



**HAL**  
open science

## Mise en place de systèmes d'information à références spatiales

A. Miralles

► **To cite this version:**

A. Miralles. Mise en place de systèmes d'information à références spatiales. Cemagref Editions, pp.1-152, 2004, 2-85362-641-5. hal-02583904

**HAL Id: hal-02583904**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02583904v1>**

Submitted on 3 Aug 2023

**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.

PUB00015947

# Séminaire

Mise en place  
de systèmes d'information  
à références spatiales

Montpellier, 13 et 14 novembre 2003

**Les actes**

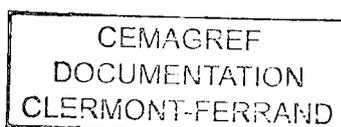
Réseau d'animation  
Représentation et gestion de l'information spatialisée  
(REGLIS) du Cemagref

## **Actes du V<sup>e</sup> séminaire**

# **Mise en place de systèmes d'information à références spatiales (SIRS)**

Montpellier, 13-14 novembre 2003

Coordinateur : André MIRALLES



Réseau d'animation « Représentation et gestion de l'information spatialisée » (REGLIS) du Cemagref – Actes du V<sup>e</sup> séminaire « Mise en place de systèmes d'information à références spatiales », Montpellier, 13-14 novembre 2003 – Coordinateur : André MIRALLES – Cemagref Éditions, 2004 – BP 44, 92163 Antony Cedex – Tél. : +33(0)1 40 96 62 85 – Impression et façonnage : Ateliers Cemagref – Vente par correspondance : PUBLITRANS, ZI Marinière, 2 rue Désir Prévost, 91080 Bondoufle, tél. : +33(0)1 69 10 85 85 – Diffusion aux libraires : TEC & DOC, 14 rue de Provigny, 94236 Cachan, tél. : +33(0)1 47 40 67 00 – ISBN 2-85362-641-5 – Dépôt légal : 3<sup>e</sup> trimestre 2004 – Prix : 19 € TTC.

# Sommaire

<b>Les Journées du réseau REGLIS</b>	4
<b>Liste des précédentes Journées REGLIS</b>	4
<b>Journées REGLIS 2003</b>	5
<b>Articles de communications orales</b>	
Modifier le fonctionnement et les modes de défaillance des digues pour évaluer leur performance : méthodologie et perspectives, <i>Damien Serre, Laurent Peyras, Youssef Diab</i>	13
Typologie des eaux courantes pour la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : l'approche par Hydro-écorégion, <i>Jean-Gabriel Wasson, André Chandesris, Hervé Pella, Laurence Blanc</i>	39
Constitution d'un système d'information à référence spatiale dans le contexte de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, <i>Hervé Pella, André Chandesris, Jean-Gabriel Wasson</i>	47
Mise en place d'un système d'information à références spatiales sur un ensemble « bassin versant/zone côtière » en appui à un projet de recherche <i>Françoise Vernier, Gilles Trut, Danièle Maurer, Isabelle Auby</i>	61
Aperçu des méthodes de conception de SIRS disponibles et proposition d'alternatives pour la modélisation de la dynamique des données spatio-temporelles, <i>François Laplanche</i>	79
La modélisation de données spatio-temporelles avec les outils du projet européen MurMur – Une aide à la conception d'un SIRS, <i>Roland Burnet</i>	97
Un AGL dédié à la géomatique, <i>Ahmed Lbath</i>	107
Un formalisme adapté aux géomaticiens pour décrire la distribution et les échanges de données au sein des systèmes télégéomatiques, <i>François Pinet, Frédéric Vigier, Ahmed Lbath</i>	127
Diffusion cartographique via Internet/Intranet avec SVG <i>Pierre Menu</i>	141

# Les Journées du Réseau REGLIS

L'Unité Mixte de Recherche Cemagref/Engref Structures et Systèmes Spatiaux (UMR 3S) organise régulièrement, à Montpellier, un séminaire du réseau d'animation interne *Représentation et Gestion de l'Information Spatialisée* (REGLIS). Ces journées s'articulent sur :

- une première **journée scientifique** ouverte à des participants extérieurs,
- et une seconde journée dont :
  - le début de matinée est consacré à des **ateliers thématiques** suivi d'une mise en commun des travaux,
  - l'après-midi est plutôt dédiée à l'**animation du réseau REGLIS** et à des échanges d'intérêt général pour les équipes du Cemagref autour de l'information spatiale.

Un thème structure le contenu de la journée scientifique et des ateliers thématiques.

Pour ce faire, un comité d'organisation prend en charge les aspects organisationnels liés à cet événement et un comité scientifique, composé de personnalités extérieures, valide les communications soumises.

## Liste des précédentes Journées REGLIS

### Journées REGLIS 1998

Analyse spatiale 15-16/12/1998

### Journées REGLIS 1999

Téledétection à très haute résolution spatiale 14-15/12/1999

### Journées REGLIS 2000

Représentations spatiales 17-18/01/2001

### Journées REGLIS 2001 (jumelées avec les Journées Cassini 2001)

Géomatique et espace rural 26-28/09/2001

# Journées REGLIS 2003

Le V<sup>e</sup> séminaire du réseau REGLIS a eu lieu les 13 et 14 novembre 2003 sur le thème *Mise en place de SIRS*<sup>1</sup> :

- le 13 a été consacré à la présentation de communications par les agents du Cemagref et par des intervenants extérieurs,
- le 14 a été structuré autour d'un premier atelier (atelier 1) portant sur les *Outils de modélisation de SIRS* et d'un second atelier (atelier 2) abordant les aspects liés à la *Conduite de projets SIRS*.

## 1 Contexte

Dès l'apparition des logiciels SIG en France à la fin des années 1980, des équipes thématiques du Cemagref s'en sont emparées comme outil supplémentaire de recherche ou encore pour réaliser des maquettes destinées à démontrer la capacité des SIG à répondre aux demandes complexes des gestionnaires de territoires.

À cette époque, on ne parlait pas encore de SIRS. Ce terme en provenance du Québec, s'est progressivement imposé au Cemagref pour bien faire la distinction entre l'outil logiciel SIG servant entre autre à la cartographie, l'analyse et la modélisation et le SIRS qui englobe toutes les composantes pour un usage opérationnel dans un contexte multi-acteurs (au sein ou en dehors du milieu de la recherche), à savoir les composantes techniques, informationnelles, humaines, organisationnelles, sociales et partenariales.

