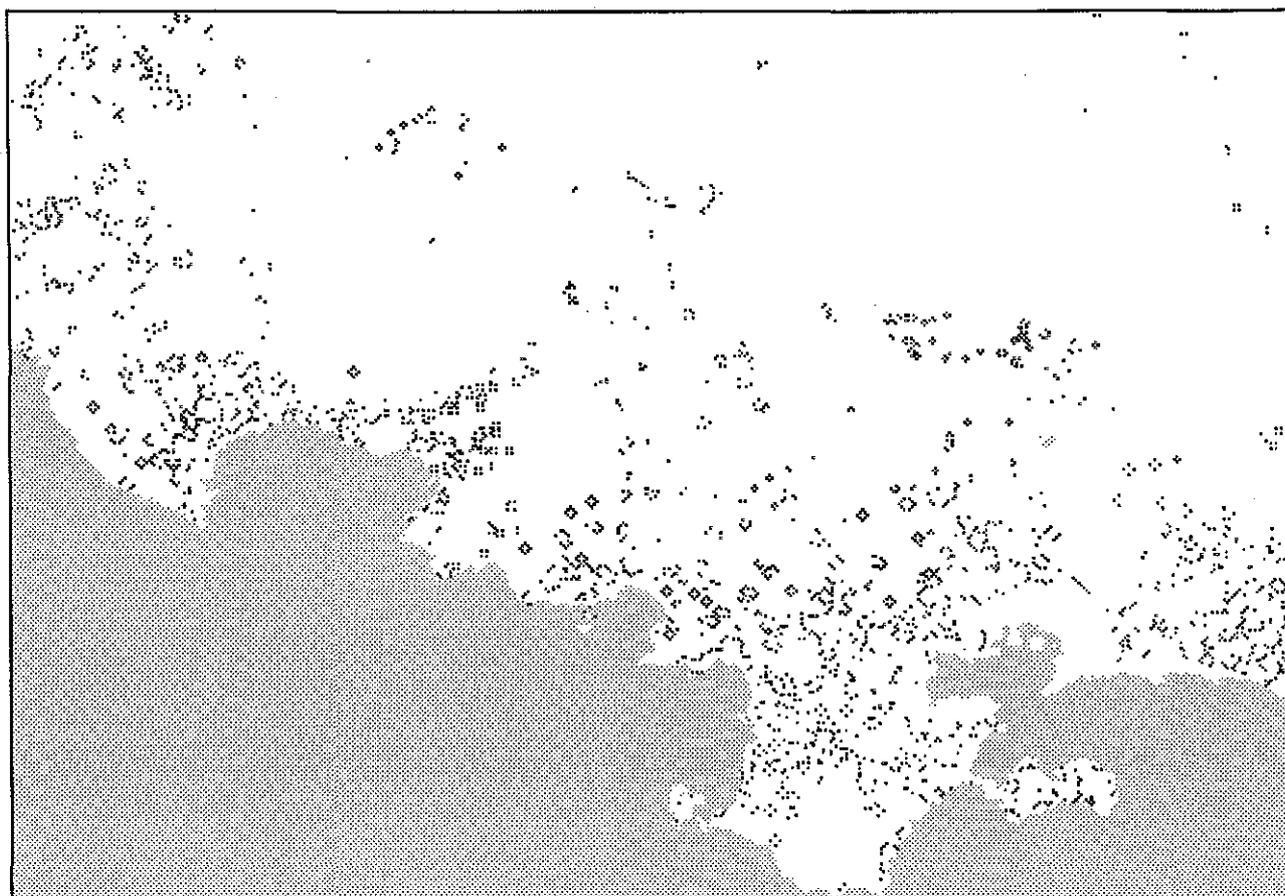


Figure 7.23 : Image présentant les surfaces des différents types d'occupation des sols acquises par le milieu urbain entre les années 2000 et 2025 pour le scénario A2.

7.7 . Conclusion

La méthode présentée dans ce chapitre essaie de simuler le mieux possible l'évolution du milieu urbain au cours d'une longue période. Des images satellitaires intégrées à un Système d'Information Géographique ont été utilisées afin de donner un point de départ, étalonner et contraindre le modèle numérique de diffusion sélectionné pour décrire l'extension du milieu urbain.

Cette méthode démontre la possibilité de lier un Système d'Information Géographique et un modèle numérique afin d'entreprendre différentes études telles que la simulation du milieu urbain. De plus, cette étude n'a nécessité que des outils informatiques peu onéreux puisqu'elle a été effectuée sur micro-ordinateur.

Le but de cette étude est principalement méthodologique. Le modèle numérique est simple et ne tient compte que de quelques facteurs. Mais, d'un point de vue méthodologique, il est très facile de rajouter de nouveaux facteurs. Les radiomètres des nouveaux satellites tels que SPOT ou Landsat 4 offrent maintenant une résolution spatiale de 20 m au sol pour une surface globale assez importante. Cependant, même avec une telle résolution, la modélisation de l'extension du milieu urbain n'est pas évidente, car de nombreux paramètres ayant une influence sur cette extension ne peuvent être définis précisément sur une surface égale à 20 m x 20 m. La résolution spatiale est trop petite pour définir de façon précise des paramètres macro-économiques, et elle est trop grande pour pouvoir utiliser des paramètres tels que les revenus par foyer, les logements, les commerces, etc. En fait, la zone de notre étude correspond à une partie de scène du satellite Landsat avec une résolution de 80 m x 80 m, et aucun modèle d'évolution du milieu urbain n'a pu être trouvé à cette échelle.

Il y a bien sûr des différences entre les images provenant des satellites et celles dérivées de la simulation comme le montre la comparaison entre ces deux types d'image pour l'année 1981. Le milieu urbain résultant d'une classification est disséminé sur l'image, alors qu'il est continu sur les images simulées du fait du modèle numérique qui est un modèle de diffusion continue, sans diffusion au hasard ou percolation.

Enfin, les images résultats obtenues pour les années 2000 et 2025 sont sûrement incorrectes (rendez-vous dans 37 ans !), mais elles indiquent quand même une tendance évolutive du milieu urbain.

CHAPITRE 8

Conclusions générales

et

perspectives

Le travail présenté dans cette thèse s'intègre dans l'étude des Systèmes d'Information Géographique.

Dans un premier temps, nous avons présenté les deux différents types de Systèmes d'Information Géographique que l'on peut trouver dans la bibliographie. Le premier concerne des SIG dont l'extension spatiale est nationale, voire internationale. Ceci nécessite des moyens d'acquisition, de traitement et de distribution de l'information très élaborés, et souvent très onéreux. Le second type est restreint à une zone de plus faible surface, et est créé pour les besoins d'une étude précise. De ce fait, les moyens informatiques nécessaires à la réalisation de ce SIG sont plus modestes. Nous n'avons que brièvement parlé des SIG concernant de vastes zones. Notre étude a surtout consisté à présenter la structure et les utilisations possibles de tels outils cartographiques.

Les SIG que nous avons élaborés entièrement ou partiellement, ont tous une structure commune : la structure multi-couches. Chaque couche a également une structure de l'information commune : la maille régulière de pixels ou tableau de pixels. Cette structure permet de localiser très précisément les informations d'une couche. Afin que les différentes couches d'information soient en coïncidence géographique les unes par rapport aux autres, une étape de rectification géométrique par rapport à une projection cartographique donnée est souvent nécessaire. Chacun des trois SIG que nous avons étudiés a été utilisé dans une étude précise : une étude d'impact, une étude de synthèse cartographique et une étude d'évolution de l'extension du milieu urbain.

La première étude est localisée dans le Parc National du Mercantour. Cette étude consistait à étudier la faisabilité de projets d'extension de pistes de ski de fond. Ces projets devaient permettre de relier des pistes existant dans le fond de la vallée à des pistes sur des plateaux situés en amont. Pour cette étude, nous avons utilisé quatre thèmes physiques et un thème technique présents dans le SIG. Chaque thème a été seuillé de façon à faire apparaître deux variantes de part et d'autre du seuil : la variante VRAI et la variante FAUX. La VRAI correspondait à des zones favorables à la construction de pistes de ski, alors que la variante FAUX montrait les zones défavorables. Pour cette étude, une méthode dite de série de tamis à mailles bouchées a été utilisée. Dans cette méthode, chaque thème est considéré comme un tamis au travers duquel ne passent que les informations VRAI. Le résultat de ce traitement fait apparaître les zones favorables aux projets de pistes de ski. Il montre que seul un des projets est réalisable à condition d'effectuer quelques aménagements. Pour parfaire l'étude

d'impact, nous avons étudié l'impact d'un tel projet sur les grands ongulés vivants dans le Parc. Nous avons alors utilisé deux thèmes biologiques liés aux zones potentielles de ces ongulés. Le résultat montre que le projet sélectionné créerait des nuisances importantes vis à vis de ces ongulés.

Cette étude d'impact montre qu'il est possible et aisé d'entreprendre de telle étude à partir d'un SIG. Néanmoins, pour approfondir l'étude, il serait utile d'intégrer au SIG des thèmes plus pertinents concernant les problèmes techniques intervenant dans l'élaboration de tels projets, mais aussi les nouveaux aménagements à envisager (augmentation de la surface des espaces de stationnement par exemple) si le réseau de pistes de ski augmentait.

La seconde étude s'intéresse aux peuplements benthiques et types de fond de la Méditerranée. Cette étude a permis de créer un SIG à structure multi-couches mais aussi multi-secteurs (8 secteurs jusqu'à présent) permettant ainsi d'élargir la zone du SIG. Les informations présentes dans ce SIG sont toutes thématiquement identiques, c'est-à-dire traitent toutes du même thème : les peuplements benthiques. La nécessité d'une synthèse cartographique vient du fait que chaque couche du SIG représente une carte d'âge différent et/ou d'échelle différente et/ou cartographiée à l'aide de techniques différentes. De ce fait, nous avons considéré la cartographie des peuplements benthiques comme un processus stochastique masquant une évolution naturelle des peuplements, et où chaque couche du SIG est la représentation de ce processus. Afin de synthétiser ces informations, nous avons attribué à chaque point de chaque carte une fiabilité dépendant de l'âge de la carte et des techniques de prélèvement. Deux méthodes de synthèse cartographique utilisant toutes deux les fiabilités ont été mises au point. La première utilise une méthodologie calculant un histogramme en chaque pixel sur les différentes couches. La seconde, plus complexe, utilise le concept d'ensemble flou, et chaque peuplement benthique présent dans le SIG est considéré comme un ensemble flou. Chacune de ces deux méthodes crée deux types de cartes : les cartes de synthèse et les cartes des désaccords. Les cartes de synthèse montrent en chaque pixel l'information la plus fiable dans la série de cartes. La première méthode permet de créer une carte de synthèse faisant apparaître la totalité des peuplements, alors que la seconde méthode nous permet de choisir les thèmes sur lesquels la synthèse doit s'appliquer. Il en est de même pour les cartes des désaccords. La première méthode crée une carte des désaccords montrant seulement trois types de désaccord. La seconde méthode est plus riche en information car elle permet de montrer jusqu'à 253 types de désaccord correspondant aux désaccords de chaque taxon vis à vis des autres.

Une évolution de cette méthode serait de créer un système-expert permettant de supprimer l'étape d'attribution des fiabilités. La création d'un tel système mettrait en jeu une

série de lois telles que des lois de proximité ou d'incompatibilité entre les peuplements, et/ou des lois liant peuplements et profondeur. Ces lois seraient la base de données du système-expert. Cette base serait utilisée par un moteur d'inférence dans lequel seraient définis des prédicats permettant de réaliser des assertions sur les informations à intégrer dans la carte de synthèse. De plus il paraît intéressant de lier le concept d'ensemble flou et de système expert car tout deux travaillent sur des prédicats vagues.

La dernière étude de ce travail intègre un Système d'Information Géographique dans un modèle numérique d'évolution de l'extension du milieu urbain. Le modèle numérique choisi pour effectuer cette simulation est un modèle de type diffusion de propriété. Du fait des données contenues dans le SIG, ainsi que de sa résolution spatiale (80 m x 80 m), les modèles que nous avons rencontrés dans la bibliographie ne pouvaient être utilisés. Le modèle sélectionné est composé de trois membres : un opérateur Laplacien simulant l'extension, un coefficient de diffusion simulant les contraintes à l'avancement du milieu urbain et un terme source simulant l'apport exogène de population. Le terme Laplacien utilise comme données de concentration, la densité de population par pixel d'urbain. Afin d'arriver à ces données de densité, nous avons effectué une classification supervisée par table de Hash à partir des informations datant du 19 juillet 1976, provenant de trois canaux du satellite Landsat 1. Elle permet de faire apparaître les zones de milieu urbain. Puis nous avons appliqué à ce milieu urbain les informations concernant le recensement de 1975 effectué par l'INSEE, créant ainsi le fichier initial de densité de population par pixel. Le coefficient de diffusion a été calculé en chaque pixel par une méthode de moyenne, pondérée et conditionnée, des coefficients partiels de chacun des sept thèmes de contrainte choisis dans le SIG. Le terme source a pris comme valeurs celles données par l'INSEE entre les années 1976 et 1985, et a ensuite pris deux valeurs prédictives correspondant à deux scénarios d'évolution. Afin de parfaire la présente étude, nous avons effectué une classification, identique à la précédente, sur des données datant du 16 octobre 1981 du satellite Landsat 3. En effet, celle-ci, par comparaison avec le résultat de la simulation pour cette année-là, permet d'étalonner le modèle numérique. Les résultats de cette étude se présentent sous forme d'images aux années 2000 et 2025 où apparaissent les zones urbaines. Une comparaison entre ces zones et la classification de l'occupation des sols de 1976 montre quels sont les types d'occupation des sols envahis par ce milieu urbain.

Cette étude montre la possibilité de coupler un SIG avec un modèle numérique d'évolution, et d'étudier l'extension du milieu urbain grâce à un Système d'Information Géographique.

A travers ces trois exemples différents, nous venons de constater que les Systèmes d'Information Géographique peuvent être utilisés dans un grand nombre d'études mettant en oeuvre des informations aussi bien satellitaires, que cartographiques, que statistiques. Il est bien évident que la construction du SIG lui-même est l'étape nécessitant le plus de temps.

Comme nous l'avons déjà signalé, un Système d'Information Géographique est constitué d'un ensemble d'informations et d'un ensemble d'outils permettant une gestion performante des informations. Cet ensemble d'informations seul peut être nommé banque de données cartographiques. Même si une telle banque est le plus souvent créée pour une étude spécifique, les informations qu'elle contient peuvent être utilisées dans d'autres études. C'est le cas pour la banque de données cartographiques que nous avons utilisée pour l'étude de l'évolution du milieu urbain sur la région de Toulon - La Ciotat. En effet, cette banque a initialement été créée pour l'étude des feux de forêt de cette région. La reprise de ses informations ainsi que l'apport de nouvelles informations plus spécifiques à l'étude d'évolution a permis de créer un SIG.

Ces constatations nous permettent de montrer que les informations d'une banque de données cartographiques peuvent être utilisées pour différentes études, et même être intégrées à un SIG. Cette intégration peut par exemple être effectuée entre les informations utilisées pour l'étude d'évolution et celles utilisées pour la synthèse cartographique des peuplements benthiques. En effet, la situation géographique des deux zones d'étude étant dans l'ensemble la même, un simple changement de résolution spatiale d'un des deux ensembles d'informations permettrait cette fusion.

Une évolution intéressante dans la gestion des SIG serait l'utilisation des outils proposés par l'Intelligence Artificielle afin de créer des structures conversationnelles rendant l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique beaucoup plus conviviale, et donc ouverte à des utilisateurs néophytes.

LISTE

DES

ILLUSTRATIONS

<u>figures</u>	<u>légende</u>	<u>pages</u>
figure 2.1 :	Conceptualisation d'un système expert d'information géographique <i>In</i> Ripple et Ulshoefer, 1987.	11
figure 2.2 :	Format dit de la maille régulière de pixel.	13
figure 3.1 :	Constitution d'un Système d'Information Géographique <i>In</i> Giraud (Communication personnelle).	20
figure 3.2 :	Structure multi-couches des Systèmes d'Information Géographique utilisés dans ce travail.	23
figure 4.1 :	La zone encadrée est la zone couverte par le SIG utilisé pour l'étude d'impact. Elle est située dans la partie est du Parc National du Mercantour.	26
figure 4.2 :	Tracé des projets de pistes de ski de fond. Les projets A et B sont au fond de la vallée. Les quatre projets de liaison sont les projets C, D, E et F.	28
figure 4.3 :	Schéma de planification écologique.	29
figure 4.4 :	Série de tamis à maille bouchées ou non. Les mailles bouchées sont représentées en noir. Sur l'image résultat, il n'apparaît que les informations ayant traversé la série de tamis.	32
figure 4.5 :	Image résultat du traitement par série de tamis montrant les zones favorables aux pistes de ski (zones noires) et les zones défavorables (zones blanches).	34
figure 4.6 :	Croisement des thèmes "indice de présence pour un enneigement faible" et "tracé des pistes de ski de fond".	34
figure 4.7 :	Croisement des thèmes : "tracé des pistes de ski de fond" et "propositions d'amélioration cynégétique".	35
figure 5.1 :	Carte indiquant la situation géographique de la zone étudiée.	38
figure 5.2 :	La carte délimite les huit secteurs que nous avons créés sur la zone d'étude.	42
figure 5.3 :	Carte de synthèse du secteur 1 obtenue avec la première méthode.	51 ¹
figure 5.4 :	Carte des désaccords du secteur 1 obtenue avec la première méthode.	51 ¹

figure 5.5 :	Schéma montrant comment se produisent des aberrations dans la carte de synthèse à cause de la disparité de la zone couverte par chaque carte. Celle présentée ici est due à la superposition d'une carte à fort crédit, où la bande littorale cartographiée en "DC" est étroite et n'inclut que partiellement une zone de "SGCF" située plus au large et cartographiée sur une autre carte de crédit inférieur.	52
figure 5.6 :	Carte de synthèse sur les classes obtenue avec la seconde méthode.	56
figure 5.7 :	Carte de synthèse sur les groupes obtenue avec la seconde méthode.	56
figure 5.8 :	Carte des désaccords entre les classes obtenue avec la seconde méthode.	57
figure 5.9 :	Carte des désaccords entre les groupes obtenue avec la seconde méthode.	57
figure 6.1 :	Carte de l'occupation des sols réalisée à partir des données des trois canaux MSS 4, 5 et 7 du satellite Landsat 1 acquises le 19 juillet 1976.	65
figure 6.2 :	Carte de l'occupation des sols réalisée à partir des données des trois canaux MSS 4, 5 et 7 du satellite Landsat 3 acquises le 16 octobre 1981.	66
figure 6.3 :	Cette image montre les zones de milieu urbain isolées à partir de la classification de 1976 (fig. 6.1). Le compte numérique est celui de la densité de population par pixel de la commune considérée.	69
figure 7.1 :	Les trois phases du projet Plan Bleu.	72
figure 7.2 :	Imagette synthétique créée pour tester le modèle numérique. La zone blanche a pour compte numérique 100, la zone grise 50 et la zone noire 0.	84
figure 7.3 :	Série de dix imagettes montrant l'évolution des trois codes de l'imagette de départ (première imagette). La dernière imagette est le résultat après 100 pas de temps.	85
figure 7.4 :	Les deux histogrammes présentés ci-dessus correspondent aux histogrammes de la première imagette et de la dernière imagette. On constate que les valeurs intermédiaires aux trois modes de départ sont apparues, traduisant ainsi le phénomène de diffusion.	86
figure 7.5 :	Image des contraintes dues à la pente.	90
figure 7.6 :	Image montrant les contraintes dues à l'exposition des pentes.	92
figure 7.7 :	Image des contraintes dues aux régimes de propriété forestière.	94
figure 7.8 :	Image présentant les contraintes dues à l'éclosion des feux.	96

figure 7.9 :	Image présentant les contraintes dues à la présence de citernes de la Défense des Forêts Contre les Incendies.	98
figure 7.10 :	Image des contraintes dues aux types d'occupation des sols.	100
figure 7.11 :	Image présentant les contraintes dues aux voies de communication.	103
figure 7.12 :	Image montrant les contraintes finales ; l'histogramme ci-dessus est celui associé à cette image.	106
figure 7.13 :	Résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 1985.	112
figure 7.14 :	Coupe effectuée au travers d'une zone urbaine aux années 1976 (a) et 1981 (b).	111
figure 7.15 :	Cette image montre la surface de milieu urbain gagnée sur chacun des quatre thèmes retenus et pour l'année 1985.	113
figure 7.16 :	Image résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 2000 et le scénario T1.	116
figure 7.17 :	Image résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 2000 et le scénario A21.	117
figure 7.18 :	Image montrant les types de zones acquises par le milieu urbain entre les années 1985 et 2000 pour le scénario T1.	118
figure 7.19 :	Image montrant les types de zones acquises par le milieu urbain entre les années 1985 et 2000 pour le scénario A2.	119
figure 7.20 :	Image résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 2025 et le scénario T1.	122
figure 7.21 :	Image résultat de la simulation de l'extension du milieu urbain pour l'année 2025 et le scénario A2.	123
figure 7.22 :	Image montrant la surface des différents types d'occupation des sols acquises par le milieu urbain entre les années 2000 et 2025 pour le scénario T1.	124
figure 7.23 :	Image montrant la surface des différents types d'occupation des sols acquises par le milieu urbain entre les années 2000 et 2025 pour le scénario A2.	125

<u>tableaux</u>	<u>légende</u>	<u>pages</u>
tableau 4.1 :	Thèmes présents dans le système d'Information Géographique du Parc National du Mercantour (au total 31 cartes).	27
tableau 5.0 :	a) Codes chiffrés décrivant les vingt-trois classes de peuplements benthiques ; b) légende des figures 5.3 et 5.5 ; c) légende de la figure 5.7.	51
tableau 5.1 :	Ce tableau indique quelques valeurs repères des coefficients de fiabilité et leurs significations. Des valeurs intermédiaires sont utilisées pour les cas intermédiaires.	47
tableau 5.2 :	Codes des types de conflit possible entre classes (a) et entre groupes (b).	55
tableau 6.1 :	Gain et ordonnée à l'origine permettant la correction atmosphérique des canaux MSS 4, 5 et 7 du satellite Landsat.	63
tableau 7.1 :	Liste thématique des informations contenues dans le SIG.	75
tableau 7.2 :	Résultats de l'augmentation entre 1976 et 1985.	111
tableau 7.3 :	Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 1985.	111
tableau 7.4 :	Résultats de l'augmentation entre 1985 et 2000 pour le scénario T1.	114
tableau 7.5 :	Résultats de l'augmentation entre 1985 et 2000 pour le scénario A2.	115
tableau 7.6 :	Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 2000 et le scénario T1.	115
tableau 7.7 :	Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 2000 et le scénario A2.	115
tableau 7.8 :	Résultats de l'augmentation entre 2000 et 2025 pour le scénario T1.	120
tableau 7.9 :	Résultats de l'augmentation entre 2000 et 2025 pour le scénario A2.	121
tableau 7.10 :	Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 2025 et le scénario T1.	121
tableau 7.11 :	Evolution de la surface en pourcentage pour chaque thème sélectionné pour l'année 2025 et le scénario A2.	121

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Adam de Villiers - Demarcq C., 1985. Utilisation géologique du traitement d'image appliqué aux modèles numériques de terrain. Exemples du Nord-Limousin et du Plateau de Millevaches. Thèse Doct. 3^{ème} cycle, *Ecole Nat. Sup. Mines Paris et Univ. Nice* : 147 p.

Albinet G., Searby G. et Stauffer D., 1986. Fire propagation in a 2-D random medium. *J. Physique*, 47 : 1-7.

Albuisson M. et Monget J.M., 1978. Méthodes et moyens utilisés pour la mise en forme de données de satellites de télédétection : application à la cartographie thermique. In : Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Journées nationales d'études - Brest - 1978. *Publi. Sci. Tech. CNEXO* : Actes Colloq. 5 : 181-202.

Allen P.M. et Sanglier M., 1981. Urban evolution, self-organisation, and decision making. *Environment and Planning A*, 13 (2) : 167-183.

Arnberg W. et Österlund H., 1987. Use of a low-cost GIS for the extracting areas for energy forestry. *Int. J. Imag. Rem. Sens. IGS*, 1 (1) : 57-67.

Ballard K.P., 1983. The structure of a large-scale small area multiregional model of California : modelling an integrated system of urban, suburban and rural growth. *Regional Studies*, 17 (5) : 327-338.

Bardinet C., Bossut P., Monget J.M. et Albuisson M., 1986. Multi-satellite thematic mapping and integration of multidisciplinary data through hash coding analysis. COGEO DATA-IUGS *Int. Coll. on the Construction and Display of Geoscientific Maps Derived from Data Bases*, 2-4 Dec. 1986, Dinkelsbuehl. R.F.A..

Bartholin F., 1987. Essai de synthèse numérique cartographique sur les biocénoses littorales. Conception d'un logiciel de comparaison de synthèse. (Rapport de stage de 1^{ère} année - MST Mer). *Rapport interne Ecole Nat. Sup. Mines Paris CTAMN/87/R/08*, Août 1987 : 38 p.

Bianchi B., 1988. Traitement d'images satellitaires appliqué à la cartographie numérique quantitative de la circulation océanique superficielle. Thèse Doct., *Ecole Nat. Sup. Mines Paris et Univ. Nice* : 149 p.

Bossut P., 1986. Analyse des données : application à l'analyse automatique d'images multispectrales. Thèse Doct. Ingénieur, *Ecole Nat. Sup. Mines Paris* : 290 p.

Boudouresque C.F. et Meineisz A., 1982. Découverte de l'herbier de Posidonie, *Cah. Parc Nat. Port-Cros*, 1 (3) : 1-80.

Brotchie J.F., 1982. Modelling diversity, choice, costs and benefits in urban activity patterns. *Regional Studies and Urban Economics*, 12 (3) : 387-403.

Cano B., 1987. Télédétection spatiale à haute résolution et système d'informations géocodées sur l'environnement. Exemples d'applications et de gestion dans le cadre d'un espace protégé : le Parc National du Mercantour. Thèse Doct. Ingénieur, *Univ. Aix-Marseille III* : 201 p.

Chrisman N. et Frank A., 1987. Efficient digitizing through the combination of appropriate hardware and software for error detection and editing. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (3) : 265-277.

- Coppock T. et Anderson E., 1987.** Editorial review. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (1) : 3-11.
- Dauphine A., Hocquart D., Ottavi M. et Ranaudat J., 1980.** Formes et diffusion dans l'environnement péri-urbain. *Analyses spatiales quantitatives et appliquées*, 10 : 1-62.
- Giraud A., 1983.** Réflexions méthodologiques sur la mise en place d'un système d'information géographique sur l'environnement (le haut vallon de Molières, Parc National du Mercantour). Thèse Doct., *Univ. Nice* : 118 p.
- Giraud A., Manière R et Monget J.M., 1983.** Un système d'aide à la recherche et à la décision appliqué à la gestion des milieux naturels : mise en place et fonctionnement d'une banque de données cartographiques de l'environnement (projet Molières). Annexe : carte des principaux faciès paysagers ; la végétation du Haut Vallon de Molières, au 1/25 000, Parc National du Mercantour. *Ecologia Mediterranea*, 9 (1) : 101-137.
- Jeuzy de Grissac A., Meinesz A., Boudouresque C.F., Astier J.M., Bourcier M. et Lefèvre J.R., 1986.** Notice d'utilisation des cartes IPLI au 1/25 000 (région Provence Alpes Côte-d'Azur) : herbiers de Posidonies. *Ministère de l'Environnement, Délégation Régionale à l'Architecture et à l'Environnement Provence Alpes Côte-d'Azur et GIS Posidonies* : 126 p.
- Kaufmann A., 1977.** *Introduction à la théorie des sous-ensembles flous*. Ed. Masson (3 volumes).
- Kellerman A. et Krakover S., 1986.** Multi-sectoral urban growth in space and time : an empirical approach. *Regional Studies*, 20 (2) : 117-129.
- Laurent J.L., 1983.** La carte des faciès paysagers du Parc National du Mercantour. Déc. 1983.
- Laurent J.L., 1984.** Une description cartographique des biotopes de la faune de montagne : base pour une étude de leur fréquentation. *Acta. biol. mont.*, 4 : 315-323.
- Logan T. et Bryant N., 1987.** Spatial data software integration : merging CAD/CAM/Mapping with GIS and Image Processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (10) : 1391-1395.
- McCammon R.B., Botbol J.M., Sinding-Larsen R. et Bowen W., 1983.** Characteristic Analysis - 1981 : final program and a possible discovery. *Mathematical Geology*, 15 (1) : 59-83.
- Matheron G., 1970.** La théorie des variables régionalisées, et ses applications. *Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique DE FONTAINEBLEAU, édité par l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris*, 5 : 212 p.
- Maurer W.D., 1968.** An improved Hash code for scatter storage. *Comm. Acm.*, 11 (1) : 35-37.
- Méaille R., 1986.** Gestion critique d'une banque de données informatisées de cartes de peuplements benthiques de Méditerranée ; conception d'un logiciel de synthèse cartographique. (Mémoire de DEA - Océanologie). *Rapport interne Ecole Nat. Sup. Mines Paris CTAMN/86/R/09* : 44 p.

- Meinesz A. et Laurent R., 1982.** Cartes de la végétation sous-marine des Alpes-Maritimes (côtes françaises de la Méditerranée). I : limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans le Golfe Juan et à l'Est des îles de Lerins, *Ann. Inst. Océanogr.*, 58 (1) : 103-112.
- Monget, 1986.** Cours de télédétection. *Rapport interne Ecole Nat. Sup. Mines Paris CTAMN/86/R/16* (2 volumes).
- Niemann B., Sullivan J., Ventura S., Chrisman N., Vonderohe A., Mezera D. et Moyer D., 1987.** Results of Dane County Land Records Project. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (10) : 1371-1378.
- Pérès J.M. et Picard J., 1964.** Bionomie en fonction de la géomorphologie sous-marine dans la région de Cassis (Bouches-du-Rhône), *Rec. Trav. Stn. Mar. Endoume*, 8 (13) : 3-8.
- Prade H., 1982.** Modélisation mathématique de l'imprécis et de l'incertain en vue d'application au raisonnement naturel. Thèse de Doctorat d'Etat, *Univ. Paul Sabatier, Toulouse* : 66-168.
- Ripple W. et Ulshoefer V., 1987.** Expert systems and spatial data models for efficient geographic data handling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (10) : 1423-1430.
- Robinson V. et Frank A., 1987.** Expert systems for Geographic Information Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (10) : 1435-1441.
- SETRA, 1975.** Guide Environnement Paysage : études d'environnement des autoroutes de liaisons et des aménagements routiers de même nature : éléments d'information et première approche méthodologique pour l'étude des effets des aménagements autoroutiers sur leur environnement immédiat. *Ministère de l'Équipement, Direction des routes et de la circulation routière* : 41 p.
- Shasby M., Burgan R. et Johnson G., 1981.** Broad area forest fuels and topography mapping using digital Landsat and terrain data. *Proc. of the Seventh Annual Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue Univ., Lafayette, Indiana* : 529-538.
- Shupeng c., 1987.** Geographical data handling and GIS in China. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (3) : 219-228.
- Sinding-Larsen R., Botbol J.M. et McCammon R.B., 1979.** Use of weighted characteristic analysis as a tool in resource assessment. *Evaluation of uranium research proceedings of the advisory group meeting, International atomic research agency, Vienna* : 275-285.
- Smith A. et Blackwell R., 1980.** Development of an information data base for watershed monitoring. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46 : 1027.
- Smith T., Menon S., Star J. et Estes J., 1987.** Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (1) : 13-31
- Steinitz C. et Brown H.J., 1981.** A computer modeling approach to managing urban expansion. *Geo-Processing*, 1 : 341-375.

- Steinnes D., 1982.** Suburbanisation and the "mailing of America" : a time-serie approach. *Urban Affairs Quaterly*, 17 (4) : 401-418.
- Tomlinson R., 1987.** Current and potential uses of geographical information systems : the North American experience. *Int. J. Geographical Information Sytems*, 1 (3) : 203-218.
- Wald L., 1987.** An assessment of the use of satellite remote sensing for the quantitative mapping of the forest biomass. A case study : The project LEBEN-Abruzzo. *Biomass for Energy and Industry*. Ed. Grassi, Delmon, Molle and Zibetta, Elsevier Applied Science : 525-530.
- Wald L., 1988.** An assessment of the use of satellite remote sensing for the quantitative mapping of the forest biomass. A case study : The project LEBEN-Abruzzo. Final report. Contract CEC/ARMINES n EN3B-0017-F (CD). *Rapport interne Ecole Nat. Sup. Mines Paris CTAMN/88/R/03* : 82 p.
- Walsh S., Lightfoot D. et Butjer D., 1987.** Recognition and assessment of error in Geographic Information Systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (10) : 1423-1430.
- Williams D., Nelson R. et Dottavio C., 1985.** A georeferenced Landsat digital database for forest insect damage assessment. *Int. J. Remote Sensing*, 6 (7) : 643-656.
- Yu Z., 1987.** Reconnaissance automatique des formes appliquée à la géologie structurale. Thèse Doct., *Ecole Nat. Sup. Mines Paris et Univ. Nice*, 210 p.
- Zadeh L.A., 1965.** Fuzzy sets. *Inform. and Control*, 8 : 338-353.

BIBLIOGRAPHIE

Andersson S., 1987. The Swedish land data bank. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (3) : 253-263.

Augier J.M., 1982. La cartographie biocénotique répétitive à grande échelle et à repérage métrique pour l'étude fine de l'évolution des peuplements marins benthiques. Application dans l'île de Porquerolles (Méditerranée, France). *Trav. sci. Parc Nation. Port-Cros*, 8 : 11-18.

Batson R., 1987. Digital Cartography of the Planets : New Methods, Its Statut, and Its Future. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (9) : 1211-1218.

Bellan G., Arnoux A., Bellan-Santini D., Boudouresque C.F., Bourcier M., Harmelin J.G., Picard J., Salen C. et Stora G., 1980. Cartographie dynamique de milieux marins littoraux soumis à des pollutions telluriques et à des aménagements par l'homme. *Rapport sur le benthos I et II, A.S.P. PIREN, CNRS, Paris* : 43 p.

Blanc, 1975. Recherches de sédimentologie appliquée au littoral rocheux de la Provence. Aménagement et protection. *Centre National pour l'Exploitation des Océans et Laboratoire de Géologie marine et Sédimentologie appliquée de l'Université d'Aix-Marseille II* : 164 p.

Blanc, 1977. Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à Posidonies du littoral de la Provence, *CNEXO, Paris* : 154 p.

Bourcier M., 1980. Evolution récente des peuplements macrobenthiques entre La Ciotat et Les Embiez (côtes de Provence). Processus de contamination du benthos entre bassins côtiers voisins. *Téthys*, 9 (3) : 197-206.

Bourcier M., Nodot C., Jeudy de Grissac A. et Tine J., 1979. Répartition des biocénoses benthiques en fonction des substrats sédimentaires de la rade de Toulon, *Téthys*, 9 (2) : 103-112.

Chauvet A., 1981. Autour des grandes villes : des petites communes en expansion. *Sud Information Economique Provence-Alpes-Côtes-d'Azur*, 48 : 20-22.

Cuvelier M., 1976. Surveillance en temps réel de l'évolution des herbiers : nouvelle méthode de recensement des herbiers par cartographie au sonar latéral. *Journée Etudes Pollutions, Split*, CIESM éd., Monaco, 3 : 191-193.

Cuvelier-Kareth M., 1979. La cartographie des herbiers de Phanérogames marines par télédétection acoustique. Thèse Doct. 3^{ème} cycle, *Univ. Paris VI* : 163 p.

Dezert B., Beaucire F. et Steinberg J., 1983. La cartographie péri-urbaine. *Cahier du CREPIF*, 3 : 83-87.

Edwards C., 1987. Geometric Processing of Digital Images of the Planets. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (9) : 1219-1222.

Ettlinger N., 1981. Dependancy and urban growth : a critical review and reformulation of the concept of primacy and rank-size. *Environment and Planning A*, 13 (11) : 1389-1400.

Fournier S., 1984. La dynamique de la croissance urbaine d'une ville moyenne française : le modèle CARPE. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 1 : 67-94.

Giraud G., 1980. Synthèse cartographique des herbiers de Posidonies (*Posidonia oceanica*) entre Fos-sur-Mer et la rade d'Hyères. *Direction des Constructions et Armes Navales et Lab. Biol. Vég. Mar., Fac. Sci. Luminy, Aix-Marseille II* : 16 p.

Goodchild M. et Rizzo B., 1987. Performance evaluation and work-load estimation for geographic information system. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (1) : 67-76.

Johnson K., 1987. Natural resource modeling in the Geographic Information System Environment. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (10) : 1411-1415.

Keating T., Phillips W. et Ingram K., 1987. An integrated topologic database design for Geographic Information System. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (10) : 1399-1402.

Kubo S., 1987. The development of geographical information systems in Japan. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (3) : 243-252.

Manière R., 1985. Etude de l'évolution récente à diverses échelles de l'occupation des sols d'une zone littorale méditerranéenne fragilisée : Toulon - Aubagne. *CNRS - ATP n 309/83* : 21 p.

Méaille R., 1987. Conception de méthodes intégrés d'élaboration de scénarios de développement/environnement - Rapport final -. Conv. CAR-PB/ARMINES du 08.11.85. *Rapport interne Ecole Nat. Sup. Mines Paris CTAMN/87/R/09* : 132 p.

Meinez A., Cuvelier M. et Laurent R., 1981. Méthodes récentes de cartographie et de surveillance des herbiers de Phanérogames marines. Leurs applications sur les côtes françaises de la Méditerranée. *Vie Milieu*, 31 (1) : 27-34.

Meinez A., Boudouresque C.F., Falconetti C., Astier J.M., Bay D., Blanc J.J., Bourcier M., Cinneli F., Cirik S., Cristiani G., Di Geronimo I., Giaccone G., Harmelin J.G., Laubier L., Lovric A., Molinier R., Soyer J. et Vamvakas C., 1983. Normalisation des symboles pour la représentation et la cartographie des biocénoses benthiques littorales de Méditerranée. *Ann. Inst. Océanogr.*, 59 (2) : 155-172.

Nodot C., Astier J.M., Tailliez P. et Tine J., 1978. Etude d'impact des aménagements littoraux du Mourillon sur l'herbier de *posidonia oceanica* de la rade des Vignettes (Toulon, Var). *Ann. Soc. Sci. Nat. Archéol. Toulon, Var*, 30 : 118-1133.

Nodot C., Bourcier M., Jeudy de Grissac A., Heusner S., Régis J. et Tine J., 1984. Répartition des biocénoses benthiques en fonction des substrats sédimentaires de la rade de Toulon (France). 2 : La Grande Rade, *Téthys*, 11 (2) : 141-153.

- Picard J., 1978.** Impact sur le benthos marin de quelques grands types de nuisances liées à l'évolution des complexes urbains et industriels de la Provence occidentale. *Oceanis*, 4 (3) : 214-251.
- Picard J. et Bourcier M., 1976.** Evolution sous influences humaines des peuplements benthiques des parages de La Ciotat entre 1954 et 1972. *Téthys*, 7 (2-3) : 213-222.
- Pumain D., 1982.** *La dynamique des villes*. Coll. Géographie Economique, Paris, *Economica* : 231 p.
- Rase W.D., 1987.** The evolution of a graduated symbol software package in a changing graphics environment. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (1) : 51-65.
- Rhind D., 1987.** Recent development in geographical information systems in the U.K.. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (3) : 229-241.
- Richez J., 1975.** Urbanisation et mutation d'un espace péri-urbain du pays d'Aix. *Méditerranée*, 20 : 73-80.
- Robson B.T., 1973.** *Urban growth : an approach*. Londres, Methuen : 268 p.
- Verlaque M. et Tine J., 1979.** Végétation marine de Toulon (Var, France) : Grande Rade et Rade-Abri. *Marine nationale, Bureau d'Etudes Antipollution, Toulon* : 1-83.
- Wastenson L., Alm G., Kleman J. et Wastenson B., 1987.** Swedish experiences on forest damage inventory by remote sensing methods. *Int. J. Imag. Rem. Sens. IGS*, 1 (1) : 43-52.
- Wiggins J., Hartley R., Higgins M. et Whittaker R., 1987.** Computing aspects of a large geographic information system for the European Community. *Int. J. Geographical Information Systems*, 1 (1) : 77-87.

ANNEXE 1

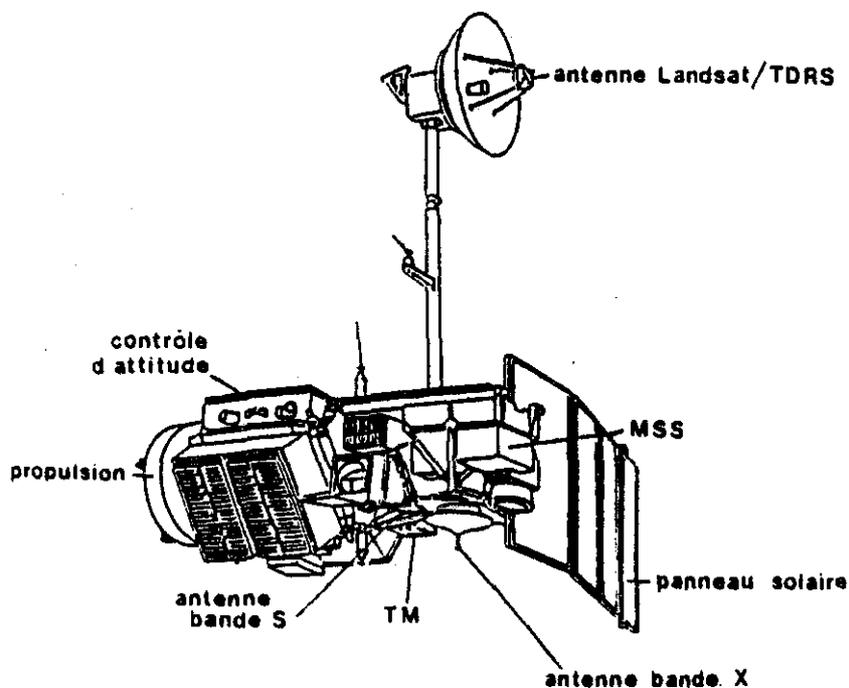
Systemes

THEMATIC MAPPER

et

MULTISPECTRAL SCANNER

Système THEMATIC MAPPER



Bandes spectrales

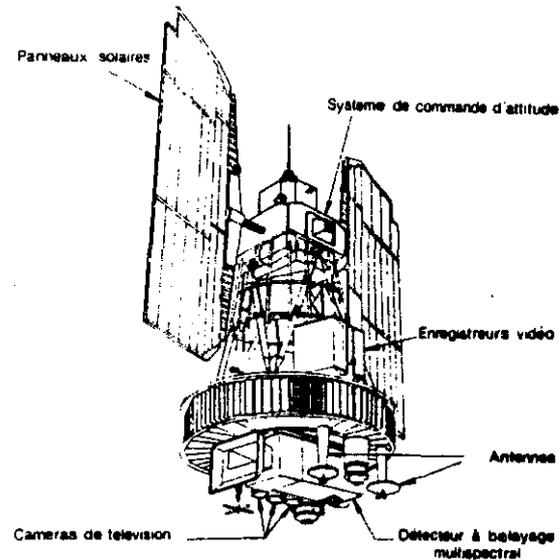
canal	domaine de longueur d'onde	sensibilité radiométrique
1	de 0,45 à 0,52 μm	0,8%
2	de 0,52 à 0,60 μm	0,5%
3	de 0,63 à 0,69 μm	0,5%
4	de 0,76 à 0,90 μm	0,5%
5	de 1,55 à 1,75 μm	1,0%
6	de 10,40 à 12,50 μm	0,5 K
7	de 2,08 à 2,35 μm	2,4%

- Champ instantané angulaire : - canaux 1 à 4 : 0,0425 mrad
- canaux 5 et 7 : 0,0438 mrad
- canal 6 : 0,170 mrad
- Champ instantané au sol, au nadir : - canaux 1 à 4 : 29,8 m
- canaux 5 et 7 : 30,7 m
- canal 6 : 120 m
- Angle de balayage au sol : 14,8°
- Fréquence des oscillations : 6,999 Hz
- Champ total d'observation au sol : 185 km
- Dimensions du pixel : canaux 1 à 5 et 7 : 30 m x 30 m
canal 6 : 120 m x 120 m
- Détecteurs : - canaux 1 à 5 et 7 : 16 par bande spectrale
- canal 6 : 4 détecteurs thermiques

Tableau 1 : Caractéristiques du capteur Thematic Mapper (In Monget, 1986).