Plusieurs équipes du Cemagref ont multiplié les expériences à partir du milieu des années 1990 sur des thématiques aussi diverses que les marais atlantiques, les risques d'avalanche en montagne ou la viticulture en Languedoc-Roussillon. Les pratiques ont également évolué, avec par exemple des travaux de recherche sur les phases amont de modélisation conceptuelle d'applications ou pour suivre les innovations technologiques majeures comme le développement d'internet. Au-delà des phases initiales d'analyse/conception de SIRS multi-acteurs et de réalisation de maquettes, des équipes arrivent maintenant au stade de la mise en place d'applications opérationnelles pour des partenaires extérieurs, que ce soient des services de l'État, des collectivités territoriales ou des acteurs privés.

Un état des lieux des différents usages des SIG au Cemagref a d'ailleurs été mené au début 2002 et a fait l'objet d'un dossier SIG dans la lettre interne SPOT de mars 2002.

---

<sup>1</sup> SIRS : Système d'Information à Référence Spatiale.

En parallèle, la mise en oeuvre des politiques territoriales a évolué considérablement avec une prise en compte accrue de l'espace, de la multifonctionnalité des zones rurales, avec des approches de plus en plus intégrées, transversales et une participation d'acteurs toujours plus nombreux. Les SIRS doivent également évoluer pour pouvoir accompagner ces changements, pour tenir compte des différentes représentations d'un même territoire, pour supporter des raisonnements plus qualitatifs, pour intégrer des savoirs locaux en plus des savoirs experts, pour suivre et évaluer les impacts des politiques territoriales sur l'environnement.

Compte-tenu de ce contexte, les organisateurs ont considéré que le moment était opportun de faire le point et d'échanger sur les expériences passées ou en cours pour la mise en place de SIRS, que ce soit par des équipes du Cemagref ou par d'autres instituts de recherche.

## 2 Objectifs

### 2.1 Journée scientifique

Cette journée devait permettre de dresser un bilan des avancées scientifiques sur la *Mise en place de SIRS* et de réfléchir, en collaboration avec les partenaires extérieurs, aux orientations futures de ce sujet au sein des équipes du réseau REGLIS. Pour ce faire, la journée a été centrée sur :

- les **méthodes** pour l'analyse et la conception de SIRS,
- et les **outils** pour assister les concepteurs et les thématiciens dans leur développement.

Ces thèmes ont été ensuite approfondis dans les ateliers du 14 par des exposés, démonstrations et des discussions autour méthodes ou des outils.

### 2.2 Ateliers thématiques

#### 2.2.1 Outils pour la modélisation de SIRS

Cet atelier fait suite aux présentations de la journée scientifique sur les Outils pour l'analyse et la conception de SIRS. Aussi, l'objectif principal de l'atelier est de montrer :

- le formalisme utilisé pour introduire les objets spatiaux, temporels et spatio-temporels lors de l'analyse d'un système d'information,
- les fonctionnalités existantes dans les outils de modélisation,
- les produits pouvant générer de façon quasi-automatisés à partir d'un modèle d'analyse (dictionnaire des données, génération de code, etc.)

### **2.2.2 Conduite de Projet SIRS**

L'objectif était de déterminer les défaillances des méthodologies actuelles de développement d'applications SIG afin de proposer de nouvelles pistes de recherches. Pour ce faire, la première étape était d'analyser les méthodologies mises en œuvre dans les projets réalisés ou en cours afin de mettre en relief les "manques" de ces méthodologies.

## **3 Comité d'organisation**

Le comité d'organisation a impliqué :

- Éric Barbe
- Pierre Martinand
- Pierre Maurel
- André Miralles

Webmaster : Laurent Albrech

## **4 Comité scientifique**

Le comité scientifique des Journées REGLIS 2003 a été analysé et sélectionné les propositions de communication. Il a établi le programme de ces journées. Il a ensuite proposé des commentaires, des remarques et des corrections aux auteurs afin d'améliorer leur texte. Les membres de ce comité sont :

- Éric Barbe (Cemagref/Engref)
- Jean-Christophe Desconnets (Ird)
- Thérèse Libourel (Lirimm)
- Pierre Martinand (Cemagref/Engref)
- Pierre Maurel (Cemagref/Engref)
- André Miralles (Cemagref/Engref)
- Michel Passouant (Cirad)

## 5 Journée Scientifique du 13/11

### 5.3 Programme

Le programme définitif de la journée est reporté dans la tableau ci-dessous. Il comprend, outre une allocution introductive, deux sessions la première portant sur les méthodes et la seconde sur les outils d'analyse et de conceptions de SIRS.

<b>Journées REGLIS 2003</b>	
Pierre Maurel	Allocution introductive
<b>Thème de la Session</b>	<b>Méthodes pour l'analyse et la conception de SIRS</b>
Damien Serre	Modéliser le fonctionnement et les modes de défaillance des digues pour évaluer leur performance : méthodologie et perspectives
Jean-Gabriel Wasson	Typologie des eaux courantes pour la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : l'approche par Hydro-écorégion
Hervé Pella	Constitution d'un système d'information à référence spatiale dans le contexte de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau
Françoise Vernier	Mise en place d'un système d'information à références spatiales sur un ensemble « bassin versant/zone côtière » en appui à un projet de recherche
<b>Thème de la Session</b>	<b>Outils pour l'analyse et la conception de SIRS</b>
François Laplanche	Aperçu des méthodes de conception de SIRS disponibles et proposition d'alternatives pour la modélisation de la dynamique des données spatio-temporelles
Roland Burnet	La modélisation de données spatio-temporelles avec les outils du projet européen MurMur Une aide à la conception d'un SIRS
Ahmed Lbath	Un AGL dédié à la géomatique
François Pinet	Un formalisme adapté aux géomaticiens pour décrire la distribution et les échanges de données au sein des systèmes télégéomatiques
Pierre Menu	Diffusion cartographique Internet/Intranet avec SVG

### 5.4 Résumés succincts des communications

**Pierre Maurel** a, dans son allocution introductive, rappelé l'organisation et le programme scientifique de la journée, la définition d'un SIRS, les grands principes

des méthodes de conception de SI et particularités des SIRS. Il a aussi proposé une catégorisation des SIRS et une liste de questions scientifiques sous-tendant les travaux de recherche dans ce domaine.