Système MULTISPECTAL SCANNER

LANDSAT 1, 2 ET 3



- Domaines de longueur d'onde : (pour LANDSAT 1, 2 et 3)	canal 4 : 0,5 à 0,6 μm . canal 5 : 0,6 à 0,7 μm . canal 6 : 0,7 à 0,8 μm . canal 7 : 0,8 à 1,1 μm .
- Rapport signal/bruit :	canal 4 : 113 canal 5 : 86 canal 6 : 72 canal 7 : 123
- Luminance maximum à saturation :	canal 4 : 24,8 $\text{W.m}^{-2}\text{sr}^{-1}$ canal 5 : 20,0 $\text{W.m}^{-2}\text{sr}^{-1}$ canal 6 : 17,6 $\text{W.m}^{-2}\text{sr}^{-1}$ canal 7 : 46,0 $\text{W.m}^{-2}\text{sr}^{-1}$
- Champ instantané angulaire : 0,086 mrad	
- Champ instantané au sol, au nadir : 79 m	
- Angle de balayage au sol : 11,6°	
- Fréquence des oscillations : 13,62 Hz	
- Champ total d'observation au sol : 185 km	
- Dimensions du pixel : 79 m. x 56 m	

Tableau 2 : Caractéristiques du capteur MultiSpectral Scanner (In Monget, 1986).

ANNEXE 2

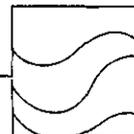
Cartes des peuplements benthiques en Méditerranée :

constitution d'une banque de données géocodées

et synthèse cartographique.

Méaille R., Wald L. et Boudouresque C.F., 1988.

Article paru dans la revue Oceanologica Acta, 1988



Cartes des peuplements benthiques en Méditerranée : constitution d'une banque de données géocodées et synthèse cartographique

Peuplements benthiques
Synthèse cartographique
Banque de données géocodées
Littoral méditerranéen
Traitement d'image
Benthic communities
Synthetic mapping
Geocoded data base
Mediterranean sea-shore
Image processing

Robert MÉAILLE ^a, Lucien WALD ^a, Charles-François BOUDOURESQUE ^b

^a Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Sophia-Antipolis, 06565 Valbonne Cedex, France.

^b Laboratoire d'Écologie du Benthos et de Biologie Végétale Marine, Université d'Aix-Marseille II, Faculté des Sciences de Luminy, Case 901, 13288 Marseille Cedex 9, France.

Reçu le 18/6/87, révisé le 24/11/87, accepté le 26/11/87.

RÉSUMÉ

Cet article relate la création d'une banque de données géocodées pour l'étude des peuplements benthiques de Méditerranée occidentale (sud-est de la France). Une méthode de synthèse cartographique est présentée et discutée ici. Les cartes relatives aux peuplements benthiques existant sur une zone de 18 km N-S par 41 km E-W, comprise entre Toulon et La Ciotat ont été rassemblées. La finalité de celles-ci étant diverse, elles présentent un grand nombre de codes décrivant les peuplements benthiques qu'il a été nécessaire de standardiser afin d'homogénéiser la banque de données.

Ensuite, ces cartes ont été numérisées, puis rectifiées géométriquement par rapport à une même projection. Après la standardisation du trait de côte, la banque de données a été créée avec un élément d'information (pixel) de 25 × 25 m. Elle se compose de sept secteurs se recouvrant partiellement et décrivant la zone totale étudiée. Ce découpage permet d'optimiser l'utilisation de la banque et la visualisation de la zone d'étude. Ensuite les différents secteurs ont été enregistrés sur un disque optique numérique relié à un micro-ordinateur.

Au sein de chaque secteur, chaque point est pondéré par un facteur dépendant essentiellement des techniques d'observation ou de cartographie bionomiques des peuplements (observation de photographies aériennes, observation directe lors de plongées en sous-marin d'exploration, résultats bionomiques d'après prélèvements par dragages) et de l'année au cours de laquelle les relevés ou prélèvements ont été réalisés. La carte de synthèse est composée des points de pondération maximale trouvés sur l'ensemble des cartes, tandis que la différence en chaque point entre le code de pondération maximale et le code de pondération immédiatement inférieure, est reportée sur la carte des « désaccords ».

Les résultats de ces traitements sont présentés. Une évolution de cette méthode de synthèse est discutée.

Oceanol. Acta, 1988, 11, 2, 201-211.

ABSTRACT

Mediterranean benthic community maps: geocoded data base and cartographic synthesis

This paper deals with the creation of a geocoded data base for the study of western Mediterranean benthic communities. A method for cartographic synthesis is also presented and discussed. Maps were collected for an area off the southeast coast of France, between Toulon and La Ciotat, measuring 18 km N-S and 41 km E-W. Once digitized by means of a digitizing table, the maps are standardized for codes as well as geometry. When replaced in an absolute frame, they are also standardized for the sea-shore line.

Finally, they are stored on an optical digital disk coupled to a micro-computer. Element sizes are 25×25 m. For display and data management convenience, the area is divided into seven sectors of smaller sizes. For each sector a synthetic map is computed as well as a map of "disagreement".

Each point of each individual map is weighted as a function both of the year during which samples were made and of the sampling techniques (airborne surveys, direct submarine observations or bionomic analyses of samples obtained by dredging). The synthetic map is composed of the most weighted values found in the set of maps. At each point, the difference between the synthetic class and the class corresponding to the maximum of the sum of the weights (modal class) is reported in the map of "disagreement".

The results are discussed and further improvements of the synthesis method are presented, making use of an expert-system.

Oceanol. Acta, 1988, 11, 2, 201-211.

INTRODUCTION

La cartographie des peuplements benthiques des côtes françaises de la Méditerranée s'effectue actuellement soit par relevés aériens (photographies aériennes), soit par relevés et prélèvements sous-marins (observations en plongées sous-marines ou sous-marins d'exploration, sonar latéral, dragages : Cuvelier, 1976; Cuvelier-Kareth, 1979; Meinesz *et al.*, 1981; Augier, 1982). De ces relevés sont tirées des cartes dont les échelles sont comprises entre 1/100 et 1/500 000.

La disparité de ces cartes est importante. En effet, leur ancienneté (de 1883 à nos jours) et leur finalité (cartes des herbiers à *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile, cartes des fonds meubles, cartes des biocénoses, *etc.*) sont très variables.

En outre, elles sont tracées dans des projections cartographiques très différentes. Certaines utilisent le fond de carte du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) en représentation de type Mercator. Quant aux cartes effectuées à partir des photographies aériennes, elles sont très souvent tracées dans la géométrie d'acquisition, et présentent donc des déformations latérales importantes ainsi qu'une échelle variable sur toute la carte. Il faut ajouter à ce constat de disparité les éventuelles distorsions géométriques dues à la copie des documents originaux.

Enfin, la délimitation des types de peuplements, ainsi que les symboles qui les représentent, ne sont pas standardisés.

Au total, plusieurs cartes (presque toujours contradictoires) peuvent généralement être trouvées pour un même site. Outre leur disparité d'âge, de finalité, de géométrie, d'échelle et de codage, soulignées plus haut, elles sont dispersées dans des revues d'accès plus ou moins facile et souvent dans des rapports difficilement localisables, de telle sorte que leur exploitation s'avère complexe.

Un certain nombre de ces cartes est reproduit par Bellan *et al.* (1980), sans tentative de synthèse critique. Dans le cas de l'herbier à *Posidonia oceanica*, une tentative de synthèse cartographique empirique a été réalisée par Jeudy de Grissac *et al.* (1986).

Dans la situation actuelle, il apparaît donc que la plus grande partie des documents cartographiques réalisés par la communauté scientifique ne peut jouer le rôle qui devrait être le sien.

Les performances de la micro-informatique et le très faible coût du stockage sur disque optique numérique des données, alliés à l'expérience du Centre de Télé-détection et d'Analyse des Milieux Naturels (CTAMN) de l'École Nationale Supérieure des Mines de Paris en cartographie numérique et en traitement d'images (rectification, superposition, combinaison, visualisation, changement de codes et de couleurs, impression couleur, *etc.*) offrent aujourd'hui l'opportunité de résoudre ce problème.

Cet article présente, d'une part, la création d'une base de données regroupant la plupart des documents cartographiques existants et, d'autre part, la méthode de synthèse cartographique et ses résultats. Les données de la base (ou banque) sont dites cartographiques ou parfois géocodées car en chaque élément (donnée) de la base sont connues sa valeur (code) et sa position géographique par rapport à un référentiel absolu.

La constitution de la banque comprend la numérisation des cartes sélectionnées, la standardisation des codes de peuplements benthiques, la standardisation de la géométrie et de l'échelle. Cette banque de données doit permettre de suivre les évolutions spatiales et la dynamique temporelle des peuplements benthiques ainsi que l'élaboration de cartes de synthèse bionomique. Cette démarche a été appliquée à une zone comprise entre La Ciotat et Toulon (sud-est de la France), à l'aide des logiciels CARTO-PC[®] élaborés par le CTAMN.

MATÉRIEL ET MÉTHODE

Étude et sélection des cartes existantes

La zone d'étude se situe dans la région varoise, entre les villes de La Ciotat et Toulon (fig. 1). Les coordonnées géographiques de ce rectangle sont $43^{\circ}2'0''N$ à $43^{\circ}12'11''N$ et de $5^{\circ}32'48''E$ à $6^{\circ}2'36''E$, ou encore dans la projection conique conforme Lambert zone III de 3087 à 3105 Nord et de 861 à 902 Est.

Les nombreuses cartes existant sur cette région ont été inventoriées par Jeudy de Grissac *et al.* (1986). De cet inventaire, nous avons écarté les cartes trop anciennes, les cartes redondantes et aussi les croquis dont les échelles sont inférieures à 1/14 000, croquis le plus souvent restreints à une toute petite zone d'étude. Au total, dix-huit cartes ont été retenues :

— Blanc (1975) : carte générale, de La Ciotat au Cap Cépet (1/96 000), du Cap Cépet à la pointe de Carqueiranne (1/49 000);

— Picard et Bourcier (1976) : baie de La Ciotat (1/43 000);

— Blanc (1977) : du Cap Canaille à Figuerolles (1/48 000), La Ciotat (1/29 000), Port d'Alon (1/14 000), Sanary (1/29 000), Le Bruscat (1/17 000), baies de La Seyne et des Sablettes (1/25 000), baie de la Garonne et pointe de Carqueiranne (1/13 000);

— Picard (1978) : baie de La Ciotat, évolution de 1959 à 1972 (1/43 000);

— Nodot *et al.* (1978) : Le Mourillon (1/22 000);

— Bourcier *et al.* (1979) : baie du Lazaret (rade de Toulon);

— Verlaque et Tine (1979) : du Cap Cépet à Saint-Mandrier et du Mourillon au Pradet (1/25 000);

— Bourcier (1980) : du Bec de l'Aigle à Bandol (1/81 000);

— Giraud (1980) : carte générale (1/50 000);

— Nodot *et al.* (1984) : grande rade de Toulon, de Saint-Mandrier à la pointe de Carqueiranne (1/57 000).

L'échelle de ces cartes est comprise entre 1/14 000 et 1/122 000. Elle peut d'ailleurs varier très fortement d'un point à l'autre d'une même carte, du fait d'un étirement involontaire ou d'un manque de fond de carte correct lors de la transcription des données relevées, et nécessite alors une transformation géométrique explicitée ultérieurement. Nous avons choisi pour la banque de données, l'échelle standard du 1/25 000, car elle offre un bon compromis entre la précision des documents utilisés et les impératifs de facilité d'utilisation de cette banque.

Les cartes sélectionnées n'utilisent pas toutes le même fond de carte. Certaines sont tracées sur le fond de carte du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) de type Mercator ou sur le fond de l'Institut Géographique National (IGN). La plupart ont été tracées sur des fonds de carte moins répandus ou, en ce qui concerne les relevés effectués par photographies aériennes, elles ont été laissées dans leur géométrie d'acquisition et présentent des déformations latérales importantes. Il est difficile, voire impossible, d'obtenir l'original de la carte, et il faut se contenter d'une reproduction plus ou moins fidèle dont les éventuelles distorsions géométriques s'ajoutent aux précédents problèmes.

Il faudra donc, lors de la constitution de la banque de données, transformer géométriquement ces cartes pour uniformiser l'échelle et le fond de carte. Ce dernier sera le fond IGN en projection conique conforme Lambert zone III, et l'échelle sera le 1/25 000.

En fonction de son échelle, de son objectif, des préoccupations ou de la spécialité des auteurs, chaque carte constitue un cas particulier du point de vue du découpage des peuplements benthiques et de leur légende. Dans certains cas, la correspondance n'est pas évidente à établir entre les différentes cartes. Par ailleurs, la normalisation des symboles de représentation, proposée récemment par Meinesz *et al.* (1983) n'a bien sûr pas été utilisée dans les cartes antérieures, et chaque auteur adopte un système de symboles personnels.

Au total, une centaine de dénominations pour des peuplements ou types de fonds ont été recensées sur l'ensemble des documents utilisés. Nous les avons regroupées en vingt-trois classes correspondant, soit à des « biocénoses » telles que définies par Pérès et Picard (1964), soit à des « faciès de biocénoses ». Comme le montre le tableau 1, nous avons attribué à

Tableau 1

Table de correspondance entre codes chiffrés (à gauche) et codes abrégés (en lettres grasses) décrivant les vingt-trois classes de peuplements benthiques utilisées.

Table of the correspondence between the codes (numbers and letters) and the twenty-three classes of benthic communities.

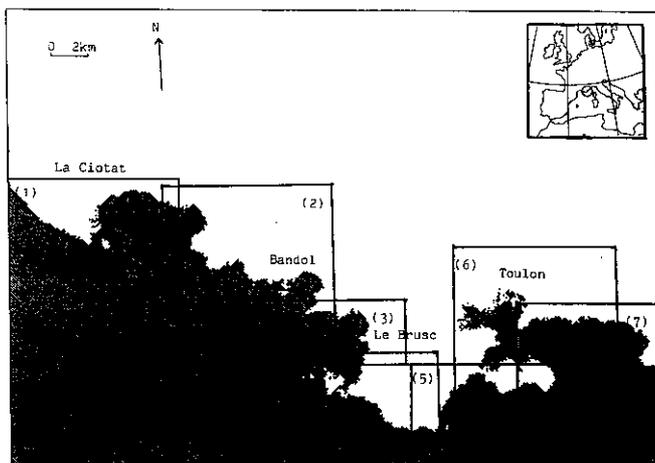


Figure 1

Carte indiquant la situation géographique de la zone étudiée et la position des sept secteurs.

Map showing the location of the area studied and the seven sectors.

- 0 : Zones non cartographiées par l'auteur de la carte.
- 1 : AP. Algues photophiles.
- 2 : APd. Algues photophiles appauvries.
- 3 : APe. Algues photophiles sur éboulis sous-marins.
- 10 : P. Milieux portuaires, zones fortement polluées.
- 11 : SVMC. Sable vaseux en mode calme, sans épiflore.
- 12 : SVMC/z. Herbier à *Zostera noltii* sur SVMC.
- 13 : SVMC/c. Herbier à *Cymodocea nodosa* sur SVMC.
- 20 : SFHN. Sables fins de hauts niveaux.
- 21 : SFBC. Sables fins bien calibrés.
- 22 : SGCF. Sables grossiers et fins graviers sous influence de courants de fond.
- 30 : HP. Herbiers à *Posidonia oceanica* non dégradés.
- 31 : HPD. Herbiers à *P. oceanica* dégradés.
- 32 : MM. Mattes mortes de *Posidonia oceanica* couvertes d'algues photophiles.
- 40 : C. Fonds coralligènes (fortement bioconcrétionnés).
- 41 : PC. Précoralligène (faiblement bioconcrétionné).
- 50 : DC. Détritique côtier.
- 51 : DC/c. Détritique côtier plus ou moins concrétionné.
- 52 : DC/p. Détritique côtier à Peyssonneliacées libres.
- 53 : DC/m. Détritique côtier avec maërl ou pralines.
- 54 : DC/i. Détritique côtier avec faciès d'instabilité.
- 60 : DE. Détritique envasé.
- 70 : VTC. Vases terrigènes côtières.
- 80 : DL. Détritique du large.
- 250 : Côte. Littoral et terres émergées.

chaque classe une valeur numérique, une abréviation généralement utilisée par les auteurs des cartes (cités précédemment), ou définie soit par Pérès et Picard (1964), soit par Meinesz *et al.* (1983), soit par les auteurs du présent article. Les classes ont été réunies en neuf groupes correspondant généralement à des biocénoses (algues photophiles, herbier à *P. oceanica*, détritique côtier, *etc.*). Le regroupement en un petit nombre de classes répond à trois objectifs :

- 1) effectuer des sorties imprimantes couleurs lisibles des cartes de synthèse à l'aide de matériel bas de gamme,
- 2) trouver un plus petit commun dénominateur à des cartes très différentes dans la délimitation des peuplements,
- 3) ne pas séparer des faciès dont la distinction ne semble pas pertinente pour les utilisateurs de ces cartes.

Matériel

Le travail présenté ici a été entièrement réalisé sur un système à base de micro-ordinateur compatible IBM® PC/XT et avec le logiciel CARTO-PC® développé par le CTAMN. Le système comporte un micro-ordinateur, une carte graphique 256 couleurs permettant de visualiser 384 lignes sur 512 colonnes sur un moniteur couleur, une table à numériser de dimension utile 1,20 × 1,50 m et un lecteur de disque optique numérique de type WORM d'une capacité de 100 Moctets contenant la base de données géocodées.

Saisie des données cartographiques

Avant toute saisie, la carte à numériser doit être préparée. Cette préparation consiste à définir un cadre à l'intérieur duquel se trouve la zone à numériser. La carte est ensuite fixée à la table à numériser, outil essentiel pour travailler en cartographie numérique. Le périmètre du cadre est transmis à l'ordinateur en pointant le plus précisément possible les quatre coins de celui-ci. L'échelle retenue pour la numérisation des cartes étant le 1/25 000 et la résolution de la table à numériser étant fixée à 1 mm, chaque pixel (surface élémentaire de l'image) correspondant à une surface de 25 × 25 m. Le logiciel en déduit alors la taille de l'image.

Une fois ces données préliminaires acquises, toutes les informations contenues dans la carte peuvent être numérisées et enregistrées sur disque. Chaque classe de peuplement benthique décrite sur la carte est assimilable à un polygone de forme plus ou moins complexe. La saisie du polygone sur la table se fait en suivant sa limite. Une fois le polygone fermé, chaque pixel inclus dans celui-ci reçoit comme valeur celle attribuée à la classe correspondant à la classe saisie. C'est ainsi que, polygone après polygone, la carte est numérisée.

Dans le cas de la carte graphique utilisée, la fenêtre de visualisation à l'écran est de 384 lignes × 512 colonnes, ce qui correspond, avec un pixel de 25 m de côté, à une zone de 9 600 × 1 280 m. Le problème posé par les cartes supérieures à cette taille a été résolu de deux manières différentes :

— la première consiste à créer un fichier image de taille supérieure aux dimensions de l'écran, mais en changeant la fenêtre de visualisation lors de la saisie interactive des polygones;

— la seconde utilise un découpage préliminaire de la carte en plusieurs cartes de taille inférieure ou égale à celle de la fenêtre de visualisation.

La première méthode convient à des images de taille légèrement supérieure à celle de la fenêtre de visualisation. Par contre, la seconde s'adapte mieux à des cartes de grande taille car, d'une part, elle évite de calculer les coordonnées (lignes, colonnes) de la zone à visualiser et, d'autre part, elle est beaucoup plus économique que la première en nombre d'octets utilisés pour enregistrer entièrement la carte.

Une fois numérisée, la carte doit être placée dans un référentiel géographique absolu. La rectification géométrique consiste à passer de la géométrie d'acquisition de la carte à une autre géométrie choisie. La technique utilisée ici s'appuie sur une estimation statistique de la déformation géométrique nécessaire. Elle consiste à pointer sur l'image, puis sur la carte de référence, quelques amers dont on enregistre les coordonnées relatives dans chaque repère. Puis, en utilisant une méthode d'estimation statistique quelconque, on ajuste un modèle (par exemple, polynômial) sur ces listes de coordonnées, modèle permettant de passer du repère de l'image à celui de la carte. Ce modèle est ensuite appliqué à chaque point de l'image.