#### **5.4.3 Session : Méthodes pour l'analyse et la conception de SIRS**

**Damien Serre**, communication intitulée *Modéliser le fonctionnement et les modes de défaillance des digues pour évaluer leur performance : méthodologie et perspectives*, a présenté la méthodologie employée pour décrire les digues. Elle dérive des techniques d'analyse des besoins employées dans l'industrie. Cette méthode d'analyse systémique s'appuie sur une première phase qui est l'analyse structurelle de la digue et sur une seconde phase qui est la réalisation de des blocs diagrammes fonctionnels. La description de la structure de la digue permet de construire l'aspect statique du SI alors que l'analyse fonctionnelle traduit le fonctionnement et donc l'aspect dynamique du SI.

Les communications de **Jean-Gabriel Wasson** et d'**Hervé Pella**, intitulées respectivement *Typologie des eaux courantes pour la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : l'approche par Hydro-écorégion* et *Constitution d'un système d'information à référence spatiale dans le contexte de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau*, sont complémentaires et présentent les réflexions et les concepts développés pour la mise en œuvre un SIRS dans le cadre de cette directive européenne sur l'eau dont l'objectif est d'obtenir une « bonne qualité écologique » pour l'ensemble des cours d'eau.

La communication de **Françoise Vernier**<sup>2</sup>, *Mise en place d'un système d'information à références spatiales sur un ensemble « bassin versant/zone côtière » en appui à un projet de recherche*, expose le processus de développement d'une base de données commune aux partenaires du projet LITEAU dont l'objectif principal est de permettre une meilleure appréhension les interactions entre les producteurs primaires bassin d'Arcachon et d'étudier de manière globale les flux d'azote, leur production par les activités du bassin versant amont et leur influence sur l'écosystème du bassin.

#### **5.4.4 Session : Outils pour l'analyse et la conception de SIRS**

Dans sa communication, *Aperçu des méthodes de conception de SIRS disponibles et proposition d'alternatives pour la modélisation de la dynamique des données spatio-temporelles*, **François Laplanche** passe en revue les méthodologies spécifiques aux SIG proposées par différents auteurs au travers des différents concepts de base (spatiaux, temporels, spatio-temporels et topologique). Il fournit un tableau comparatif de ces méthodes de conceptions en prenant compte les

---

<sup>2</sup> Indisponible la journée scientifique.

critères : représentation des concepts de base, de l'expressivité du modèle et de l'implémentation de la méthode dans un AGL.

**Roland Burnet**, dont communication *La modélisation de données spatio-temporelles avec les outils du projet européen MurMur - Une aide à la conception d'un SIRS*, présente aussi un état de l'art des méthodes de conception de SIG. Il poursuit par l'utilisation de l'AGL MADS<sup>3</sup> à un SIRS pour la gestion du risque naturel lié aux avalanches. Il souligne les avantages de modéliser une SIRS avec un AGL et les difficultés rencontrées.

Les communications de **Ahmed Lbath**, *Un AGL dédié à la géomatique*, et de **François Pinet**, *Un formalisme adapté aux géomaticiens pour décrire la distribution et les échanges de données au sein des systèmes télégéomatiques*, décrivent le formalisme de conception T-OMEGA dédié aux applications télégéomatiques. Ce formalisme a été implémenté dans l'Atelier de Génie Logiciel T-Aigle de la société Cyril Informatique.

**Pierre Menu**, *Diffusion cartographique via Internet/Intranet avec SVG*, introduit le standard SVG<sup>4</sup> (Scalable Vector Graphic) avec ses forces et ses faiblesses. Ce standard favorise l'interopérabilité entre applications et permet un affichage de grande qualité et une interactivité importante entre la carte et l'internaute.

## 5.5 Ateliers thématiques du 14/11

### 5.5.5 Outils pour la modélisation de SIRS

La méthode employée pour amorcer les discussions au sein de cet atelier a été d'organiser des démonstrations des principaux outils existants :

- « MADS » AGL développé par l'équipe de Stefano Spaccapietra de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), et utilisée dans le projet MurMur. Cet AGL a été présenté par Roland Burnet.
- « Aigle » plate-forme, développée par la société Cyril Informatique. La démonstration a été effectuée par François Pinet en remplacement de Ahmed Lbath indisponible.
- le « Profil SIG » module en cours de développement à l'UMR 3S qui enrichit l'AGL Objecteering, présentation de André Miralles.

---

<sup>3</sup> MADS : Modeling of Application Data with Spatio-temporal features.

<sup>4</sup> Standard développé par le World Wide Web Consortium (W3C).

### **5.5.6 Conduite de Projet SIRS**

Comme pour l'atelier 1, la méthode a consisté à organiser les réactions de l'assistance autour des expériences des différents participants. Pour ce faire, Christophe Chauvin et Pierre Maurel ont exposé leur expérience et leur retour d'expérience sur les projets actuellement en cours :

- Christophe Chauvin a explicité le mode opératoire qu'il a adopté pour la mise en place de SIG forestiers au niveau régional,
- Pierre Maurel a, quant à lui, rapporté son expérience sur le développement de l'application SIRS Dignes dont il a la charge.

## **6 Remerciements**

Les remerciements s'adressent aux membres du comité scientifique et du comité d'organisation du réseau REGLIS ainsi qu'à l'ensemble des intervenants et des participants sans qui cette journée n'aurait pas pu avoir lieu.

Plusieurs personnes de se sont particulièrement investies dans l'organisation de cet événement : Thérèse Libourel et Jean-Pierre Chéry pour l'animation et le compte-rendu des ateliers, Laurent Albrech pour la construction et la gestion du site Web, Paulette Robert et Véronique Jalabert pour le secrétariat et la logistique.

Qu'elles en soient ici vivement remerciées.