Cette méthode simple et rapide nécessite cependant que l'image comporte un nombre suffisant d'amers, ce qui n'est pas le cas lorsque les cartes numérisées ont des traits de côtes trop lissés et donc imprécis. Dans ce dernier cas, nous avons été amenés à retracer complètement la carte sur un fond IGN au 1/25 000 avant de la numériser (partie de la carte de Blanc, 1977).

La rectification de la carte numérisée (l'image) s'est faite par rapport à un fond de carte IGN au 1/25 000 en projection conique conforme Lambert zone III. Les amers pointés successivement sur la carte IGN et sur la carte numérisée étaient le plus souvent des points remarquables du littoral (caps, digues de ports ou fonds de calanques) pouvant être localisés sur la carte de référence mais surtout sur la carte numérisée. Le modèle appliqué à la carte numérisée nous donne une carte rectifiée géométriquement, dont les coordonnées sont parfaitement connues dans la projection conique conforme Lambert zone III.

Malgré la rectification géométrique, chaque carte résultante a son propre trait de côte du fait d'une plus ou moins grande précision de la carte mère. Par conséquent, le trait de côte IGN a été appliqué à toutes les cartes rectifiées. Cependant, cette homogénéisation du trait de côte entraîne une modification de la carte au contact du trait de côte. En effet, soit le trait de côte empiète sur la partie « mer » de la carte rectifiée, soit il est situé à « l'intérieur » des « terres ». Généralement, les deux types de modifications sont observées sur une même carte rectifiée. Ces différences n'excèdent pas deux pixels (50 m), et sont corrigées manuellement dans le dernier cas en prolongeant les limites des taxons.

Dans le premier cas, il n'y a pas de correction, sauf si la superficie d'une classe côtière est diminuée de plus d'un tiers approximativement.

En conclusion, quoique les opérations soient automatisées, la géométrie de chaque carte pose un problème qui est résolu rapidement de manière interactive. Le temps nécessaire à la préparation, à la numérisation, à la rectification et à la correction géométrique est en moyenne de 30 minutes-homme et de 30 minutes-calcul (IBM® PC/XT).

Réalisation de la banque de données géocodées

La zone cartographiée étant d'une taille totale égale à 720 lignes pour 1 640 colonnes avec un pixel de 25 × 25 m, il est impossible de la voir d'un seul bloc sur le moniteur couleur sans la réduire plus de trois fois, et par conséquent perdre de l'information, ou alors modifier la fenêtre de visualisation pour faire apparaître la région souhaitée, ceci en calculant ses coordonnées par avance. Afin de pallier aisément ces inconvénients, nous avons opté pour un partage de la zone considérée en plusieurs secteurs de taille compatible avec celle de la fenêtre de visualisation. Pour cela nous avons découpé la zone en sept secteurs de taille comprise entre 160 et 360 lignes pour 400 à 440 colonnes. Ce découpage offre un compromis entre, d'une part, la visualisation d'une zone relativement importante et, d'autre part, les exigences du traitement informatique

pour la synthèse et une gestion de la banque de données plus performante. De plus, le recouvrement des différents secteurs contigus atténue les inconvénients dus au découpage de la carte, et offre ainsi une meilleure visualisation des zones de chevauchement. Chaque secteur ainsi défini forme un fichier image à l'intérieur duquel sont classés plusieurs canaux. Chaque canal contient une carte ou une partie de carte référencée par ses auteurs (tab. 2). Une fois toutes ces cartes intégrées dans la banque de données, il est aisé de les comparer entre elles et de suivre l'évolution temporelle des faciès (fig. 2).

Indépendamment des buts thématiques, la réalisation de banques de données suivant le schéma précédemment décrit est relativement répandue (*voir par exemple Smith, Blackwell, 1980; Shasby et al., 1981; Williams et al., 1985*), et est particulièrement utilisée au CTAMN (Giraud *et al.*, 1983; Adam de Villiers-Demarcoq, 1985; Bardinet *et al.*, 1986; Cano, 1987; Méaille, 1987; Wald, 1987). Toutefois le principe de la finalité de notre banque de données est différent de celles citées précédemment. En effet, ces dernières comportent une série d'images mono ou multi-thématiques, mais de thèmes différents d'une image à l'autre. Dans ce cas, d'une part, une nouvelle carte (administrative ou de l'inventaire forestier, par exemple) remplace complètement une ancienne qui devient obsolète et, d'autre part, la synthèse des informations consiste à utiliser chaque carte thématique comme filtre de l'information (par

Tableau 2

Ce tableau indique, pour chacun des sept secteurs : les coordonnées du Coin Supérieur Gauche (CSG) du secteur en système Lambert zone III, la taille en kilomètres du secteur permettant de le localiser très précisément sur une carte IGN (pour le 1/25 000 IGN, une unité Lambert correspond à 1 km) et la liste des cartes prises en compte.

Table showing for the seven sectors: the location of the left superior corner in Lambert III coordinates (CSG); the sizes of the sector in kilometres; and the list of the maps taken into account.

	CSG (coordonnées en Lambert III)		Taille du secteur (km)		Liste des cartes prises en compte dans le secteur
	Nord	Est	N-S	E-W	
Secteur 1	3105	861	9	10	Picard et Bourcier (1975) Blanc (1975; 1977) Giraud (1980) Bourcier (1980)
Secteur 2	3104	870	8	11	Picard et Bourcier (1975) Blanc (1975; 1977) Giraud (1980) Bourcier (1980)
Secteur 3	3097	876	4	10	Blanc (1975; 1977) Giraud (1980) Bourcier (1980)
Secteur 4	3094	876	7	11	Blanc (1975; 1977) Giraud (1980) Bourcier (1980)
Secteur 5	3093	886	6	10	Blanc (1975; 1977) Bourcier <i>et al.</i> (1979) Verlaque et Tine (1979) Giraud (1980) Nodot (1981)
Secteur 6	3099	888	8	10	Blanc (1975; 1977) Nodot <i>et al.</i> (1978; 1984) Bourcier <i>et al.</i> (1979) Verlaque et Tine (1979) Giraud (1980)
Secteur 7	3097	892	9	10	Blanc (1975; 1977) Nodot <i>et al.</i> (1978; 1984) Verlaque et Tine (1979) Giraud (1980)

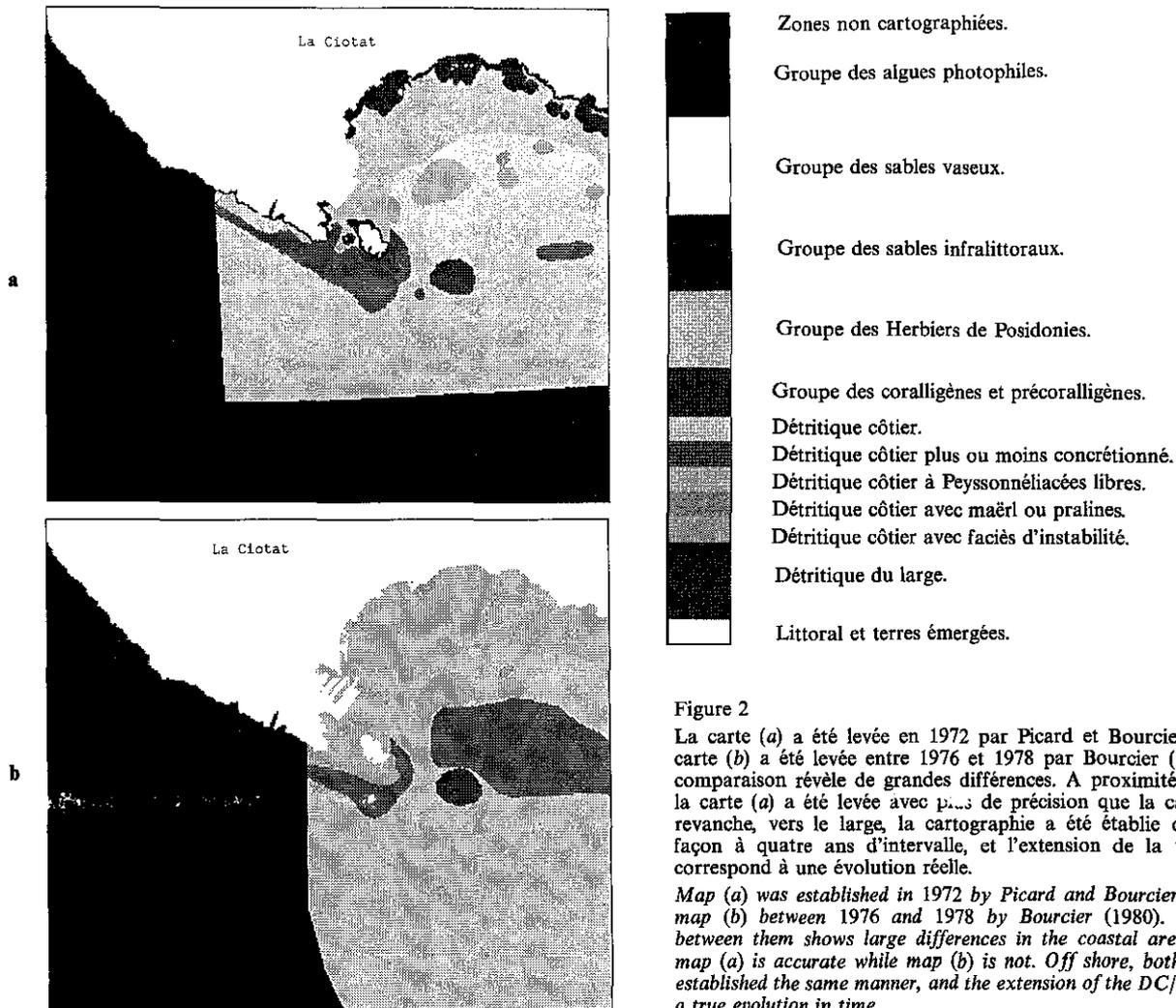


Figure 2
La carte (a) a été levée en 1972 par Picard et Bourcier (1975); la carte (b) a été levée entre 1976 et 1978 par Bourcier (1980). Leur comparaison révèle de grandes différences. A proximité de la côte, la carte (a) a été levée avec plus de précision que la carte (b). En revanche, vers le large, la cartographie a été établie de la même façon à quatre ans d'intervalle, et l'extension de la tache DC/c correspond à une évolution réelle.

Map (a) was established in 1972 by Picard and Bourcier (1975) and map (b) between 1976 and 1978 by Bourcier (1980). Comparison between them shows large differences in the coastal area where the map (a) is accurate while map (b) is not. Off shore, both maps were established the same manner, and the extension of the DC/c correspond to a true evolution in time.

exemple, cartographier toutes les zones de faible pente et altitude, exposées au sud et plantées de chênes).

A l'opposé, notre banque de données ne comporte que des cartes du même thème. Étant données les difficultés créées par la présence d'une couche d'eau, chaque carte de peuplement benthique est composée de points ou de transects d'observation servant de base à une interpolation. Par conséquent, les modifications de peuplements entre deux cartes peuvent provenir, soit d'une réelle évolution des peuplements dans le temps, soit d'un réseau de points d'observation différent. Il est donc nécessaire de faire une synthèse raisonnée de ces cartes afin d'approcher au mieux la réalité.

Synthèse cartographique

Une fois la banque de données créée, un ensemble de logiciels a été développé afin de synthétiser l'information contenue dans celle-ci. Chaque carte de la banque de données va alors recevoir un crédit ou « coefficient de fiabilité ». Pour attribuer ce crédit, à chaque série de carte d'un secteur va correspondre une série de cartes jumelles appelées « cartes de fiabilité ». Celles-ci sont obtenues par polygonage de zones et attribution à ces polygones d'un coefficient représentant la fiabilité de la zone. Les cartes de base sont d'âges différents,

et établies suivant des techniques d'observation et de cartographie différentes et plus ou moins précises. Ainsi, la précision varie d'une carte à l'autre, mais aussi d'un point à l'autre d'une même carte.

Par exemple, la limite inférieure d'un herbier à *Posidonia oceanica* est plus précise lorsqu'elle est cartographiée avec un sous-marin de type « Griffon » (Meinesz, Laurent, 1982) qu'avec une série de dragages à maille lâche, et *a fortiori* lorsqu'elle résulte de l'interprétation de photographies aériennes. D'après Boudouresque et Meinesz (1982), cette limite se situe entre 20 et 40 m de profondeur, et sur la côte varoise les fonds ne sont guère visibles, sur des photographies aériennes, au-delà de 15-20 m; les cartes établies par photo-interprétation peuvent être relativement précises dans les petits fonds, mais sont souvent, au-delà, le résultat d'extrapolation.

Sur une carte établie par photographie aérienne, les limites des peuplements sous faible couverture d'eau sont très fiables, mais la nature des peuplements est incertaine. Le dragage permet de déterminer précisément la nature du peuplement, mais son extension spatiale est incertaine.

Par ailleurs, il est évident que, suivant l'échelle de la carte « mère », les données seront localisées plus ou moins précisément. Ainsi, les limites des biocénoses de cette carte auront un crédit moins important que d'au-

tres provenant d'une carte dont l'échelle procure une plus grande précision.

En tenant compte de ces remarques, chaque pixel de chaque carte est pondéré en fonction de l'année de relevé ou d'observation, de la méthode de cartographie des fonds sous-marins et de l'échelle cartographique. Plus une carte est ancienne, plus son crédit est faible. Les limites des biocénoses sous faible couverture d'eau définies par photographies aériennes peuvent recevoir un important crédit; celui-ci, au-delà de 15-20 m, diminuera de façon importante. De même, la limite des herbiers de *Posidonia oceanica* cartographiée par un sous-marin d'exploration recevra un coefficient maximum, alors que celui-ci sera moins important si cette limite est définie par un ensemble de dragages.

En ce qui concerne les travaux de cartographie par plongées sous-marines successives (Meinesz *et al.*, 1981), qui permettent une délimitation très précise des limites des peuplements benthiques ainsi que de leur type, la zone étudiée est généralement très restreinte et ne peut être prise en compte dans une synthèse cartographique à l'échelle du 1/25 000.

Le tableau 3 indique les valeurs de pondération ainsi que leurs conditions d'affectation.

Pour effectuer la synthèse des cartes, nous avons d'abord utilisé une première méthode basée sur la construction de l'histogramme des valeurs prises par un même point géométrique dans la série des cartes. Dans un même secteur, pour chaque pixel de coordonnées (x,y) en lignes et en colonnes, on dispose de *n* cartes de biocénoses et de *n* cartes de fiabilité. On établit alors, pour chaque pixel, l'histogramme des classes à partir des valeurs cumulées des coefficients de fiabilité. La classe modale est recherchée, et sera affectée sur la carte de synthèse au pixel correspondant. Cette méthode a été abandonnée, car elle donnait un poids trop important aux cartes anciennes. En effet, la répétition d'erreurs dans une succession de cartes (souvent, du reste, en partie redondantes) donne à ces erreurs

Tableau 3

Ce tableau indique quelques valeurs repères des coefficients de fiabilité et leurs significations. Des valeurs intermédiaires sont utilisées pour les cas intermédiaires.

Table showing some key values of the weighting coefficients and their meanings. Intermediate values are used for intermediate cases.

Coefficient de fiabilité	Signification
0	Non cartographié
4	Fiabilité nulle : limite placée de façon totalement empirique et sans aucune justification.
8	Fiabilité approximative : limite placée de façon empirique mais en fonction d'une certaine logique. Ex. : dans un secteur donné, la limite inférieure de l'herbier se situe en général entre 30 et 40 m : on a donc suivi les isobathes.
12	Fiabilité moyenne : limite placée en fonction de données concrètes; l'imprécision vient du type de données ou du repérage.
16	Fiabilité bonne : limite placée en fonction de données concrètes; maillage serré (1 observation/100 m); données très précisément localisées (ex. : sonar latéral, transects balisés, photointerprétation avec correction de parallaxe).
20	Totalement fiable : l'erreur est inférieure ou égale au pixel.

une fiabilité illusoire; inversement, des précisions crédibles qui paraissent intéressantes se trouvent masquées. Pour corriger cette imperfection, il serait possible d'attribuer aux pixels correspondant à ces précisions crédibles, une fiabilité supérieure à la somme des fiabilités des cartes restantes sur le secteur considéré. Ainsi la classe modale serait celle correspondant aux précisions, et elles apparaîtraient sur la carte de synthèse.

Toutefois, chaque fois que de nouvelles cartes seraient numérisées, il serait alors nécessaire, soit de diminuer les coefficients de fiabilité des anciennes cartes (et donc revenir en arrière pour modifier la banque de données), soit d'attribuer aux nouvelles cartes ou à des parties de celles-ci des coefficients sans cesse plus élevés. De ce fait, la banque de données cartographiques aurait perdu une de ses qualités essentielles : la simplicité de son caractère évolutif. C'est la raison pour laquelle nous avons préféré la méthode suivante.

Celle-ci consiste à comparer les images contenues dans un secteur entre elles, et de ne retenir en chaque point géographique que l'information la plus fiable, c'est-à-dire d'affecter à ce point la valeur de la carte à laquelle on accorde le plus de crédit pour ce point. De plus, lorsque le crédit le plus élevé correspond à plusieurs cartes, on choisit alors la valeur de la carte la plus récente.

La carte résultant de cette comparaison sera dite « du maximum de fiabilité ». On calculera également une carte synthétique dite « des désaccords », montrant en chaque point géographique l'importance du désaccord entre toutes les cartes. Cette méthode est donc subjective, puisqu'elle fait appel à la notion du crédit que l'on accorde à une carte.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La banque de données est constituée de sept secteurs. Chacun d'eux comprend la carte de synthèse, la carte des « désaccords » et les différentes cartes ayant servi à élaborer les deux précédentes (fig. 3). Les sept secteurs étant repérés dans la projection Lambert zone III, il est possible de les réunir par mosaïque afin de retrouver une vue d'ensemble du secteur (fig. 4).

Les cartes des « désaccords » (fig. 3f) quantifient, pour chaque pixel, la différence entre la classe retenue pour la carte de synthèse (celle du maximum de fiabilité) et la classe dont la somme des crédits des cartes présentes dans le secteur est la plus importante. Trois cas peuvent se présenter :

— Les deux classes sont identiques; la valeur 0 est portée sur la carte des « désaccords ».

— Les classes sont distinctes mais appartiennent au même groupe; la valeur attribuée est 10.

— Les classes sont distinctes et appartiennent à des groupes différents; la valeur attribuée est 20.

Les cartes « du maximum de fiabilité » (fig. 3e, 4) obtenues par synthèse cartographique, comportent des imperfections. La plus démonstrative est celle que l'on

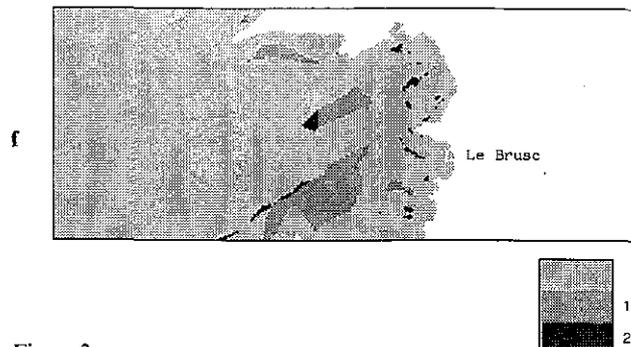
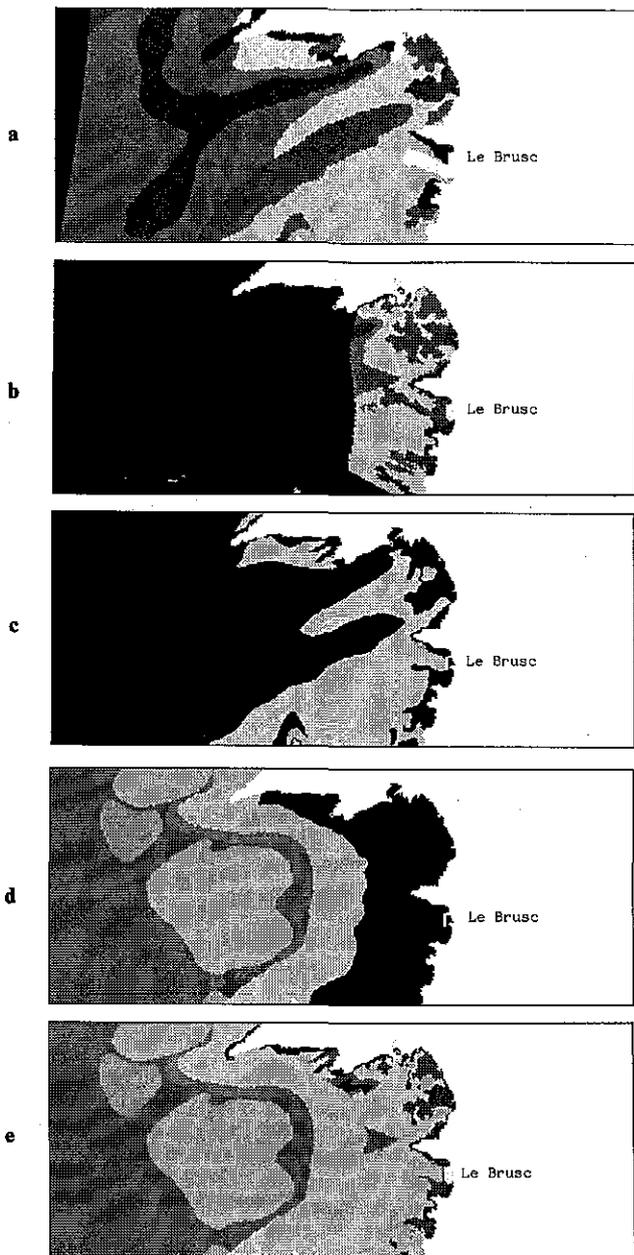


Figure 3

Visualisation du secteur 3 : (a) à (d) cartes numérisées et rectifiées, établies à partir des cartes mères des différents auteurs : Blanc (1975 et 1977), Giraud (1980), Bourcier (1980); (e) carte de synthèse du maximum de fiabilité; (f) carte des « désaccords ».

Display of sector 3: (a) to (d) digitized and rectified maps derived from different authors' maps: Blanc (1975 and 1977), Giraud (1980), Bourcier (1980); (e) synthetic map of most weighted values, (f) so-called map of "disagreements".

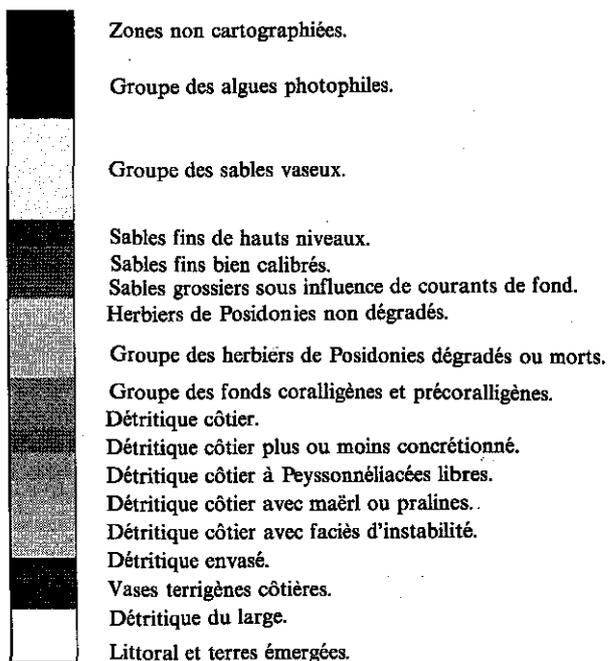
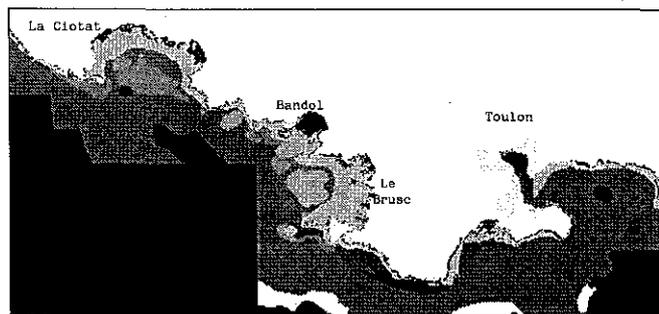
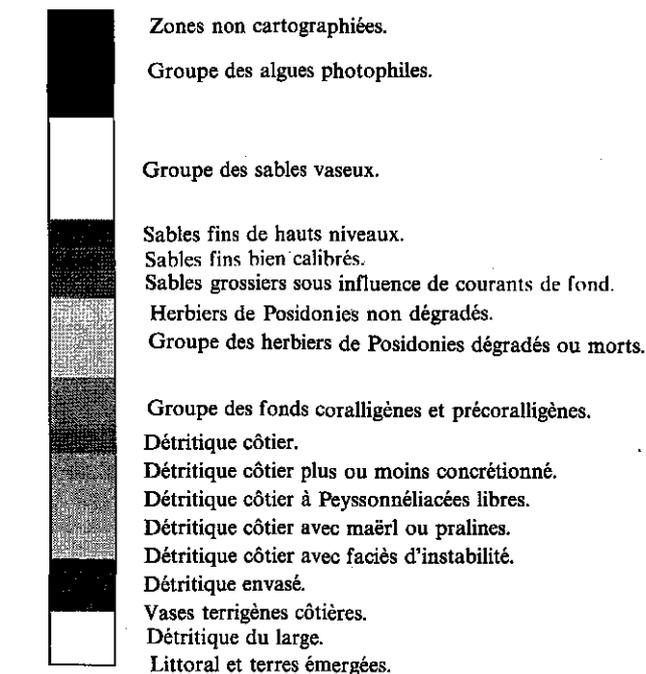


Figure 4

Carte de synthèse du maximum de fiabilité de l'ensemble de la zone étudiée.

Synthetic map of most weighted values of the total area.

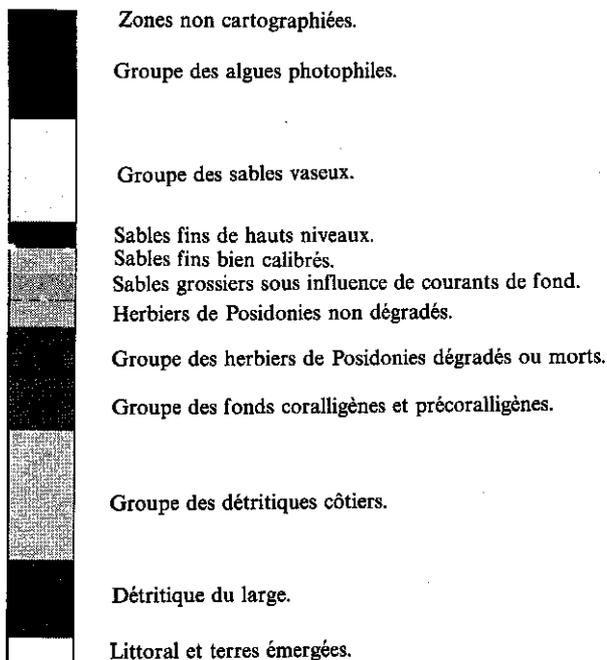
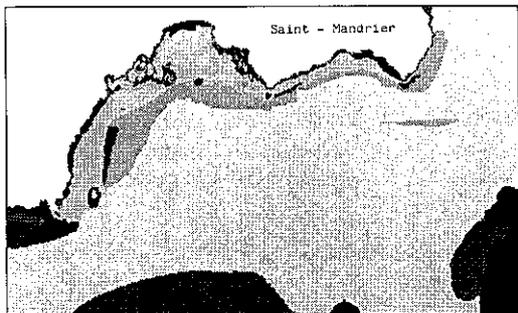


Figure 5

Carte de synthèse du secteur 5. Elle met en évidence une imperfection : la tache allongée (gris foncé) de Sable Grossier soumis à des Courants de Fond (SGCF) au sud de Saint-Mandrier, entourée par du Détritique Côtier (gris clair) ne correspond pas à une entité naturelle

Synthetic map for the fifth sector. It shows an artefact due to the lack of information in the original maps which cannot be corrected by the synthesis method. The elongated spot in dark grey shade (Row Sand under Bottom Currents: SGCF) which is surrounded by Coastal Detritics (clear grey shade) and south of Saint-Mandrier does not correspond to reality.

découvre sur la figure 5. On remarque sur celle-ci une étroite bande de substrat appartenant à la « biocénose des sables grossiers soumis à des courants de fonds (SGCF) » entourée par du « détritique côtier (DC) », et présentant un contour peu vraisemblable, ce qui nous conduit à penser que cette bande n'est qu'un artefact. Le schéma de la figure 6 permet de mieux comprendre la raison de sa présence, qui est due à la superposition d'une carte à fort crédit, où la bande littorale cartographiée est étroite et n'inclut que partiellement une zone de « sables grossiers soumis à des courants de fond » située plus au large et cartographiée sur une autre carte de crédit inférieur.

Cette imperfection, ainsi que celles rencontrées sur les cartes de synthèse des autres secteurs (par exemple, des zones d'herbiers de posidonies touchant le littoral ou encore des taches de « détritique côtier » ou de « vases terrigènes côtières » isolées au milieu d'un herbier de posidonies, etc.), est davantage due à un manque d'informations précises sur certaines portions de secteur

qu'à la simplicité de la méthode de synthèse. Une solution permettant de résoudre ces imperfections est d'ailleurs proposée ultérieurement. Une tentative de synthèse cartographique a déjà été effectuée sur le littoral méditerranéen (Jeudy de Grissac *et al.*, 1986). Celle-ci se limite d'ailleurs aux herbiers à *Posidonia oceanica*, alors que notre étude s'étend à l'ensemble des peuplements benthiques littoraux. La comparaison des cartes de synthèse établies par les deux méthodes montre, en ce qui concerne les herbiers, que les résultats sont dans l'ensemble analogues. On note toutefois que la surface couverte par ces herbiers est plus importante de 5% environ sur notre carte que sur celle de Jeudy de Grissac *et al.*. Par ailleurs, de nombreuses différences de détail sont perceptibles, en particulier dans la région de La Ciotat.

Comme nous l'avons déjà souligné, la méthode que nous proposons pour la carte du maximum de fiabilité est subjective. Elle ne fait que traduire l'approche manuelle utilisée jusqu'à présent, en particulier par Jeudy de Grissac *et al.*. Elle se présente plutôt comme un outil d'aide à la production d'une carte de synthèse, puisque c'est encore l'utilisateur, et lui seul, qui va décider du crédit à affecter à chaque pixel d'une carte.

Cette étude a montré que notre approche était globalement satisfaisante, hormis la subjectivité encore nécessaire. Il faut donc maintenant viser à améliorer les critères de pondération de chaque carte afin de rendre la synthèse plus objective. Cette amélioration n'est pas chose facile, et passe à notre avis par l'utilisation d'un système-expert. Un système-expert est composé d'une part, d'une base de connaissances et de lois et, d'autre part, d'un moteur d'inférences qui effectue la démarche

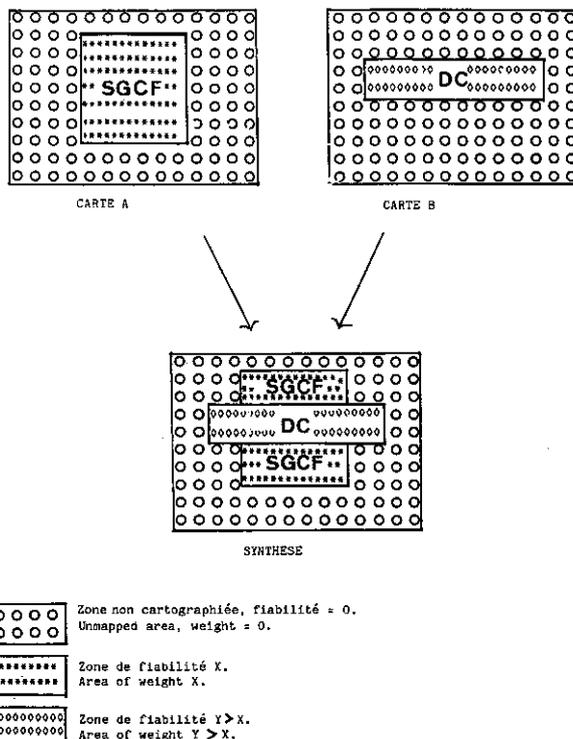


Figure 6

Schéma montrant comment se produisent des aberrations dans la carte de synthèse à cause de la disparité de la zone couverte par chaque carte.

Diagram showing the occurrence of errors in the synthetic map due to the difference in the mapped areas.

logique et les déductions à partir des connaissances précédentes. Dans notre cas, le problème le plus épineux est actuellement la confection de la base de connaissances et de lois. Cette base doit être construite à partir du savoir des chercheurs, et doit comprendre des règles décrivant les incompatibilités ou les probabilités de voisinage entre les différents peuplements, ainsi que des règles concernant les méthodes de cartographie. Ce système-expert doit être capable, en particulier, de cartographier un même peuplement benthique à partir de plusieurs cartes en sachant qu'il faut vraisemblablement garder dans la partie haute les limites déterminées par photographies aériennes, assigner à l'intérieur de ces limites le peuplement observé par dragage par exemple, et prendre pour les parties basses des limites, ce qui paraît le plus vraisemblable, ou l'observation la plus récente par exemple.

CONCLUSION

L'intérêt de la banque de données cartographiques que nous avons élaborée, en tant qu'outil d'aide à la décision pour l'aménagement du littoral et des fonds marins, est triple :

- 1) la possibilité de produire une carte de synthèse de fiabilité maximale, rapidement et toujours à jour (tenant compte des cartes les plus récentes), lui donnant un aspect évolutif ;
- 2) la possibilité d'examiner, en cas de besoin, la séquence des cartes originales ayant servi à établir la carte de synthèse ;

3) la mise en évidence d'évolutions spatiales et de dynamiques temporelles.

Par ailleurs, la carte des « désaccords » peut constituer un outil utile pour la préparation des missions de cartographie à venir, en désignant les zones où apparaissent d'importantes contradictions entre cartes.

Ce travail se présente comme une première approche de la synthèse cartographique des peuplements marins benthiques littoraux. La méthode de synthèse choisie est très simple et de type heuristique, mais les principaux problèmes ont été abordés et résolus. Le plus gros travail a consisté en la constitution de la banque de données géocodées. Toutes les cartes disponibles, pertinentes, sur la région étudiée sont maintenant archivées de manière numérique. Il est aisé de les consulter et surtout de les comparer. Ces images numériques sont d'ailleurs disponibles sous forme de fichiers sur disquettes type IBM-PC® (MS-DOS®) à tout chercheur intéressé.

Les auteurs s'efforcent actuellement de créer un groupe de travail européen permettant en particulier de rassembler les connaissances, base de tout système-expert.

Remerciements

Les auteurs expriment leur gratitude aux arbitres de cet article, dont les réflexions et remarques ont contribué à en améliorer la clarté et la teneur.

RÉFÉRENCES

- Adam de Villiers-Demarcq C., 1985. Utilisation géologique du traitement d'image appliqué aux modèles numériques de terrain. Exemples du Nord-Limousin et du Plateau de Millevaches, *Thèse Doct. 3^e cycle, École Nat. Sup. Mines Paris et Univ. Nice*, 1-147.
- Augier H., 1982. La cartographie biocénotique répétitive à grande échelle et à repérage métrique pour l'étude fine de l'évolution des peuplements marins benthiques. Application dans l'île de Porquerolles (Méditerranée, France), *Trav. Sci. Parc Natl. Port-Cros*, 8, 11-18.
- Bardinet C., Bossut P., Monget J.-M., Albuissou M., 1986. Multi-satellite thematic mapping and integration of multidisciplinary data through hash coding analysis. COGEO DATA-IUGS, *Inter. Colloq. on the Construction and Display of Geoscientific maps derived from data bases*, 2-4 December, 1986, Dinkelsbuehl, FRG.
- Bellan G., Arnoux A., Bellan-Santini D., Boudouresque C. F., Bourcier M., Harmelin J. G., Picard J., Salen C., Stora G., 1980. Cartographie dynamique de milieux marins littoraux soumis à des pollutions telluriques et à des aménagements par l'homme. Rapport sur le benthos I et II, A.S.P. PIREN, CNRS, Paris, 43 p.
- Blanc J. J., 1975. *Recherches de sédimentologie appliquée au littoral rocheux de la Provence. Aménagement et protection*, Centre National pour l'Exploitation des Océans et Laboratoire de Géologie marine et Sédimentologie appliquée de l'Université d'Aix-Marseille II, 1-164.
- Blanc J. J., 1977. Recherches de géologie sédimentaire sur les herbiers à Posidonies du littoral de la Provence, CNEXO, Paris, 1-154.
- Boudouresque C. F., Meinesz A., 1982. Découverte de l'herbier de Posidonie, *Cah. Parc Nat. Port-Cros*, 1, 3, 1-80.
- Bourcier M., 1980. Évolution récente des peuplements macrobenthiques entre La Ciotat et les Embiez (côtes de Provence). Processus de contamination du benthos entre bassins côtiers voisins, *Téthys*, 9, 3, 197-206.
- Bourcier M., Nodot C., Jedy de Grissac A., Tine J., 1979. Répartition des biocénoses benthiques en fonction des substrats sédimentaires de la rade de Toulon, *Téthys*, 9, 2, 103-112.
- Cano B., 1987. Télédétection spatiale à haute résolution et système d'informations géocodées sur l'environnement. Exemples d'applications et de gestion dans le cadre d'un espace protégé : le Parc National du Mercantour, *Thèse Doct. Ing., Univ. Aix-Marseille III*, 201 p.
- Cuvellier M., 1976. Surveillance en temps réel de l'évolution des herbiers : nouvelle méthode de recensement des herbiers par cartographie au sonar latéral, *Journées Études Pollutions, Split*, CIESM éd., Monaco, 3, 191-193.
- Cuvellier-Kareth M., 1979. La cartographie des herbiers de Phanérogames marines par télédétection acoustique, *Thèse Doct. 3^e cycle, Univ. Paris-VI*, 1-163.
- Giraud G., 1980. Synthèse cartographique des herbiers de Posidonies (*Posidonia oceanica*) entre Fos-sur-Mer et la rade d'Hyères, Direction des Constructions et Armes Navales et Lab. Biol. Vég. Mar., Fac. Sci. Luminy, Aix-Marseille II, 1-16.
- Giraud A., Manière R., Monget J.-M., 1983. Un système d'aide à la recherche et à la décision appliqué à la gestion des milieux naturels : mise en place et fonctionnement d'une banque de données cartographique de l'environnement (projet Molières). Annexe : Carte des principaux faciès paysagers; la végétation du Haut Vallon de Molières, au 1/25 000, Parc National du Mercantour, *Écol. Médit.*, 9, 1, 101-136.
- Jedy de Grissac A., Meinesz A., Boudouresque C. F., Astier J. M., Bourcier M., Lefèvre J. R., 1986. Notice d'utilisation des cartes IPLI au 1/25 000 (Région Provence Alpes Côte-d'Azur) : herbiers de Posidonies. Ministère de l'Environnement, Délégation Régionale à l'Architecture et à l'Environnement Provence Alpes Côte-d'Azur et GIS Posidonie, 1-126.
- Méaille R., 1987. Conception de méthodes intégrées d'élaboration de scénarios de développement/environnement — Rapport final. Conv. CAR-PB/ARMINES du 08.11.85, Rapport Interne École Nat. Sup. Mines Paris CTAMN/87/R/09, octobre 1987.
- Meinesz A., Laurent R., 1982. Cartes de la végétation sous-marine des Alpes-Maritimes (côtes françaises de la Méditerranée). I : Limite inférieure de l'herbier de *Posidonia oceanica* dans le Golfe Juan et à l'Est des îles de Lerins, *Ann. Inst. Océanogr.*, 58, 1, 103-112.
- Meinesz A., Cuvellier M., Laurent R., 1981. Méthodes récentes de cartographie et de surveillance des herbiers de Phanérogames marines. Leurs applications sur les côtes françaises de la Méditerranée, *Vie Milieu*, 31, 1, 27-34.
- Meinesz A., Boudouresque C. F., Falconetti C., Astier J. M., Bay D., Blanc J.-J., Bourcier M., Cinneli F., Cirik S., Cristiani G., Di Geronimo I., Giaccone G., Harmelin J. G., Laubier L., Lovric A. Z., Mollner R., Soyer J., Vamvakas C., 1983. Normalisation des symboles pour la représentation et la cartographie des biocénoses benthiques littorales de Méditerranée, *Ann. Inst. Océanogr.*, 59, 2, 155-172.
- Nodot C., Astier J. M., Tailliez P., Tine J., 1978. Étude d'impact des aménagements littoraux du Mourillon sur l'herbier de *Posidonia oceanica* de la rade des Vignettes (Toulon, Var), *Ann. Soc. Sci. Nat. Archéol. Toulon, Var*, 30, 118-133.
- Nodot C., Bourcier M., Jedy de Grissac A., Heusner S., Régis J., Tine J., 1984. Répartition des biocénoses benthiques en fonction des substrats sédimentaires de la rade de Toulon (France). 2 : La Grande Rade, *Téthys*, 11, 2, 141-153.
- Péres J.-M., Picard J., 1964. Bionomie en fonction de la géomorphologie sous-marine dans la région de Cassis (Bouches-du-Rhône), *Rec. Trav. Stn. Mar. Endoume*, 8, 13, 3-8.
- Picard J., 1978. Impact sur le benthos marin de quelques grands types de nuisances liées à l'évolution des complexes urbains et industriels de la Provence occidentale, *Oceanis*, 4, 3, 214-251.
- Picard J., Bourcier M., 1976. Évolution sous influences humaines des peuplements benthiques des parages de La Ciotat entre 1954 et 1972, *Téthys*, 7, 2-3, 213-222.
- Shasby M., Burgan R. E., Johnson G. R., 1981. Broad area forest fuels and topography mapping using digital Landsat and terrain data, *Proc. Seventh Annual Symp. on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue Univ., Lafayette, Indiana*, 529-538.
- Smith A. Y., Blackwell R. J., 1980. Development of an information data base for watershed monitoring, *Photogr. Eng. Remote Sens.*, 46-1027.
- Verlaque M., Tine J., 1979. Végétation marine de Toulon (Var, France) : Grande Rade et Rade-Abri, Marine nationale, Bureau d'Études Antipollution, Toulon, 1-83.
- Wald L., 1987. An assessment of the use of satellite remote sensing for the quantitative mapping of the forest biomass. A case study: The projet LEBEN-Abruzzo, 4th CEC European Conf. Biomass for Energy and Industry, 11-15 May 1987, Orléans, France.
- Williams D. L., Nelson R. F., Dottavio C. L., 1985. A georeferenced Landsat digital database for forest insect damage assessment, *Inter. J. Remote Sens.*, 6, 5, 643-656.

Quelques articles à paraître - some forthcoming articles

D. A. Booth

Eddies in Rockall Trough.

R. D. Riso, F. Quentel, C. Madec, P. Le Corre, J.-L. Birrien

Le cuivre et le cadmium dans le front interne côtier de l'Iroise.

R. Duguay, D. Wisdorff

Les échouages de cétacés et les facteurs météorologiques sur la côte centre-ouest atlantique.

L. M. Arruda, J. P. Andrade, M. M. Cunha

Abundance, diversity and community structure of the fish population in the Ria de Aveiro (Portugal).