# **Modéliser le fonctionnement et les modes de défaillance des digues pour évaluer leur performance : méthodologie et perspectives**

## *Analyse river levee functions and failure modes to estimate their performance : methodology and research perspectives.*

Damien Serre<sup>1</sup>, Laurent Peyras<sup>1</sup>, Youssef Diab<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cemagref, Unité de Recherche "Ouvrages Hydrauliques et Équipements pour l'Irrigation", B.P. 31, 13612 Aix en Provence Cedex 1 – Tél. : 04 42 66 99 10 - Fax : 04 42 66 88 65  
laurent.peyras@cemagref.fr - damien.serre@cemagref.fr

<sup>2</sup> LGUEH (Laboratoire de Génie Urbain, Environnement et Habitat) Université de Marne la Vallée, 5 Bd Descartes, Bâtiment Lavoisier 77454 Marne la Vallée Cedex 2.  
Tél. : 01 60 95 73 40 - Fax : 01 60 95 73 49 – ydiab@univ-miv.fr

**Résumé :** La France, et plus généralement l'Europe, subissent, depuis une dizaine d'années, de fréquents épisodes de crues dévastatrices. De plus, les digues de protection contre les inondations ne sont souvent pas (ou peu) entretenues et de nombreuses ruptures liées à un mauvais état des ouvrages ont été observées. L'ancienneté des ouvrages, la multiplicité de leurs propriétaires et des réalisations induisent une importante perte de l'information (constitution de l'ouvrage, travaux de confortement...). De plus, leur longueur (plusieurs milliers de kilomètres en France) complique amplement leur gestion ; ce long linéaire pose une question majeure : par où commencer la réalisation de travaux de confortement ou d'entretien ? Pour répondre à ce problème, nous avons choisi de modéliser le fonctionnement des digues ainsi que leurs modes de dégradation et/ou de rupture. A partir des résultats obtenus, nous visons à produire des indicateurs pour évaluer la performance des digues. Ces derniers, couplés à un système d'information géographique, pourront constituer un outil d'aide à la décision rapide et efficace pour optimiser l'entretien des digues.

**Abstract:** More and more floods occurred over the last decade in France and all over Europe, leading to important damages. Moreover, levees are often not well-managed, so they can't resist to major floods and could breach quite easily. Levee ageing and numerous owners lead to considerable losses of information (repairs, levee make-up...). Furthermore, their length (several thousands kilometers in France) complicates the management and brings up the question: which section must be handled first? To answer such a question, we choose to analyse levee functions and to build several breaking and ageing scenarios. Due to the results obtained, we hope to build levee performance indicators. This type of indicators, combined with a geographic information system, could be a quick and efficient decision support tool to optimise levee management.

**Mots-clés :** digue, analyse fonctionnelle, AMDE, indicateurs de performance, SIG.

**Keywords:** levee, function analysis, FMEA, performance indicators, GIS.

# 1 Introduction

Les inondations provoquent d'importants dégâts et les coûts induits sont considérables : la pression urbaine a abouti à autoriser la construction de bâtiments dans le lit majeur des rivières et les digues de protection contre les inondations - souvent sous-dimensionnées et mal entretenues - ont montré leurs faiblesses à plusieurs reprises lors des crues.

Du fait de l'ancienneté des ouvrages (parfois plusieurs siècles) et de la multiplicité de leurs propriétaires, une quantité importante d'informations relatives aux digues (conception et construction de l'ouvrage, travaux de confortement...) a été perdue. De plus, leur longueur (plusieurs milliers de kilomètres en France) ne favorise pas la conservation d'une documentation historique et complique amplement leur gestion. Les acteurs intervenant sur les digues (propriétaires, gestionnaires, services de l'Etat) sont conscients de l'importance de la mise en place de plans de gestion et d'entretien. Mais ce long linéaire pose une question majeure : par où commencer la réalisation de travaux de confortement et d'entretien ?

Pour répondre à ce problème, il faut élaborer une méthode de recherche géographique qui permette de repérer les portions de digues (tronçons) qui ont la plus grande probabilité de se rompre lors d'une crue. La méthode consiste à s'appuyer sur un relevé visuel de tous les désordres et singularités (présence de végétation, de terriers d'animaux, de réseaux traversant l'ouvrage...) et sur la collecte d'informations relatives à l'ouvrage et son environnement (l'état général, la conception de la digue, son profil, la topographie, l'histoire...) - l'objectif étant de parvenir à évaluer l'aléa de rupture d'un tronçon de digue.

Notre communication a pour objet, après une présentation générale du contexte de notre recherche, de présenter la démarche que nous avons retenue pour modéliser le fonctionnement des digues et les différents scénarios de rupture ou de dégradation. Dans une dernière partie, nous exposons la manière dont nous pensons construire des indicateurs pertinents pouvant informer rapidement sur l'état des digues et nous examinons comment un outil à références spatiales pourrait permettre de les intégrer et de les valoriser.

## 2 Contexte

Depuis 1995, le Cemagref et certains bureaux d'ingénierie ont été, à plusieurs occasions, interpellés par des structures gestionnaires de digues de protection contre les inondations ou de canaux pour mettre au point et appliquer des méthodes de diagnostic et de surveillance des ouvrages (Mériaux *et al*, 2001). Les études en résultant, ont permis d'aboutir à l'élaboration de fiches-type de repérage, description et surveillance des désordres ainsi que de suivi des travaux de réparation ou d'entretien réalisés sur les digues.

Parallèlement, le ministère chargé de l'environnement (Direction de l'Eau) a lancé en 1999 (circulaire du 28 mai 1999) une enquête de recensement des endiguements protégeant des lieux habités contre les inondations dues aux crues ou aux remontées maritimes. Les données à recueillir concernent les digues elles-

mêmes (appréhendées toutefois à petite échelle), les structures gestionnaires et les zones protégées. Le Cemagref a été largement impliqué dans la conception des formulaires de saisie et du logiciel DIGUES, support de l'enquête.

Le recensement a ainsi contribué à développer des méthodes de diagnostic et d'enquête visant à collecter des informations pertinentes pour la connaissance et la gestion des digues.

## 2.1 La phase opérationnelle

L'évolution du matériel informatique permet d'acquérir, de stocker, de gérer et d'afficher un grand nombre d'informations et de données et même directement sur les sites d'études et en différé au bureau.

Ces progrès, couplés aux performances actuelles des outils cartographiques (SIG) d'une part, et à la précision du matériel de positionnement moderne (Global Positioning System) d'autre part, laissent envisager de grandes possibilités quant au développement d'un Système d'Informations à Références Spatiales (SIRS)<sup>1</sup> dédié aux digues.