C. J. Charpy-Roubaud

Production primaire des fonds meubles du lagon de Tikehau (atoll des Tuamotu, Polynésie française) : relations avec la lumière et la profondeur.

A. Dessier

Les peuplements de copépodes épiplanctoniques du Pacifique Sud-Ouest. Composition, variabilité.

N. E. Whitehead, J. de Vaugelas, P. Parsi, M. C. Navarro

Preliminary study of uranium and thorium redistribution in Callichirus lauræ burrows, Gulf of Aqaba (Red Sea).

G. Thouzeau, D. Lehay

Variabilité spatio-temporelle de la distribution, de la croissance et de la survie des juvéniles de *Pecten maximus* (L.) issus des pontes 1985, en baie de Saint-Brieuc.

V. Diaz-Castañeda, P. Safran

Dynamique de la colonisation par des annélides polychètes de sédiments défaunés par la pollution, dans des enceintes expérimentales en rade de Toulon (France).

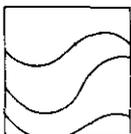
A. Grémare, J.-M. Amouroux

Étude expérimentale des taux d'ingestion et de métabolisme de *Eupolyornia nebulosa* (annélide polychète, Montagu). Influence de l'état de maturation sexuelle.

La revue Oceanologica Acta est une publication de Gauthier-Villars, société Anonyme, constituée pour 99 ans, au capital de 3 089 600 F. Siège social : 17, rue Rémy Dumoncel, 75014 Paris - P.D.G. : J. M. Bourgois. Actionnaire : Bordas S.A. (99,8% des parts). Directeur de la publication : J. Lissarrague. Responsable de la Rédaction : J. Boutlier.

«Reproduction in whole or in part without the permission of the author or his representative is prohibited (law of March 11, 1957, Article 40, line 1). Such reproduction by whatever means, constitutes an infringement forbidden by Article 425 and those following it, of the Penal Code. The law of March 11, 1957, lines 2 and 3 of Article 41, authorizes only those copies or reproductions made for the exclusive use of copyist, and not intended for collective use, and such analyses and short quotations as are made for the purposes of an example or illustration.»

«Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droits ou ayants-cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'utilisation.»



ANNEXE 3

Construction and use of a Geographical Information System

of some mediterranean benthics communities.

Its application to the area of Toulon (southeast of France).

Méaille R. et Wald L., 1988.

Article à paraître dans la revue
International Journal of Geographical Information Systems, 1988

Submitted to : International Journal of Geographical Information Systems

**CONSTRUCTION AND USE OF A GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM
OF SOME MEDITERRANEAN BENTHICS COMMUNITIES.
ITS APPLICATION TO THE AREA OF TOULON (SOUTHEAST OF FRANCE)**

Meaille R. and Wald L.

Centre de Télédétection et d'Analyse des Milieux Naturels,
Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
Sophia-Antipolis, 06565 Valbonne Cedex (France).

- June 1988 -

ABSTRACT

This paper presents an overview of the structure of a regional Geographical Information System for mediterranean benthics communities. The area of the GIS is located between the cities of La Ciotat and Giens in the southeast of France.

The particularity of this GIS versus the others usually described in the literature is that all layers describe the same theme but seen at different moments, with different techniques used by different oceanographers. A method was developed to synthetize on a pixel basis the content of all these layers according to weights depending mainly upon the date and the techniques of measurements. This method gives also the map of "disagreement" which displays at each pixel the difference between the synthetic map and the most frequent class taking the weights into account (modal class).

This GIS is implemented on a micro-computer IBM-PC like.

1 . INTRODUCTION

For many years, the mediterranean benthic communities have been mapped by a number of oceanographers. Different sampling techniques and tools were and are used for this mapping, namely airborne surveys, direct submarine observations and bionomic analyses of samples obtained by dredging, and they depend upon the scientific objectives and the scale of the studies (Cuvelier, 1976 ; Cuvelier-Kareth, 1979 ; Meinez *et al.*, 1981 ; Augier, 1982).

Most maps use the geographical grid of Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (S.H.O.M.) of the French Navy which is in Mercator projection, or of the Lambert III projection of Institut Géographique National. Others maps are directly drawn starting from airborne surveys without geometric rectification, hence displaying scale distortions within the map. Within the same area, many maps can exist. Usually, they are all different by the reasons above described. They are also disseminated into written reports of more or less difficult access and their use by the scientific communities is not easy.

A few maps have been already gathered into a synthetic map by Bellan *et al.* (1980) but without much criticism about the construction and results. Another empirical synthesis has been made by Jeudy de Grissac *et al.* (1986) but it takes into account only one theme : the *Posidonia oceanica* (Linnaeus) Delile. Nowadays the development of micro-computer as well as the low price of information storage onto optical digital disk make the synthesis of this set of maps possible at low cost. The aim of this paper is to present the implementation of such a regional GIS, the synthesis method and its results applied to a set of maps.

Though looking to the same area, the map produced by an author depends strongly upon the observation technique used. Also the mapping process requires interpolation methods which make use of a priori knowledge which in turn depends upon the author of the map. At last same objects depicted in two different maps are often labelled differently because of a lack of standardized codes.

Therefore we face an unusual problem for GIS. Rather than dealing with different thematic layers as a GIS usually does, each layer of our GIS is a representation of the same themes but seen differently within each layer. In that sense, we may consider the mapping of the benthic communities as a stochastic process masking a natural evolution (or none) of the benthic communities and each layer is a representation of this process. The aim of the synthesis method is to establish the synthesis of the contents of the layers according to constraints depending mainly upon the date of the measurements and upon the measurement techniques used to draw up each map.

Of course this GIS offers features in image management, processing and display and makes mostly use of the image processing software CARTO-PC^(R). The GIS is implemented on a micro-computer IBM-PC like. Data are stored onto an optical digital disk of WORM type (Write Once, Read Many). Various standard graphic boards are supported ranging from low resolution (200 x 200, 16 colours) to high resolution (1024 x 1024, more than one million colours).

2 . IMPLEMENTATION AND STRUCTURE

2.1 . Area of GIS

The area under study is located in the southeast of France, between the cities of La Ciotat and Giens (fig. 1). The geometric grid use for this GIS is the Lambert III projection. The spatial coordinates of this area are :

- 43°0'37" N to 43°12'11" N
- 5°32'48" E to 6°6'16" E

or in Lambert III projection :

- 3086 N to 3105 N
- 861 E to 910 E

In this area, a lot of maps exist and they have been listed by Jeudy de Grissac *et al.* (1986). The maps drawn with a scale up to 1/18,000 have not been used as well as the redundant maps. The scales of the selected maps range between 1/14,000 and 1/122,000. In accordance with the demand of oceanographers, the scale chosen for this GIS is 1/25,000, and the reference map is provided by the map of Institut Géographique National (IGN) at that scale.

2.2 . Data set

Eighteen maps have been selected. Each map is made with more or less taxons or classes, and the classes are often different between one map and the others because the maps have different objectives (geological maps, benthic communities maps, etc...). Nevertheless, it is necessary to aggregate some of the classes of different maps into the same class because their name changes but their content is the same. After the aggregation of attribute data, a number of twelve classes have been selected for the creation of the GIS, but this number can be extended to 256 classes. This is the first difference between our GIS and the GISs usually described in literature (Arnberg *et al.*, 1987 ; Smith *et al.*, 1987 ; Shupeng, 1987 ; Tomlinson, 1987 ; Wiggins *et al.*, 1987) : the selected classes are the same along the different layers, that is not the case in other GISs.

After the standardization of the classes, the maps have been digitized by the mean of a digitizing table coupled to a micro-computer. The classes are described as polygons, vectors and points, and length-limited textual data reference them.

Like the classes, the geometry has been standardized to obtain referenced x-y-coordinates. To replace the different maps into a same grid cells (the Lambert III projection), each map has been geometrically rectified by the mean of a deformation model, computed by a least-square fitting of a second-order polynomial model over a set of couples of landmarks alternatively taken in the digitized map and in the reference map.

However, the sea-shore line of the rectified maps are not the same due to the difference of precision between the initial maps. To complete the geometric rectification in order to keep superimposable the sea-shore line of all maps, a reference sea-shore line has been digitized from the reference map.

2.3 . Structure of the regional GIS

The mapped area is 1960 columns by 760 rows wide, with a pixel equal to 25 m x 25 m. Displaying the entire area with full resolution is not possible with the usual hardware one can find for micro-computer. Hence, the area is divided into eight sectors. Each sector has a size equal or lesser than 440 columns and 360 rows compatible with the most frequent graphical board for micro-computer. Each sector overlaps its neighbours in order to ease the visualisation or the tessellation of two or more sectors.

The structure of each sector is a multi-layers structure. Indeed, each sector is composed of the set of the digitized maps describing it. This set of maps is ordered by their sampling years and are also referenced by the names of authors.

The partition into eight sectors allows a better management of the data and the research of the informations requested is faster. Moreover, this GIS can easily be extended to a larger area just by creating new sectors. These new sectors need not to be contiguous to the initial area.

3 . SYNTHESIS OF THE CONTENTS OF THE GIS

Once the GIS constructed, a method was developed to synthetize the available information. Two maps were computed on a pixel basis for each sector : the synthetic map and the map of "disagreement".

The first one (fig. 2) represents the map of the most fiability. It is composed of the most weighted pixels one can find in the set of data layers. The weight of each pixel of each map depends upon the sampling techniques like airborne surveys, direct submarine observations or bionomic analyses of samples obtained by dredging, combined with the depth of the mapped area. For example, the airborne survey is efficient only for depths lower than 25 m in the area under study (Boudouresque and Meinesz, 1982), and often, maps drawn up by this technique result of interpolation for larger depths. In shallow water, this technique gives a good precision for the boundaries of the different benthic communities but these communities cannot be accurately labelled by an aerial view and external knowledge is required to draw up the map. On the contrary, the dredging technique gives accurate results about the communities themselves, but their boundaries must be extrapolated.

The synthesis also takes into account the age of each map. When a pixel corresponds to different communities in two or more different maps and if these maps presents, at this pixel the same weight, the priority is given to the latest made.

The map of "disagreement" (fig. 3) is computed at the same time that the synthetic map. It exhibits at each pixel the difference between the community selected in the synthetic map and the most frequent community in the set of maps, taking the weight into account (modal class).

4 . CONCLUSION

The first usefulness of this GIS is the gathering in the same place of maps of the area under study. Once the data stored onto an optical digital disk the retrieval of the requested informations is faster because the informations are immediatly and easily accessible, and also is more efficient because the maps are in a same geographical frame and are superimposable and therefore immediatly comparable.

This GIS allows the user to examine spatial evolutions and temporal dynamics of the benthic communities (Meaille *et al.*, 1988).

The map of "disagreement" is of great interest for further mapping since it shows the places where data are lacking or where time evolution occurs.

Usually GISs are composed of layers of data which differ ones the others by their themes. Our GIS takes into account twelve classes and is composed of layers of data which are representations of the same theme. This GIS can be considered as a set of representations of a stochastic process with natural trend because the thematic scenes are the same but seen at different moments with differents sampling techniques as well as differents oceanographers. The aim of the synthetic map and the map of "disagreement" is to distinguish the natural evolution from this random variable.

5 . REFERENCES

- ARNBERG W. and OSTERLUND H., 1987. Use of a low-cost GIS for extracting areas for energy forestry. Int. j. imag. rem. sens. igg, 1 (1) : 57 - 67.
- AUGIER H., 1982. La cartographie biocénotique répétitive à grande échelle et à repérage métrique pour l'étude fine de l'évolution des peuplements marins benthiques. Application dans l'île de Porquerolles (Méditerranée, France). Trav. sci. Parc Natn. Port-Cros, 8 : 11 - 18.
- BELLAN G., ARNOUX A., BELLAN-SANTINI D., BOUDOURESQUE C.F., BOURCIER M., HARMELIN J.G., PICARD J., SALEN C. et STORA G., 1980. Cartographie dynamique de milieux marins littoraux soumis à des pollutions telluriques et à des aménagements par l'homme. Rapport sur le benthos I et II. A.S.P. PIREN, CNRS, Paris, 43 p, 80 pl..
- BOUDOURESQUE C.F. et MEINESZ A., 1982. Découverte de l'herbier de Posidonie. Cah. Parc Natn. Port-Cros, i - iii : 1 - 80.
- CUVELIER M., 1976. Surveillance en temps réel de l'évolution des herbiers : nouvelle méthode de recensement des herbiers par cartographie au sonar latéral. Journées Etudes Pollutions (Split), C.I.E.S.M. édit., Monaco, 3 : 191 - 193.
- CUVELIER-KARETH M., 1979. La cartographie des herbiers de Phanérogames marines par télédétection acoustique. Thèse Doct. 3^{ème} cycle, Univ. Paris VI : 1 - 163, 9 cartes h.t..
- JEUDY DE GRISSAC A., MEINESZ A., BOUDOURESQUE C.F., ASTIER J.M., BOURCIER M. et LEFEVRE J.R., 1986. Notice d'utilisation des cartes IPLI au 1/25.000 (Région Provence Alpes Côte d'Azur) : herbiers de Posidonies. Ministère de l'Environnement, Délégation Régionale à l'Architecture et à l'Environnement Provence Alpes Côte d'Azur et GIS POSIDONIE : 1 - 126, 14 cartes h.t..
- MEAILLE R., WALD L. et BOUDOURESQUE C.F., 1988. Cartes des peuplements benthiques en méditerranée : constitution d'une banque de données géocodées et synthèse cartographique. Oceanologica Acta, 11 (2).
- MEINESZ A., CUVELIER M. et LAURENT R., 1981. Méthodes récentes de cartographie et de surveillance des herbiers de Phanérogames marines. Leurs applications sur les côtes françaises de la Méditerranée. Vie Milieu, 31 (1) : 27 - 34.
- SHUPENG C., 1987. Geographical data handling and GIS in China. Int. j. Geographical Information Systems, 1 (3) : 219 - 228.
- SMITH T., MENON S., STAR J. and ESTES J., 1987. Requirements and principles for the implementation and construction of large-scale geographic information systems. Int. j. Geographical Information Systems, 1 (1) : 13 - 31.
- TOMLINSON R., 1987. Current and potential uses of geographical information systems : The North American experience. Int. j. Geographical Information Systems, 1 (3) : 203 - 218.
- WIGGINS J., HARTLEY R., HIGGINS M. and WHITTAKER R., 1987. Computing aspects of a large geographic information system for the European Community. Int. j. Geographical Information Systems, 1 (1) : 77 - 87.

LISTE DES FIGURES

Fig. 1 : Map showing the area under study.

Fig. 2 : Synthetic map of the total area after tessellation of the eight sectors. The grey scale shows the nine groups including the twenty classes of benthic communities.

Fig. 3 : Map of disagreement of the third sector. It depicts the difference between the synthetic and the modal class. This difference is coded with three values, each represents a type of disagreement :

- 0 indicates a perfect agreement,
- 10 indicates a disagreement between classes within one group,
- 20 indicates a disagreement between groups.

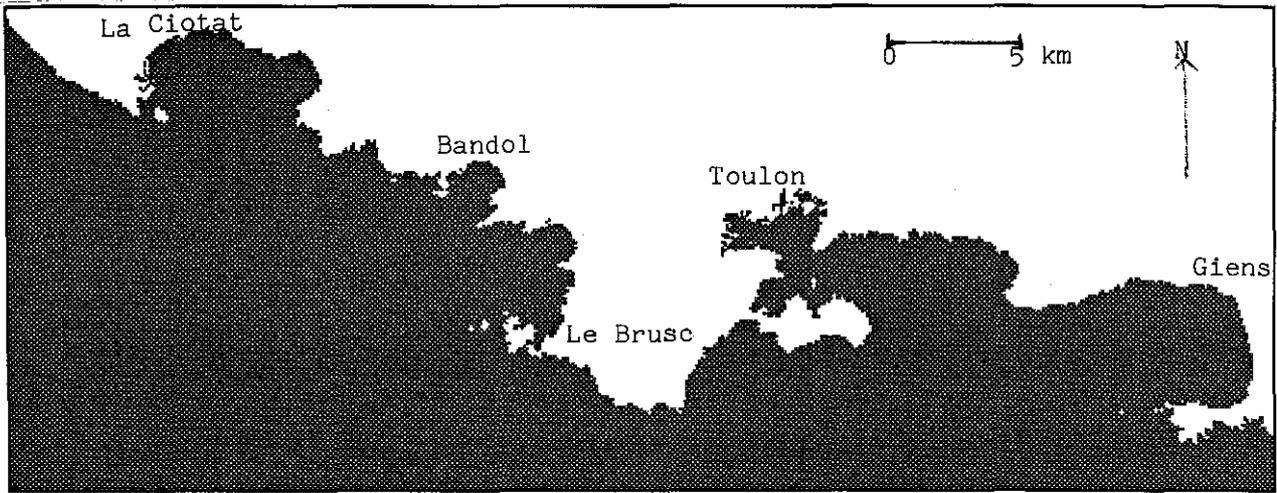


Fig. 1 :

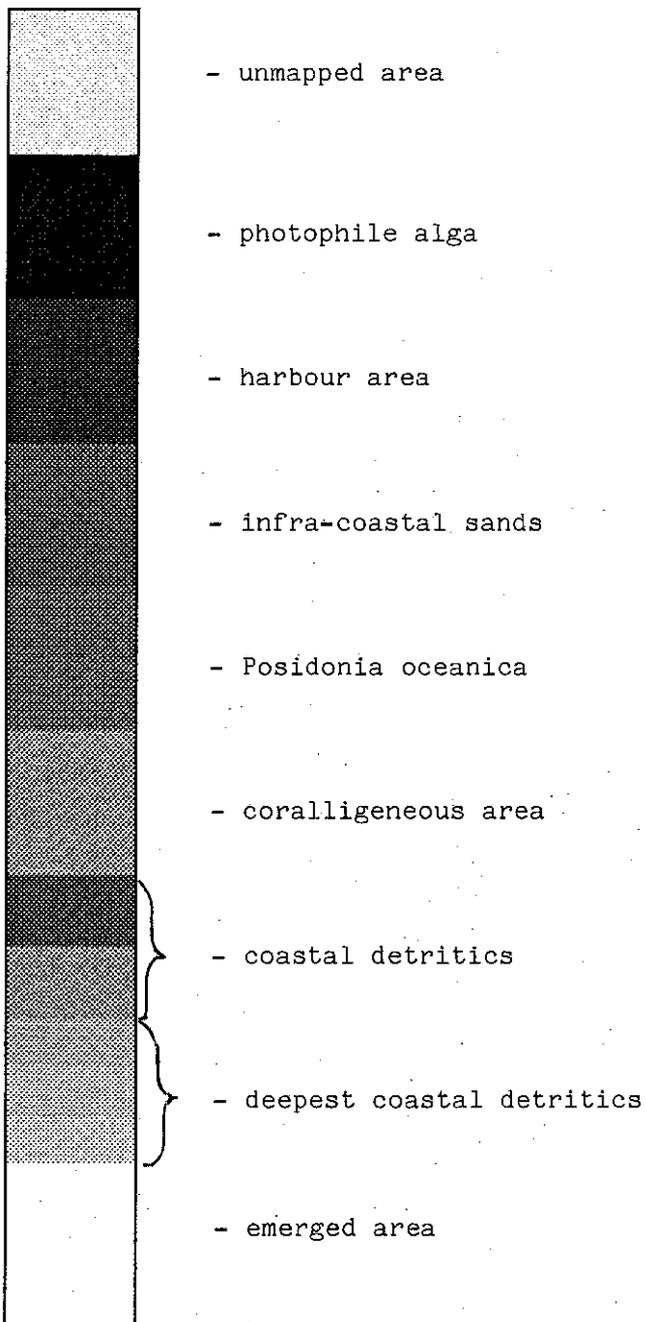
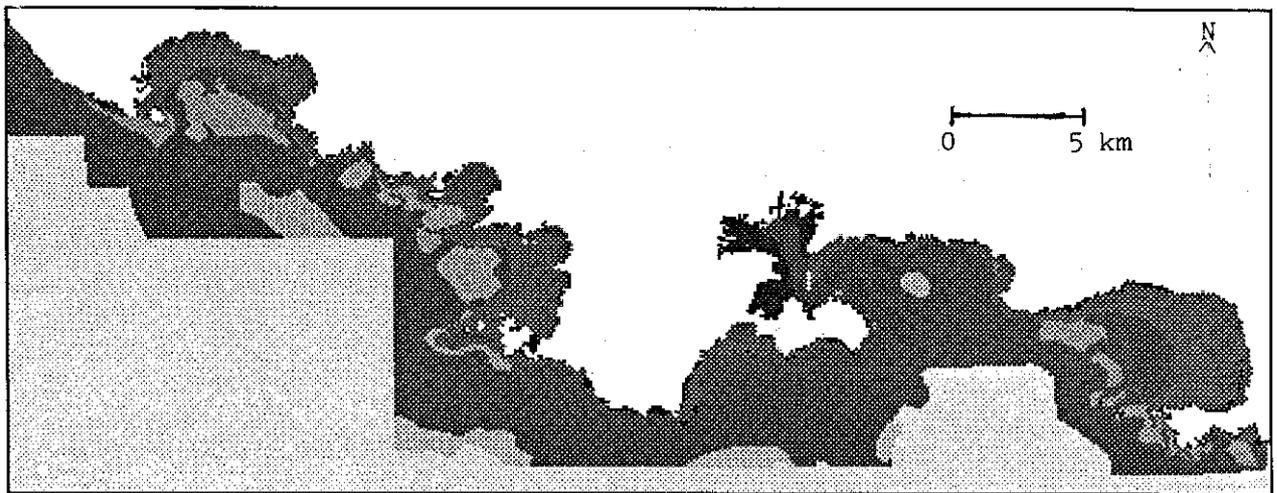


Fig. 2 :

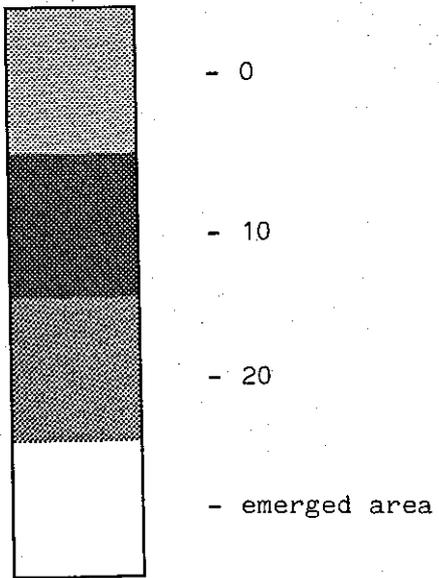
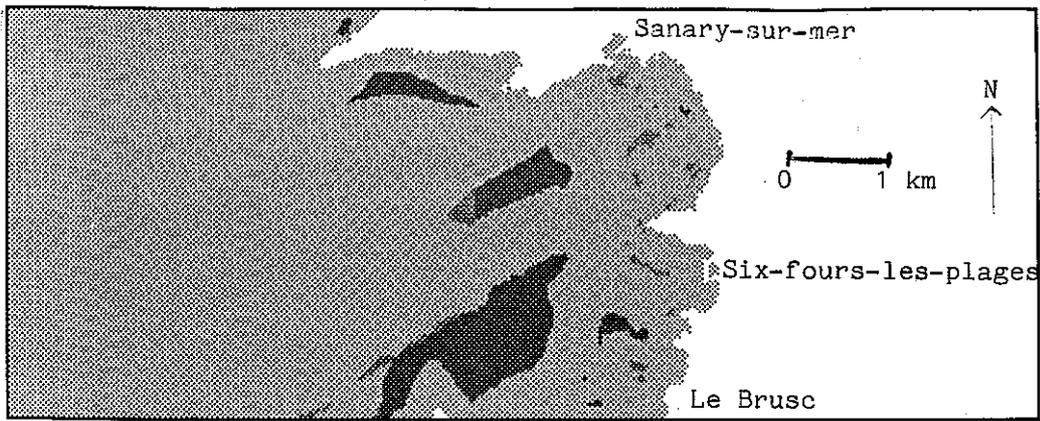


Fig. 3 :

ANNEXE 4

Données du recensement de 1982 effectué par

l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques.

13 - BOUCHES-DU-RHÔNE *

NOM DE LA COMMUNE	NUMERO DE CODE		POPULATION SANS DOUBLES COMPTES							Superficie en km ²	DENSITE AU KM ²		
	de la commune	du canton de l'unité urbaine	en 1982	en 1975	en 1968	Variation			en 1982		en 1975	en 1968	
						75-82		68-75					
						absolue	relative						relative (en % par an)
							en %	en % par an					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)			
AIX-EN-PROVENCE	001	601	121327	110659	89566	+10668	+9,6	+1,3	+3,1	186,08	652	595	481
ALLAUCH X	002	35 701	13519	11149	10013	+2370	+21,3	+2,8	+1,6	50,30	X209	222	199
ALLEINS	003	09	1224	1041	975	+183	+17,6	+2,3	+0,9	16,78	73	62	58
ARLES	004	553	50500	50059	45774	+441	+0,9	+0,1	+1,3	758,93	67	66	60
AUBAGNE X	005	06 701	38561	33695	27838	+4866	+14,8	+2,0	+2,7	54,90	X702	612	509
AUREILLE	006	09	835	573	518	+262	+45,7	+5,6	+1,5	21,74	38	26	24
AURIOL X	007	29 701	5222	3278	3000	+1944	+59,3	+8,8	+1,3	44,64	X117	73	67
AURONS	008	32	282	247	150	+35	+14,2	+1,8	+7,4	12,82	22	19	12
LA BARBEN	009	32	420	360	315	+70	+20,0	+2,8	+1,5	22,85	18	15	14
BARBENTANE	010	07 654	3201	2864	2795	+337	+11,8	+1,6	+0,4	27,13	118	106	103
LES BAUX-DE-PROVENCE	011	31	433	367	295	+66	+18,0	+2,4	+3,2	18,07	24	20	16
BEAURECUEIL	012	34	458	391	259	+67	+17,1	+2,3	+6,1	9,86	46	40	26
BELCÔDÈNE X	013	29	542	327	195	+215	+65,7	+7,4	+7,7	12,97	X42	25	15
BERRE-L'ETANG	014	06 303	12562	12069	11588	+493	+4,1	+0,6	+0,6	43,64	288	277	266
BOUC-BEL-AIR	015	10 701	8714	4533	3210	+4181	+92,2	+9,7	+5,1	21,75	401	208	148
LA BOUILLADISSE X	016	29 701	3117	2231	1959	+886	+39,7	+4,9	+1,9	12,61	X247	177	155
BOULBON	017	33	1042	836	935	+206	+24,6	+3,2	+1,6	19,33	54	43	48
CABANNES	018	26	2982	2767	2698	+215	+7,8	+1,1	+0,4	20,91	143	132	129
CABRIES	019	10 701	6120	3328	2109	+2782	+83,9	+9,0	+6,8	36,55	167	91	58
CADOLIVE X	020	29 701	1239	1112	1125	+127	+11,4	+1,5	+0,2	4,18	X296	266	269
CARNUX-EN-PROVENCE X	119	08 202	5149	3120	2207	+2029	+65,0	+7,4	+5,1	3,45	X1492	904	840
CARRY-LE-ROUET	021	36 208	4570	3304	2353	+1266	+38,3	+4,7	+5,0	10,10	452	327	233
CASSIS X	022	08 205	6304	5831	4852	+473	+8,1	+1,1	+2,7	26,87	X235	217	181
CEYRESTEX	023	08 458	2544	2037	1581	+507	+24,9	+3,2	+3,7	22,61	X113	90	70
CHARLEVAL	024	12	1684	1417	1278	+267	+18,8	+2,6	+1,5	14,41	117	98	89
CHATEAUNEUF-LE-ROUGE	025	34	1071	885	165	+786	+275,8	+20,7	+8,2	13,15	81	22	13
CHATEAUNEUF-LES-MARTIGUES	026	36 501	10173	8600	6781	+1573	+18,3	+2,4	+3,5	31,65	321	272	214
CHATEAURENARD	027	07 654	11072	11027	10220	+45	+0,4	+0,1	+1,1	34,95	317	316	292
LA CITIATX	028	06 458	31727	32721	23916	-994	-3,0	-0,4	+4,6	31,46	X1008	1040	760
CORNILLON-CONFDOUX	029	32	980	810	562	+170	+21,0	+2,7	+5,4	14,95	66	54	38
COUDOUX	118	32 101	2228	1042	880	+1186	+113,8	+11,4	+2,5	12,65	176	82	70
CUGES-LES-PINS X	030	05	1875	1282	1433	+593	+46,3	+5,6	+1,6	38,81	X48	33	37
LA DESTROUSSE X	031	29 701	1755	1205	854	+550	+45,6	+5,5	+5,1	2,93	X599	411	291
EGUILLES	032	02 113	4473	3033	2016	+1440	+47,5	+5,7	+6,0	34,07	131	89	59
ENSUES-LA-REDONNE	033	36	2204	1699	1192	+505	+29,7	+3,8	+5,2	25,83	85	66	46
EYGALIERES	034	26	1427	1284	1233	+143	+11,1	+1,5	+0,6	33,97	42	38	36
EYGUIERES	035	09 111	4171	3284	2742	+887	+27,0	+3,5	+2,6	68,75	61	48	40
EYRAGUES	036	07	2968	2512	2288	+456	+18,2	+2,4	+1,3	20,78	143	121	110
LA FARE-LES-OLIVIERS	037	32 201	5043	3526	2747	+1517	+43,0	+5,2	+3,6	13,98	361	252	196
FONTVIEILLE	038	03 106	3374	2935	2440	+439	+15,0	+2,0	+2,7	40,18	84	73	61
FOS-SUR-MER	039	11 209	9031	6709	2869	+2322	+34,6	+4,3	+13,0	82,31	98	73	31
FUYEAU	040	34 701	4029	3348	3028	+681	+20,3	+2,7	+1,5	30,02	134	112	101
GARDANNE	041	10 701	15122	14120	12601	+1002	+7,1	+1,0	+1,6	27,02	560	523	466
GENÈSOS X	042	05 701	4548	3029	2807	+1519	+50,1	+5,9	+1,1	32,75	X139	92	86
GIGNAC-LA-NERTHE	043	36 701	4361	3568	2666	+793	+22,2	+2,9	+4,3	8,64	505	413	309
GRANS	044	32 104	3095	2801	2446	+294	+10,5	+1,4	+2,0	27,60	112	101	89
GRAVESON	045	07	2276	2134	2024	+142	+6,7	+0,9	+0,8	23,54	97	91	86
GREASQUE	046	29 701	2674	2439	2309	+235	+9,6	+1,3	+0,8	6,15	435	397	375
ISTRES	047	11 402	28661	18129	13404	+10432	+67,5	+8,7	+4,4	113,73	251	159	118
JOUQUES	048	27	2238	2096	2047	+142	+6,8	+0,9	+0,3	60,35	28	26	25
LAMANON	049	09	1377	1025	735	+352	+34,3	+4,3	+4,9	19,19	72	53	38
LARBESC	050	12 203	5353	3588	2822	+1765	+49,2	+6,9	+3,5	65,34	82	65	43
LANÇON-PROVENCE	051	32 110	3890	2743	2018	+1247	+45,5	+5,5	+4,5	68,92	58	40	29
MAILLANE	052	31	1671	1430	1472	+141	+9,9	+1,3	+0,4	16,77	84	85	88
MALLERDORT	053	08 109	3846	3344	3090	+802	+18,0	+2,4	+1,1	28,16	140	119	110
MARIGNANE	054	36 701	31109	26477	20044	+4632	+17,5	+2,3	+4,1	23,16	1343	1143	885
MARSEILLE	055	701	874436	908600	889029	-34164	-3,8	-0,5	+0,3	240,82	3634	3776	3695
MARTIGUES	056	25 501	42037	38373	27945	+3864	+9,5	+1,3	+4,7	71,44	588	537	391
MAS-BLANC-DES-ALPILLES	057	33	248	139	136	+109	+78,4	+8,8	+0,3	1,57	168	89	87
MAUSSANE-LES-ALPILLES	058	31	1514	1352	1251	+162	+12,0	+1,8	+1,1	31,60	48	43	40
MEYRARGUES	059	27	2406	2222	2196	+184	+8,3	+1,1	+0,2	41,67	58	53	53
MEYREUIL	060	02 701	2845	2492	2441	+353	+14,2	+1,9	+0,3	20,13	141	124	121
MEZDARGUES	061	33	216	182	204	+33	+18,1	+2,4	+1,6	4,13	52	44	49
MIRÈT	062	10 701	2374	1476	1360	+898	+60,8	+7,0	+1,2	18,70	127	79	73
MIRANAS	063	11 401	20414	15585	10544	+4829	+31,0	+3,8	+5,8	25,74	793	605	410
MOLLEGES	064	26	1354	1048	1132	+306	+29,2	+3,7	+1,1	14,20	95	74	80
MOURIES	065	09	2283	1865	1631	+418	+22,4	+2,9	+1,9	38,35	60	49	43
MOVES	066	07	3693	3593	3579	+100	+2,8	+0,4	+0,1	27,92	132	129	128
ORDON	067	28	2339	2285	2049	+64	+2,4	+0,3	+1,6	34,78	67	66	59
PARADOU	068	31	809	640	526	+189	+26,4	+3,4	+2,9	16,15	50	40	33
PELLISSANNE	069	32 403	6245	5155	3505	+1090	+21,1	+2,8	+5,7	18,11	327	270	183
LA PENNE-SUR-NUVEAUNE	070	05 701	5782	5095	4489	+687	+13,5	+1,8	+1,8	3,56	182	1431	1261
LES PENNES-MIRABEAU	071	10 701	15891	14839	10146	+852	+5,7	+0,8	+5,8	33,66	486	441	301
PEYNIER	072	34 206	1741	1180	819	+581	+50,1	+5,8	+5,1	24,78	70	47	33
PEYPIN X	073	29 701	2829	2018	1365	+611	+30,3	+3,8	+5,8	13,35	X197	151	102

13 - BOUCHES-DU-RHÔNE *

NOM DE LA COMMUNE	NUMERO DE CODE			POPULATION SANS DOUBLES COMPTES							Superficie en km ²	DENSITE AU KM ²		
	de la commune	du canton	de l'unité urbaine	en 1982	en 1975	en 1968	Variation					en 1982	en 1975	en 1968
							75-82		68-75					
							absolue	relative		relative (en % par an)				
en %	en % par an													
PEYROLLES-EN-PROVENCE	074	27	102	2560	2297	2249	+263	+11,4	+1,6	+0,3	34,90	73	66	64
PLAN-D'ORGON	076	26	455	1885	1745	1707	+140	+8,0	+1,1	+0,3	14,94	126	117	114
PLAN-DE-CUQUES	075	35	701	8119	5892	5183	+2227	+37,8	+4,7	+1,9	8,52	953	692	608
PORT-DE-BOUC	077	25	501	20106	21424	14080	-1316	-6,2	-0,9	+6,2	11,46	1754	1866	1229
PORT-SAINT-LOUIS-DU-RHONE	078	28	302	10378	10393	8285	-15	-0,1	-	+3,3	73,38	141	142	113
LE PUY-SAINTE-REPARADE	080	27		3079	2859	2589	+220	+7,7	+1,1	+1,5	46,29	67	62	55
PUYLOUBIER	079	34		1121	798	692	+323	+40,5	+4,9	+2,1	40,85	27	20	17
ROGNAC	081	06	701	9330	5105	4270	-4225	+82,8	+8,9	+2,6	17,46	534	292	245
ROGNES	082	12		2216	1426	1183	+790	+55,4	+6,5	+2,7	58,32	38	24	20
ROGNONAS	083	07	654	3156	2680	2247	+476	+17,8	+2,4	+2,6	9,41	335	285	239
LA ROQUE-D'ANTHERON	084	12	107	3692	2876	2282	+816	+28,4	+3,6	+3,4	25,49	145	113	90
ROQUEFORT-LA-BEDOULE X	085	08	105	3355	2384	1770	+971	+40,7	+5,0	+4,4	31,15	X108	77	57
ROQUEVAIRE X	086	29	701	5619	5042	3854	+577	+11,4	+1,6	+3,9	23,83	X236	212	162
ROUSSET	087	34		2078	1559	1191	+519	+33,3	+4,2	+3,9	19,50	107	80	61
LE ROVE	088	36	103	2707	2233	1709	+474	+21,2	+2,8	+3,9	22,97	118	97	74
SAINT-ANDIOL	089	26		2372	2019	2023	+353	+17,5	+2,3	-	16,00	148	126	126
SAINT-ANTONIN-SUR-BAYON	090	34		150	80	55	+70	+87,5	+9,3	+5,5	17,57	9	5	3
SAINT-CANNAT	091	12		2384	1862	1675	+522	+28,0	+3,6	+1,5	36,54	65	51	46
SAINT-CHAMAS	092	11	401	5045	5110	5083	-65	-1,3	-0,2	+0,1	26,71	189	191	190
SAINT-ESTEVE-JANSON	093	12		202	130	117	+72	+55,4	+6,5	+1,5	8,65	23	15	14
SAINT-ETIENNE-DU-GRES	094	33		1601	1484	1421	+117	+7,9	+1,1	+0,6	29,04	55	51	49
SAINT-MARC-JAUMEGARDE	095	01		517	539	356	-22	-4,1	-0,6	+6,1	22,56	23	24	16
SAINTE-MARIES-DE-LA-MER	096	30		2045	2120	2244	-75	-3,5	-0,5	-0,8	374,61	5	6	6
SAINT-MARTIN-DE-CRAU	097	03	301	10155	5551	3257	-4604	+82,9	+9,0	+7,9	214,87	47	26	15
SAINT-MITRE-LES-REMPARTS	098	11	112	4297	3327	1411	+970	+28,2	+3,7	+13,1	21,02	204	158	67
SAINT-PAUL-LES-DURANCE	099	27		461	463	503	-2	-0,4	-0,1	-1,2	45,81	10	10	11
SAINT-REMY-DE-PROVENCE	100	31	207	8402	7923	8044	+479	+8,0	+0,8	-0,2	89,09	94	89	90
SAINT-SAVOURNIN X	101	29	701	1589	1140	1120	-449	+39,4	+4,8	+0,3	5,89	X270	194	190
SAINT-VICTOIRE	102	36	701	5571	5436	4880	+135	+2,5	+0,3	+1,6	4,73	1178	1149	1032
SALON-DE-PROVENCE	103	32	403	34846	34576	30722	-270	+0,8	+0,1	+1,7	70,30	496	492	437
SAUSSET-LES-PINS	104	36	208	3876	2205	1066	-1671	+75,8	+8,3	+11,0	12,10	320	182	88
SENAS	105	26	108	3906	3265	3008	+641	+19,6	+2,6	+1,2	30,61	128	107	98
SEPTEMES-LES-VALLONS	106	10	701	10681	10827	5844	-146	-1,3	-0,2	+9,2	17,84	599	607	328
SIMIANE-COLLONGUE	107	10	701	3030	1926	1406	+1104	+57,3	+6,7	+4,6	29,84	102	65	47
TARASCON	108	33	453	10735	10365	10584	+370	+3,6	+0,5	-0,3	73,97	145	140	143
LE THOLONET	109	01		1186	1137	953	+49	+4,3	+0,6	+2,6	10,82	110	105	88
TRETS X	110	34	208	4735	3674	3250	+1061	+28,9	+3,7	+1,8	70,31	X67	52	46
VAUVENARGUES	111	01		585	412	271	+173	+42,0	+5,1	+6,2	54,31	11	8	5
VELAUX	112	32	204	5447	2638	1690	-2809	+106,5	+10,9	+6,6	25,23	216	105	67
VENELLES	113	01	601	5225	2672	1553	+2553	+95,5	+10,0	+8,1	20,54	254	130	76
VENTABREN	114	32		2717	1537	934	+1180	+76,8	+8,4	+7,4	26,32	103	58	35
VERNEGUES	115	09		377	285	259	+92	+32,3	+4,1	+1,4	15,89	24	18	16
VERQUIERES	116	26		508	316	335	+192	+60,8	+7,0	-0,8	4,59	111	69	73
VITROLLES	117	06	701	22725	13413	5050	+9312	+69,4	+7,8	+15,0	36,58	621	367	138