Les premiers travaux sur le « SIRS digue » ont commencé en 1998, tout d'abord à l'initiative du Cemagref, puis progressivement avec l'appui d'autres partenaires.

En se basant sur une démarche structurée d'analyse/conception de SIRS (Rouzet *et al*, 1997), le Cemagref a alors financé et réalisé une première étude - dite de diagnostic stratégique - en questionnant des gestionnaires de la Loire et du Vidourle sur leurs pratiques actuelles et leurs attentes vis à vis d'un SIRS (Belouze, 1999). A l'issue de cette phase, il a été décidé de privilégier l'analyse d'un SIRS centré sur les digues et le lit fluvial endigué, à un niveau de précision adapté aux gestionnaires locaux (l'équivalent cartographique du 1/5000° au 1/10000°, avec la possibilité d'une gestion documentaire des informations à plus grandes échelles).

L'objectif a été ensuite de vérifier, d'un point de vue technique, l'intérêt pour les gestionnaires locaux d'un tel SIRS. Avec le soutien du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, le Cemagref a alors développé une maquette générique de sensibilisation sur le Val de Cisse en Loire Moyenne pour aider les gestionnaires à mieux cerner le potentiel d'un SIRS et ainsi, à affiner l'expression de leurs attentes (Maurel *et al*, 2001).

En 2001, deux syndicats gérant chacun environ 200 kilomètres de digues se sont associés dans l'objectif d'adopter ce mode de gestion moderne et novateur pour ce type d'ouvrage à long linéaire.

Aujourd'hui, et sur la base d'un cahier des charges précis (Maurel *et al*, 2002), l'application informatique est en cours de développement. Une première version du logiciel devrait être disponible d'ici juillet 2004. Cette dernière phase d'achèvement du SIRS est la suite logique d'un long travail de modélisation de la base de données que devra intégrer et gérer le logiciel. De plus, l'alimentation régulière du SIRS en données de qualité étant une des conditions clés pour que ce type d'outil

---

<sup>1</sup> SIRS : Système d'Information à Référence Spatiale. Ce terme est préféré au terme SIG trop souvent considéré comme une « simple » application logicielle en omettant les composantes humaines, organisationnelles et économiques des systèmes d'information.

soit adopté par les gestionnaires de digues, une attention toute particulière a été accordée à l'élaboration des fiches de relevé sur le terrain utilisées par les gardes digues, principaux pourvoyeurs de données. Le principe retenu a été de concevoir tout d'abord des fiches les plus ergonomiques possibles pour un usage opérationnel sur le terrain indépendamment de l'application informatique, puis de développer sur cette base les écrans de saisie dans l'application SIRS digues.

## **2.2 L'apport de la recherche**

Parallèlement au développement d'une première version opérationnelle SIRS Digues, les travaux de recherche se poursuivent sur des aspects visant à rendre cet outil d'aide à la gestion encore plus pertinent.

L'objectif des recherches en cours est de parvenir à construire des indicateurs (Degoutte, 1999) capables d'évaluer l'état des levées. Or deux problèmes liés à la nature des digues se posent :

- les digues sont des ouvrages linéaires de « grande longueur », ce qui aboutit à procéder à une analyse par tronçon ;
- très peu de données concernant les digues sont disponibles (contrairement aux barrages, il n'existe que peu de dispositifs d'auscultation permanents).

Par conséquent, nous avons choisi de considérer la digue comme un système que nous analysons. Cela nous permet notamment de définir :

- les éléments de la digue qui composent ce système, ainsi que les relations entre chaque élément (analyse fonctionnelle) ;
- les modes de défaillance possibles et leurs effets sur le système.

Cette étude effectuée, nous tenterons de construire les indicateurs adéquats à partir de l'écriture de scénarios de rupture ou de dégradation. Puis nous les intégrerons dans le SIRS digue pour que les gestionnaires d'ouvrages puissent utiliser un système d'aide à la décision performant. L'outil SIRS pourra alors contribuer à prioriser les interventions de maintenance et de réparations et constituera un outil d'aide à la gestion et à la programmation (Ariaratnam *et al*, 2002) pour les responsables de digues.

## **3 L'analyse fonctionnelle et l'analyse des modes de défaillance des digues pour modéliser les scénarios de rupture**

Avant de construire des indicateurs d'évaluation de l'état des digues, il faut préalablement étudier leurs modes de fonctionnement. Cela suppose l'utilisation de méthodes d'analyse du fonctionnement et des modes de défaillance des ouvrages, de leurs relations avec l'environnement et du comportement de tous les éléments de la digue (composants).

Or, les digues fluviales sont des ouvrages anciens, leur structure est peu connue et leur grande longueur rend difficile et coûteuse l'utilisation de méthodes d'auscultation précises (Mériaux *et al*, 2001). De plus, du fait de l'hétérogénéité

des digues, les résultats d'investigations fines sont difficilement généralisables sur des tronçons entiers : en effet, au-delà de quelques mètres d'un sondage ponctuel, la structure de la digue peut varier sensiblement.

Nous devons donc mettre en place une démarche qui intègre le fait que :

- nous disposons de très peu de données relatives à la constitution des levées ;
- l'acquisition précise d'informations est rendue quasiment impossible du fait de la longueur des ouvrages.

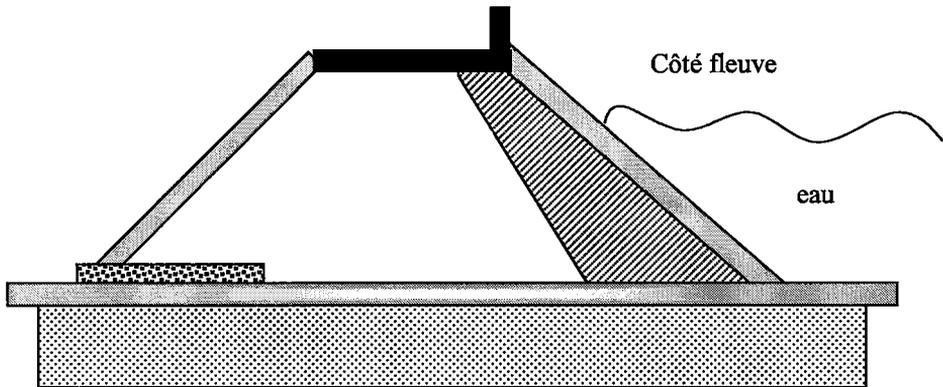
Pour prendre en compte ce contexte, notre démarche va reposer sur l'analyse des fonctions des digues et de leurs modes de défaillance. L'analyse fonctionnelle identifie les interactions au sein de la digue et avec les milieux extérieurs, et recherche les fonctions réalisées par la digue et ses composants. Elle consiste à définir la digue (composants, matériaux) et son environnement (autres systèmes, milieux extérieurs en interaction), à examiner les processus de conception et de réalisation et les modes d'exploitation. Après avoir précisé ce sur quoi nous travaillons et à quel niveau de précision, nous identifions de façon systématique les fonctions remplies par la digue et ses composants.

La modélisation de fonctionnement d'un système a pour objectif d'identifier les risques potentiels du point de vue des fonctions qu'il doit remplir. Il s'agit de rechercher toutes les causes de défaillance et tous les mécanismes pouvant affecter son fonctionnement.

Cette démarche basée sur l'analyse fonctionnelle et des modes de défaillance a été récemment développée au Cemagref pour l'analyse des risques des barrages (Peyras, 2003). De nombreuses méthodes existent (AMDE - Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets, Arbres des Conséquences, Arbres d'Événements...) et nous expliquons, dans la partie suivante, nos choix.

### **3.1 Synthèse des méthodes de modélisation fonctionnelle**

Le premier aspect que nous avons considéré est la ressemblance « naturelle » qui existe entre la structure d'une digue et celle d'un petit barrage en terre (Fig. 1). En examinant ces deux types d'ouvrage, nous remarquons non seulement que les profils en travers sont tout à fait ressemblants (nous retrouvons quasiment les mêmes composants constitutifs), mais aussi que la conception est finalement très proche (Durant *et al*, 1999), (Mériaux *et al*, 2001).



**Figure 1** Profil en travers généralisable à une digue ou à un petit barrage en terre à étanchéité amont.

De ce fait, adapter les méthodes développées dans le domaine des barrages nous est apparu essentiel, d'autant plus que la recherche est beaucoup plus avancée pour ces ouvrages que pour les digues.

### 3.1.1 L'analyse fonctionnelle

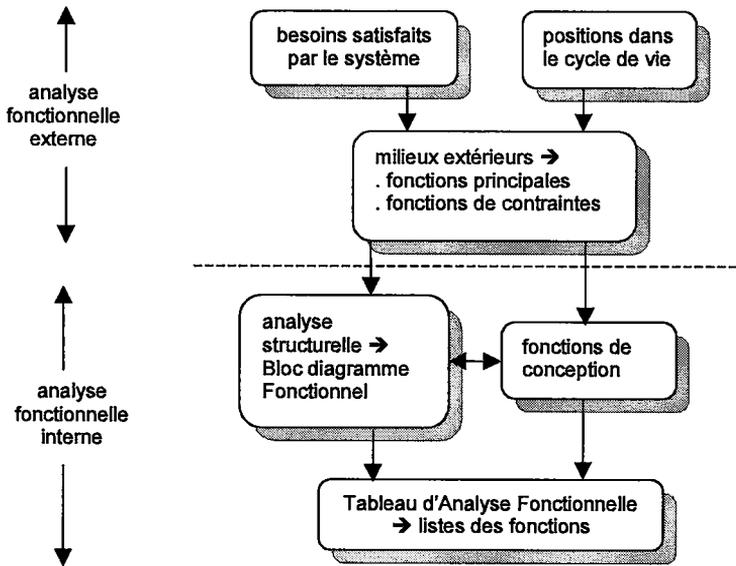
L'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions d'un système. Plusieurs méthodes d'analyse fonctionnelle existent et sont liées aux fonctionnalités du système à étudier. On distingue trois familles (Zwingelstein, 1996) :

- l'analyse fonctionnelle tirée des techniques d'analyse de la valeur : normes NF X50-150 à X50-153 ; Reliasép ; méthodes FAST, Den, APTE ;
- l'analyse fonctionnelle appliquée à l'informatique et aux logiciels : SADT et IDEF-0 ;
- l'analyse fonctionnelle appliquée aux organisations : méthode MERISE.

Dans le domaine des systèmes mécaniques (tels les digues), l'expérience tirée de l'utilisation des différentes méthodes a montré que les méthodes d'analyse de la valeur, bien que d'application générale, sont particulièrement adaptées.

Parmi celles ci, la méthode APTE (APplication des Techniques d'Entreprises) est l'une des plus utilisées en Sûreté de Fonctionnement et elle est généralement employée en vue d'une analyse des modes de défaillance ultérieure (Peyras, 2003). Nous proposons d'appliquer une démarche d'analyse fonctionnelle basée sur la méthode APTE, qui semble la mieux adaptée au contexte du génie civil.

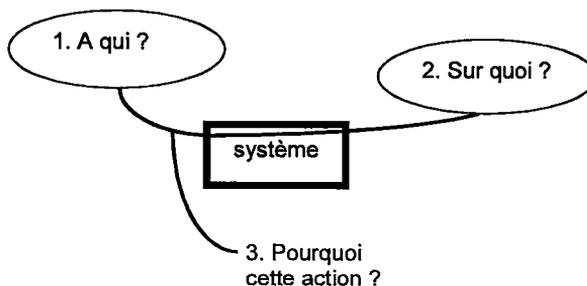
L'analyse fonctionnelle est essentielle à l'application d'une technique d'analyse des modes de défaillance puisqu'elle recense de manière exhaustive tous les éléments du système (analyse structurelle), les interactions du système avec le milieu extérieur (analyse fonctionnelle externe) et les interactions de chaque composant du système entre eux (analyse fonctionnelle interne).



**Figure 2** Processus de l'analyse fonctionnelle (Peyras, 2003).

L'analyse fonctionnelle se décompose en deux parties principales (Fig. 2) :

- l'analyse fonctionnelle externe qui permet d'exprimer le besoin que doit satisfaire le système, de le positionner par rapport à son environnement et de traduire ces besoins sous la forme de fonctions principales et de fonctions de contrainte (Fig. 3).