NOM DE LA COMMUNE	NUMÉRO DE CODE		POPULATION SANS DOUBLES COMPTES							Superficie en km ²	DENSITÉ AU KM ²		
	de la commune	du canton	en 1982	en 1975	en 1968	Variation			en 1982		en 1975	en 1968	
						75-82		68-75					
						absolue	relative						relative (en % par an)
							en %	en % par an					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)			
LES ADRETS-DE-L' ESTEREL	001 13		684	424	361	+260	+81,3	+7,0	+2,3	22,26	31	19	16
AIGUINES	002 01		181	132	165	+29	+22,0	+2,9	-3,1	114,33	1	1	1
AMPUS	003 11		534	439	389	+95	+21,6	+2,8	+1,7	82,77	6	5	5
LES ARCS	004 16 102		3786	3324	3324	+462	+13,8	+1,9	-	54,26	70	61	61
ARTIGNOSC-SUR-VERDON	005 26		187	181	173	-6	+3,3	+0,5	+0,7	18,53	10	10	8
ARTIGUES	006 19		70	53	62	+17	+32,1	+4,0	-2,2	31,85	2	2	2
AUPS	007 01		1852	1500	1488	+152	+10,1	+1,4	+0,1	64,15	26	23	23
BAGNDLS-EN-FORET	008 13		889	882	562	+207	+30,4	+3,8	+2,8	42,90	21	16	13
BANDOL*	009 16 701		6706	6184	5088	+522	+8,4	+1,2	+2,8	8,58	X782	721	593
BARGÈME	010 08		74	77	61	-3	-3,9	-0,6	+3,4	27,95	3	3	2
BARGEMDN	011 06		1110	812	829	+298	+36,7	+4,5	-0,3	35,14	32	23	24
BARJOLS	012 02		2016	2092	2150	-76	-3,6	-0,5	-0,4	30,06	67	70	72
LA BASTIDE	013 08		115	130	84	-15	-11,5	-1,7	+6,5	11,78	10	11	7
BAUDINARD-SUR-VERDON	014 01		49	37	40	+12	+32,4	+4,1	-1,1	21,97	2	2	2
BAUDUEN	015 01		184	149	131	+35	+23,5	+3,0	+1,9	47,45	4	3	3
LE BEAUSSET*	016 03 203		5327	2992	2722	+2335	+78,0	+8,5	+1,4	35,95	X148	83	76
BEGENTIER*	017 25		984	890	561	+294	+42,6	+5,2	+3,0	13,38	X74	52	42
BESSE-SUR-ISSOLE	018 04		1040	756	821	+284	+37,6	+4,6	-1,2	37,19	28	20	22
BORMES-LES-MIMOSAS	019 07 210		3839	3093	2965	+746	+24,1	+3,1	+0,6	97,32	39	32	30
LE BOURGUET	020 08		23	20	31	+3	+15,0	+2,0	-6,1	25,39	1	1	1
BRAS	021 02		677	638	601	+39	+6,1	+0,8	+0,9	34,93	19	18	17
BRENON	022 08		16	15	15	+1	+6,7	+0,9	-	5,59	3	3	3
BRIGNOLES*	023 05 302		10412	9995	9051	+417	+4,2	+0,6	+1,4	70,53	X148	142	126
BRUE-AURIAÇ	025 02		429	380	425	-49	-12,9	-1,7	-1,6	36,73	12	10	12
CABASSE	026 04		786	802	905	-16	-2,0	-0,3	-1,7	45,49	17	18	20
LA CADIÈRE-D'AZUR*	027 03		2410	2044	1589	+366	+17,9	+2,4	+3,7	37,42	X64	55	42
CALLAS	028 06		945	708	608	+237	+33,5	+4,2	+2,2	49,26	19	14	12
CALLIAN	029 12		1449	1203	942	+246	+20,4	+2,7	+3,6	25,42	57	47	37
CAMPS-LA-SOURCE	030 05		767	581	474	+186	+32,0	+4,0	+3,0	22,47	34	26	21
LE CANNET-DES-MAURES	031 17 212		2320	1699	1435	+621	+36,6	+4,5	+2,5	73,64	32	23	18
CARCES	032 09		2092	1807	2026	+285	+15,8	+2,1	-1,6	35,76	59	51	57
CARNOULES	033 10		1761	1385	1449	+376	+27,1	+3,5	-0,6	25,49	69	54	57
CARQUEIRANNE	034 36 701		6199	5131	4449	+1068	+20,8	+2,7	+2,1	14,48	428	354	307
LE CASTELLET*	035 03		2332	2048	1229	+284	+13,9	+1,9	+7,6	44,77	X52	46	27
CAVALAIRE-SUR-MER	036 22 207		3912	2710	2116	+1202	+44,4	+5,4	+3,6	16,74	234	162	126
LA CELLE*	037 05		730	543	363	+187	+34,4	+4,3	+5,9	21,00	X35	25	17
CHATEAUBOUBLE	038 06		271	194	238	+77	+39,7	+4,9	-2,9	40,91	7	5	6
CHATEAUVERT	039 02		100	76	125	+24	+31,6	+4,0	-6,9	27,52	4	3	5
CHATEAUVIEUX	040 08		34	26	26	+8	+30,8	+3,9	-	14,97	2	2	2
CLAVIERS	041 06		469	404	359	+65	+16,1	+2,1	+1,7	15,90	29	25	23
COGOLIN	042 14 206		5639	4577	3292	+1062	+23,2	+3,0	+4,8	27,93	202	164	118
COLLOBRIÈRES	043 07		1337	1135	1176	+202	+17,8	+2,4	-0,5	112,68	12	10	10
COMPS-SUR-ARTUBY	044 08		271	206	242	+65	+31,6	+4,0	-2,3	63,49	4	3	4
CORRENS	045 09		521	414	462	+107	+25,8	+3,3	-1,6	37,06	14	11	12
COTIGNAC	046 09		1628	1636	1398	-8	-0,5	-0,1	+2,3	44,26	37	37	32
LA CRAU	047 36 701		8877	5772	5308	+3105	+53,8	+6,3	+1,2	37,87	234	152	140
LA CROIX-VALMER	048 22 207		2064	1759	1380	+305	+17,3	+2,3	+3,5	22,28	93	79	82
CUERS*	049 10 209		6571	5453	5107	+1118	+20,5	+2,7	+0,9	50,53	X130	108	101
DRAGUIGNAN	050 11 401		26667	21448	18376	+5219	+24,3	+3,1	+2,2	53,75	496	399	342
ENTRECASTEAUX	051 09		527	472	483	+55	+11,7	+1,6	-0,3	32,11	16	15	15
ESPARRON	052 02		192	159	204	+33	+20,8	+2,7	-3,5	30,04	6	5	7
EVENOS*	053 18		1064	700	647	+354	+50,6	+6,0	+1,1	41,95	X25	17	15
LA FARLEDE*	054 25 701		4472	3027	2540	+1445	+47,7	+5,7	+2,5	8,31	X538	364	306
FAYENCE	055 12		2852	2146	1788	+506	+23,6	+3,1	+2,8	27,68	95	78	64
FIBANIERES	056 06		1176	758	571	+418	+55,1	+6,4	+4,1	28,17	42	27	20
FLASSANS-SUR-ISSOLE	057 04		1040	905	882	+135	+14,9	+2,0	-0,9	43,68	24	21	22
FLAYOSC	058 11		2384	1867	1454	+517	+27,7	+3,5	+3,6	45,95	52	41	32
FORCALDUEIRET	059 20		744	315	215	+429	+136,2	+13,0	+6,6	10,33	72	30	21
FOX-AMPHOUX	060 26		287	248	229	+39	+15,7	+2,1	+1,1	40,76	7	6	6
FREJUS	061 13 501		31662	28851	23629	+2811	+9,7	+1,3	+2,9	102,27	310	282	231
LA GARDE*	062 41 701		18805	15506	9829	+4299	+27,7	+3,6	+7,1	15,54	X1274	998	620
LA GARDE-FREINET	063 14		1402	1241	1332	+161	+13,0	+1,7	-1,0	76,64	18	16	17
GAREOULT*	064 20		1849	1051	711	+798	+75,9	+8,4	+5,8	15,75	X117	67	45
GASSIN	065 22 211		2017	1519	1107	+498	+32,8	+4,1	+4,6	24,74	82	61	45
GINASSERVIS	066 19		779	643	612	+136	+21,2	+2,8	+0,7	37,47	21	17	16
GONFARON	067 04		2277	2308	2133	-31	-1,3	-0,2	+1,1	40,42	56	57	53
GRIMAUD	068 14 301		2910	2408	1672	+502	+20,8	+2,7	+5,4	44,58	65	54	38
HYÈRES	069 701		38999	38123	34875	+2876	+8,0	+1,1	+0,5	132,38	295	273	263
LE LAVANDOU	070 07 210		4269	3796	3271	+471	+12,4	+1,7	+2,2	29,65	144	128	110
LA LONDE-LES-MAURES	071 36 201		5184	3937	3956	+1247	+31,7	+4,0	-0,1	78,29	85	50	50
LORGUES	072 16 202		5196	4173	3401	+1023	+24,5	+3,2	+3,0	64,37	81	65	53
LE LUC	073 17 212		6049	5626	4286	+423	+7,5	+1,0	+4,0	44,16	137	127	87
LA MARTRE	074 08		61	51	46	+10	+19,6	+2,8	+1,5	20,37	3	3	2
LES MAYONS	075 17		300	274	253	+26	+9,5	+1,3	+1,1	28,86	10	9	9
MAZAUGUES*	076 20		359	331	385	+28	+8,5	+1,2	-1,4	53,79	X7	6	7

NOM DE LA COMMUNE	NUMERO DE CODE			POPULATION SANS DOUBLES COMPTES							Superficie en km ²	DENSITÉ AU KM ²			
	de la commune	du canton	de l'unité urbaine	en 1982	en 1975	en 1968	Variation					en 1982	en 1975	en 1968	
							75-82		68-75						
							absolue	relative		relative (en % par an)					
								en %	en % par an						
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)					
MEDUNES-LES-MONTRIEUX X	077	20		828	632	585	+296	+46,8	+5,6	+1,1	40,82	X23	15	14	
MOISSAC-BELLEVUE	078	26		117	106	89	+11	+10,4	+1,4	+6,3	20,58	6	5	3	
LA MOLE	079	22		344	282	286	+62	+22,0	+2,9	-0,2	45,28	6	6	6	
MONS	080	12		291	239	226	+62	+21,8	+2,8	+0,8	76,63	4	3	3	
MONTAUXOUX	081	12		1997	1375	1053	+622	+45,2	+5,4	+3,9	33,64	60	41	31	
MONTFERRAT	082	06		428	634	338	-206	-32,5	-5,4	+8,4	34,01	13	19	10	
MONTFORT-SUR-ARGENS	083	09		551	502	542	+49	+8,8	+1,3	-1,1	11,92	46	42	45	
MONTMEYAN	084	26		299	387	408	-88	-22,7	-3,6	-0,8	39,43	8	10	10	
LA MOTTE	085	11		1557	1007	818	+550	+54,6	+6,4	+3,0	28,12	55	36	29	
LE NUJY	086	37	204	5442	4280	3820	+1162	+27,1	+3,5	+1,6	66,66	82	64	57	
NANS-LES-PINS X	087	21		1347	953	813	+394	+41,3	+5,0	+2,3	47,99	X28	20	17	
NEOULES X	088	20		619	372	439	+247	+66,4	+7,5	-2,3	25,08	X25	15	18	
OLLIERES	089	21		200	151	138	+49	+32,5	+4,1	+1,3	39,66	5	4	3	
OLLIQULES X	090	18	701	9242	8786	7803	+456	+5,2	+0,7	+1,7	19,89	X485	442	392	
PIERREFEU-DU-VAR	091	10	104	3983	3872	3951	+111	+2,9	+0,4	-0,3	58,36	68	66	68	
PIGNANS	092	04		1789	1674	1792	+115	+6,9	+0,9	-1,0	34,87	51	48	51	
PLAN-D'AUPS X	093	21		249	207	185	+42	+20,3	+2,7	+1,6	24,91	X10	8	7	
PLAN-DE-LA-TOUR	094	14		1448	1260	1036	+188	+14,9	+2,0	+2,8	36,80	39	34	28	
PONTEVES	095	02		417	319	345	+98	+30,7	+3,9	-1,1	41,07	10	8	8	
POURCIEUX	096	21		481	256	256	+25	+9,8	+1,3	-	21,23	13	12	12	
POURRIERES	097	21		1718	1270	980	+448	+35,3	+4,4	+3,8	56,32	31	23	17	
LE PRADET X	098	41	701	7900	6938	5658	+962	+13,9	+1,9	+3,0	9,97	X792	696	566	
PUGET-SUR-ARGENS	099	37	501	4509	3849	3033	+660	+17,1	+2,3	+3,5	26,90	168	143	113	
PUGET-VILLE	100	10		2115	1819	1755	+296	+16,3	+2,2	+0,5	36,83	57	49	48	
RAMATUELLE	101	22		1762	1209	1253	+553	+45,7	+5,5	-0,5	35,57	50	34	35	
RAYOL-CANADEL-SUR-MER	102	22		868	846	613	+22	+2,6	+0,4	+4,7	6,83	127	124	90	
REGUSSE	102	26		482	326	272	+156	+47,9	+5,7	+2,6	35,30	14	9	8	
LE REVEST-LES-EAUX X	103	41	701	2055	1688	1659	+367	+21,7	+2,8	+0,2	24,07	X85	70	69	
RIANS	104	19		1723	1458	1492	+265	+18,2	+2,4	-0,3	96,87	18	15	15	
RIBOUX X	105	03		6	15	15	-12	-66,7	-14,5	+2,6	13,48	X	1	1	
ROCBARON	106	20		778	310	222	+468	+151,0	+14,0	+4,9	20,28	38	15	11	
LA RODUE-ESCLAPON	109	08		136	122	112	+14	+11,5	+1,6	+1,2	26,98	5	5	4	
ROQUEBRUNE-SUR-ARGENS	107	37	208	6301	5041	3698	+1260	+25,0	+3,2	+4,5	106,10	59	48	35	
LA RODUEBRUSSANNE X	108	20		809	662	710	+147	+22,2	+2,9	-1,0	37,05	X22	18	19	
ROUGIERS X	110	21		646	504	576	+142	+26,2	+3,6	-1,9	20,53	X31	25	28	
SAINTE-ANASTASIE-SUR-ISSOLE	111	20		754	313	318	+441	+140,9	+13,3	-0,2	10,71	70	29	30	
SAINTE-ANTONIN-DU-VAR	114	09		365	288	313	+77	+26,7	+3,4	-1,2	17,64	21	16	18	
SAINTE-CYR-SUR-MER X	112	03	458	5685	4728	4126	+957	+20,2	+2,7	+2,0	21,15	X289	224	195	
SAINTE-JULIEN	113	19		825	611	421	+214	+35,0	+4,4	+5,5	75,88	11	8	6	
SAINTE-MANDRIER-SUR-MER X	113	38	701	4946	4272	3018	+674	+15,8	+2,1	+5,1	5,12	X966	834	589	
SAINTE-MARTIN	114	02		116	102	98	+14	+13,7	+1,8	+0,6	26,33	4	4	4	
SAINTE-MAXIME	115	14	301	7364	6627	5436	+737	+11,1	+1,5	+2,9	81,61	90	81	67	
SAINTE-MAXIMIN-LA-SAINTE-BAUME	116	21	205	5511	4013	3180	+1498	+37,3	+4,6	+3,4	64,13	86	63	50	
SAINTE-PAUL-EN-FORET	117	12		578	557	433	+21	+3,8	+0,5	+3,7	20,26	29	27	21	
SAINTE-RAPHAEL	118	39	501	24118	21080	17844	+3038	+14,4	+1,9	+2,4	69,69	269	235	199	
SAINTE-TROPEZ	119	22	211	6213	5427	6130	+786	+14,5	+1,9	-1,7	11,18	556	485	548	
SAINTE-ZACHARIE X	120	21		2206	1632	1499	+674	+44,0	+5,3	+0,3	27,02	X82	57	55	
SALERNES	121	23	101	2682	2469	2362	+413	+16,7	+2,2	+0,6	39,30	73	63	60	
LES SALLES-SUR-VERDON	122	01		131	125	165	+6	+4,8	+0,7	-3,9	4,97	26	25	33	
SANARY-SUR-MER X	123	18	701	11505	10264	8851	+1241	+12,1	+1,6	+2,1	19,24	X598	533	460	
SEILLANS	124	12		1609	1211	1147	+398	+32,9	+4,1	+0,8	88,66	18	14	13	
SEILLONS-SOURCE-D'ARGENS	125	02		397	309	295	+88	+28,5	+3,6	+0,7	25,11	16	12	12	
LA SEYNE-SUR-MER X	126		701	57659	51155	43783	+6504	+12,7	+1,7	+2,3	22,17	X2601	2307	1975	
SIGNES X	127	03		1078	922	666	+156	+16,9	+2,2	+5,0	133,10	X	8	7	5
SILLANS-LA-CASCADE	128	26		343	249	173	+84	+37,8	+4,7	+6,4	20,17	17	12	9	
SIX-FOURS-LES-PLAGES X	129	40	701	25526	20090	15118	+5436	+27,1	+3,5	+4,2	26,56	X980	756	569	
SOLLIES-PONT	130	25	701	5482	4549	4214	+843	+20,7	+2,7	+1,1	17,73	310	257	238	
SOLLIES-TOUCAS X	131	25	701	2098	1549	1287	+549	+36,4	+4,4	+2,7	30,09	X70	51	43	
SOLLIES-VILLE X	132	25	701	1183	850	801	+343	+40,4	+4,9	+0,9	14,10	X85	60	57	
TANNERON	133	12		808	586	525	+222	+37,9	+4,7	+1,6	52,78	15	11	10	
TARADEAU	134	18		774	535	421	+239	+44,7	+5,4	+3,5	17,31	45	31	24	
TAVERNES	135	26		483	427	414	+56	+13,1	+1,8	+0,4	31,15	18	14	13	
LE THORONET	136	16		819	575	549	+244	+42,4	+5,2	+0,7	37,63	22	15	15	
TOULON X	137		701	179423	181801	174748	-2378	-1,3	-0,2	+0,6	42,84	X4188	4244	4079	
TOURRETTES	138	12		1067	887	743	+170	+19,0	+2,5	+2,7	33,99	31	26	22	
TOURTOUR	139	23		384	311	260	+73	+23,5	+3,0	+2,6	28,69	13	11	9	
TOURVES X	140	05		2137	1844	1648	+293	+15,9	+2,1	+1,6	65,62	X33	28	25	
TRANS-EN-PROVENCE	141	11	401	3156	2339	1530	+817	+34,9	+4,4	+6,3	16,99	186	138	80	
TRIGANCE	142	08		122	107	100	+15	+14,0	+1,9	+1,0	60,60	2	2	2	
LE VAL	143	06		1699	1308	972	+391	+29,9	+3,8	+4,3	39,34	43	33	26	
LA VALETTE-DU-VAR X	144	41	701	18296	14745	11194	+3651	+24,1	+3,1	+4,0	15,50	X1180	851	722	
VARAGES	145	02		786	772	829	-8	-0,8	-0,1	-1,0	35,11	22	22	24	
LA VERDIERE	146	19		524	505	486	+19	+3,8	+0,5	+0,8	68,16	8	7	7	
VERTIGNON	147	01		14	17	48	-3	-17,6	-2,7	-13,8	36,90	-	-	1	
VIDAUBAN	148	17	103	3805	2930	2757	+875	+29,9	+3,8	+0,9	73,83	51	40	37	

TABLE DES MATIERES

		<u>Page</u>
Remerciements	3
Chapitre 1	Introduction	4
Chapitre 2	Les Systèmes d'Information Géographique dans la littérature : leurs structures	
	2.1 Définition	9
	2.2 Structures communes aux Systèmes d'Information Géographique ..	9
	2.3 Différences entre des SIG de tailles différentes	11
Chapitre 3	Réalisation d'un Système d'Information Géographique en vue d'une étude locale	
	3.1 Définitions préliminaires	15
	3.2 Mise en place d'un Système d'Information Géographique	18
	3.3 Structure intrinsèque multi-couches d'un SIG	21
Chapitre 4	Utilisation du Système d'Information Géographique du Parc National du Mercantour pour une étude d'impact	
	4.1 Introduction - Présentation du SIG	25
	4.2 Présentation du projet	28
	4.3 Méthodologie suivie	31
	4.4 Résultats et discussion	33
	4.5 Conclusion	33

Chapitre 5	Un Système d'Information Géographique pour la synthèse cartographique des peuplements benthiques le long des côtes Varoises	
	5.1 Introduction	37
	5.2 Mise en oeuvre et réalisation du SIG	38
	5.2.1 Sélection des informations	39
	5.2.2 Intégration des informations	40
	5.2.3 Mise en place du SIG	41
	5.3 Synthèse cartographique : méthodes	42
	5.3.1 Généralités et définitions concernant les ensembles flous .	43
	5.3.2 Notion de cartes de fiabilité	45
	5.3.3 Présentation de la première méthode	48
	5.3.4 Présentation de la seconde méthode	48
	5.4 Résultats et discussion	50
	5.4.1 Résultats de la première méthode	50
	5.4.2 Résultats de la seconde méthode	53
	5.4.3 Comparaisons des résultats obtenus par ces méthodes	58
	5.5 Conclusion	58
Chapitre 6	Apport de la télédétection à la constitution d'un Système d'Information Géographique : l'exemple de la région Toulon - La Ciotat	
	6.1 Introduction	61
	6.2 Méthodes de traitement	61
	6.2.1 Adaptation des données de bases	62
	6.2.2 Classification supervisée	63
	6.2.3 Utilisation de la classification	67
	6.3 Conclusion	68
Chapitre 7	Intégration d'un Système d'Information Géographique dans un modèle numérique d'évolution temporelle	
	7.1 Introduction - Présentation de l'étude	71
	7.2 Présentation du Système d'Information Géographique utilisé	73

7.3	Modèle numérique d'évolution	76
7.3.1	Bibliographie des modèles existants	76
7.3.2	Description du modèle choisi	78
7.3.3	Essai du modèle d'évolution sur une image synthétique	84
7.3.4	Etalonnage du modèle numérique d'évolution	87
7.4	Définition des contraintes utilisées	88
7.4.1	Modèle numérique de terrain - Pentes	89
7.4.2	Exposition - Orientation des pentes	91
7.4.3	Régime de propriété forestière	93
7.4.4	Eclosions des feux	95
7.4.5	Distance aux citernes D.F.C.I.	97
7.4.6	Occupation des sols	99
7.4.7	Réseau routier	101
7.4.8	Contraintes finales	104
7.5	Termes source utilisés	107
7.6	Résultats et discussion	109
7.6.1	Résultats pour l'année 1985	110
7.6.2	Résultats pour l'année 2000	114
7.6.3	Résultats pour l'année 2025	120
7.7	Conclusion	126
Chapitre 8	Conclusions générales et perspectives	127
	Liste des illustrations	132
	Références bibliographiques	137
	Bibliographie	142
	Annexe 1	146
	Annexe 2	149
	Annexe 3	162
	Annexe 4	175

RESUME

L'augmentation de la quantité d'information disponible pour appréhender l'environnement a nécessité la création d'une nouvelle structure de gestion de l'information : le Système d'Information Géographique (SIG).

Deux types de SIG peuvent être trouvés : ceux couvrant une large zone (de la taille d'un pays), et ceux plus locaux dont la plupart possèdent un but précis. Quoique la philosophie de ces deux structures soit la même, la mise en oeuvre et la gestion restent plus aisées pour les SIG locaux.

La création et la mise en oeuvre d'un ou plusieurs SIG sont discutées. Trois exemples d'utilisation de SIG démontrent l'utilité de ces structures.

Le premier exemple correspond à une étude préliminaire d'impact lors d'un projet d'aménagement dans le Parc National du Mercantour. Les informations contenues dans le SIG sont utilisées comme un filtre binaire afin de localiser les lieux propices au projet.

Le second SIG concerne les peuplements benthiques de Méditerranée. La finalité de celui-ci est de synthétiser des informations sur un même lieu géographique, mais acquises avec des techniques de prélèvement différentes, par différents chercheurs et à des dates différentes. Cette synthèse fait appel à une notion de fiabilité de l'information.

L'association d'un SIG avec un modèle numérique de simulation de l'évolution du milieu urbain constitue le dernier exemple d'utilisation. Ce modèle numérique tient compte des contraintes du milieu environnant données par le SIG, ainsi que de l'apport exogène de population. Les résultats montrent des projections de l'évolution du milieu urbain pour les années 2000 et 2025 et pour différents scénarios, dans la région de Toulon (Var).

MOTS-CLES

Système d'Information Géographique

Synthèse cartographique

Etude d'impact

Traitement d'image

Peuplements benthiques

Modèle numérique

Simulation - Milieu urbain

Téledétection