**Figure 3** Matérialisation du besoin (Zwingelstein, 1996).

- l'analyse fonctionnelle interne qui permet de lister exhaustivement le rôle et la participation des composants du système, chacun d'entre eux assurant des fonctions contribuant au fonctionnement global de l'ouvrage. Cette analyse permet d'obtenir les fonctions de conception et comprend les étapes suivantes :

- le choix de la granularité spatiale<sup>2</sup> ;
- l'analyse structurelle du système qui consiste à déterminer les composants et leur organisation ;
- la réalisation des blocs diagrammes fonctionnels qui matérialise les fonctions de conception, c'est à dire les fonctions liées aux contacts et aux flux des composants.

### **3.1.2 Les techniques de modélisation fonctionnelle**

Après avoir sélectionné la méthode d'analyse fonctionnelle la plus adaptée aux digues, nous devons également choisir une méthode capable de modéliser pertinemment le fonctionnement des digues.

Il existe de nombreuses techniques disponibles permettant de modéliser le fonctionnement des systèmes. Ces techniques font partie de la Sûreté de Fonctionnement qui est la Science des Défaillances, incluant leur connaissance, leur évaluation, leur prévision et leur maîtrise (Villemeur, 1988). Nous établissons une synthèse des différentes méthodes d'analyse recensées dans l'étude des barrages (Peyras, 2003) et nous expliquons pourquoi l'AMDE est la plus appropriée à notre contexte des digues.

Ces méthodes peuvent être regroupées dans deux catégories distinctes : les méthodes qualitatives ou les méthodes quantitatives.

#### **3.1.2.1 Les méthodes qualitatives**

Certaines méthodes sont qualitatives et visent à identifier les risques ou les modes de défaillance. On trouve l'Analyse Préliminaire des Dangers (APD), l'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE) et la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR).

L'Analyse Préliminaire des Dangers est utilisée dans les premières phases de conception d'un système et constitue un premier outil d'identification des risques potentiels. Elle est mise en œuvre en préliminaire d'une étude de sûreté de fonctionnement plus fine, telle une analyse AMDE.

L'identification des dangers est effectuée à partir de la connaissance et de l'expérience des experts. L'approche peut être déductive (recherche des causes d'une défaillance) ou inductive (recherche des effets d'une défaillance), selon que l'analyse est réalisée avec l'accident potentiel ou avec l'élément dangereux (Villemeur, 1988). L'APD consiste à rechercher les entités dangereuses, les situations dangereuses et les accidents potentiels en découlant. Les résultats obtenus sont présentés dans un tableau (Tab. 1).

---

<sup>2</sup> La granularité correspond à la finesse « d'un grain » d'un modèle. La granularité spatiale est l'échelle spatiale de description d'un système.

**Table 1** Tableau de l'Analyse Préliminaire des Dangers (Peyras, 2003).

systeme	phase	entités dangereuses	événement causant une situation dangereuse	situation dangereuse	accident potentiel	effet	gravité	mesure préventive

Cette technique ne présente pas d'intérêt pour les barrages et les digues car les modes de défaillance ou de rupture sont généralement bien identifiés. Ainsi, l'analyse du fonctionnement de ces ouvrages relève d'études de sûreté plus fines, telle que l'AMDE.

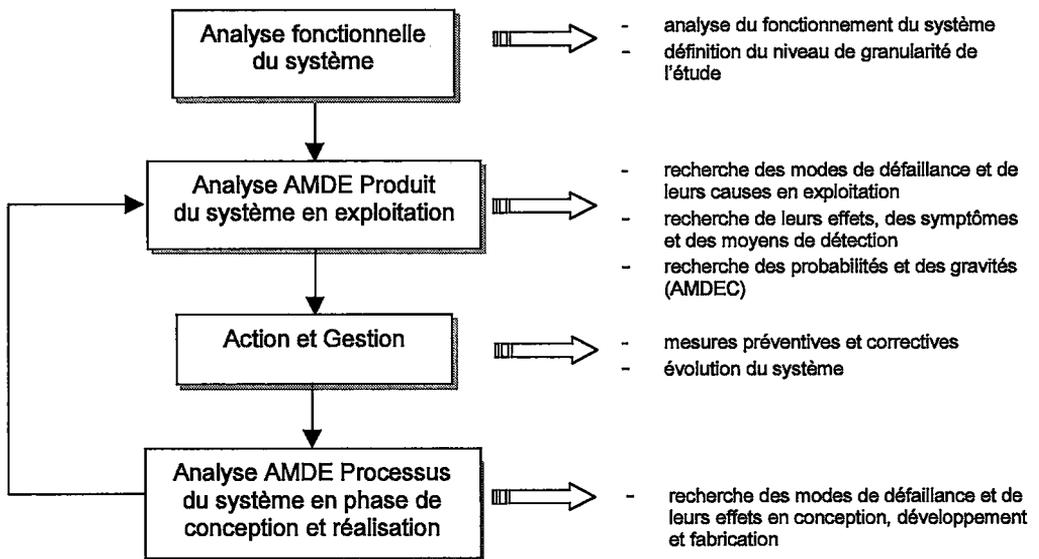
L'Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets (AMDE), ou Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) est apparue dans les années 1960 dans l'aéronautique et est actuellement une des méthodes de la Sûreté de Fonctionnement la plus universellement utilisée dans l'industrie (spatiale, nucléaire, automobile...). Cette méthode fait l'objet de nombreux guides et normes, généralement mis au point pour chaque contexte industriel particulier.

C'est une méthode inductive d'analyse des défaillances potentielles d'un système. Elle considère, systématiquement, l'un après l'autre, chaque composant du système et analyse ses modes de défaillance (un mode de défaillance est la non réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas, perte ou dégradation d'une fonction, fonction intempestive, et leurs effets).

Les résultats des analyses AMDE sont présentés sous forme de tableaux, spécialement conçus pour le type de système étudié. Le déroulement d'une AMDE comprend (Villemeur, 1988) :

- une analyse fonctionnelle du système,
- la recherche systématique des modes de défaillance et de leurs causes,
- la recherche des effets des modes de défaillance.

La chronologie des études AMDE répond à une logique de production industrielle, dans laquelle on essaie d'éliminer les défaillances liées aux phases de fabrication : les défauts de conception et de réalisation et les écarts par rapport aux normes et règles d'hygiène et sécurité. Elle comprend généralement trois analyses (Fig. 4) (ISDF) :



**Figure 4** Processus général de l'AMDE (Peyras, 2003).

- l'AMDE Produit est en principe réalisée en première phase : elle vérifie que le système assure en phase d'exploitation de façon satisfaisante les fonctions pour lesquelles il est conçu,
- l'AMDE Processus examine si le produit obtenu est bien conforme à ce qui est prévu. Elle identifie les modes de défaillance liés à la conception et à la réalisation du système,
- l'AMDE Moyen est parfois réalisée pour rechercher les moyens à mettre en œuvre.

L'AMDE est une méthode puissante pour améliorer la sûreté de fonctionnement d'un système. Elle permet de générer une base d'informations qui sert de support pour définir, améliorer, corriger et valider un produit tout le long de sa vie, depuis sa conception jusqu'à l'exploitation.

Les analyses AMDE mettent en évidence les défaillances simples du système. Pour prendre en compte la combinaison des modes de défaillance, la Méthode des Combinaisons de Pannes Résumées (MCPR) intervient après une étude AMDE en la complétant. Elle recherche de façon inductive les combinaisons de défaillances élémentaires aboutissant à des effets indésirables (Fig. 5). La technique MCPR pourrait présenter un intérêt pour le génie civil, en complément de la réalisation d'une AMDE. En effet, les événements indésirables (les modes de rupture) sont complexes et liés à des combinaisons de plusieurs modes de défaillance des composants.

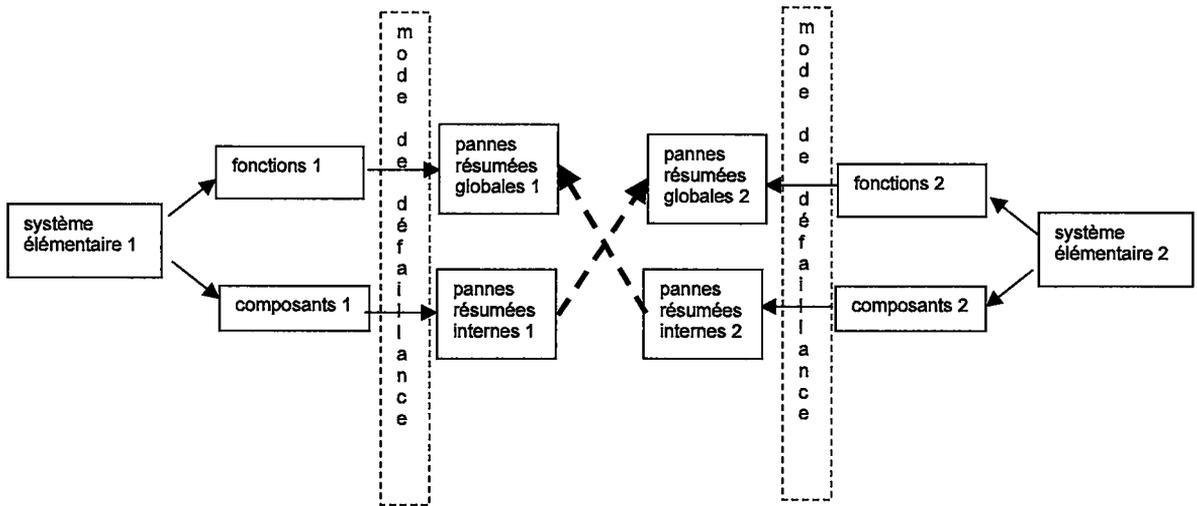


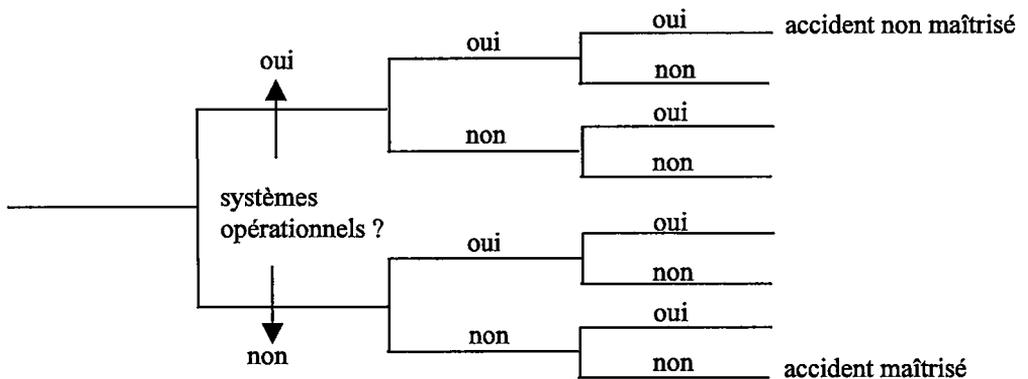
Figure 5 Démarche de la MCPR (Peyras, 2003).

### 3.1.2.2 Les méthodes quantitatives

Ces techniques visent, outre l'identification des risques, à produire des mesures de la sûreté de fonctionnement. Les principales sont la Méthode des Arbres d'Evénements (MAE) et la Méthode de l'Arbre des Causes (MAC). D'autres méthodes sont destinées à reproduire le fonctionnement dynamique d'un système : la Méthode de l'Espace des Etats, les réseaux de Petri stochastiques et les simulations de Monte Carlo.

La Méthode des arbres d'événements (MAE), appelée parfois la Méthode de l'Arbre des Conséquences, est issue de l'industrie nucléaire. Elle trouve ses applications dans les études de sûreté de fonctionnement des systèmes à fonctionnement binaire (marche ou défaillant) et à évolution chronologique (mécanisme non bouclé). La séquence des événements de l'arbre se déroule de façon inductive (Fig. 6), à partir de l'événement initiateur jusqu'aux événements finaux, chaque nœud faisant l'objet d'une recherche de probabilité d'occurrence. (Villemeur, 1988)

événement initiateur	système n°1	système n°2	système n°3	conséquences
----------------------	-------------	-------------	-------------	--------------



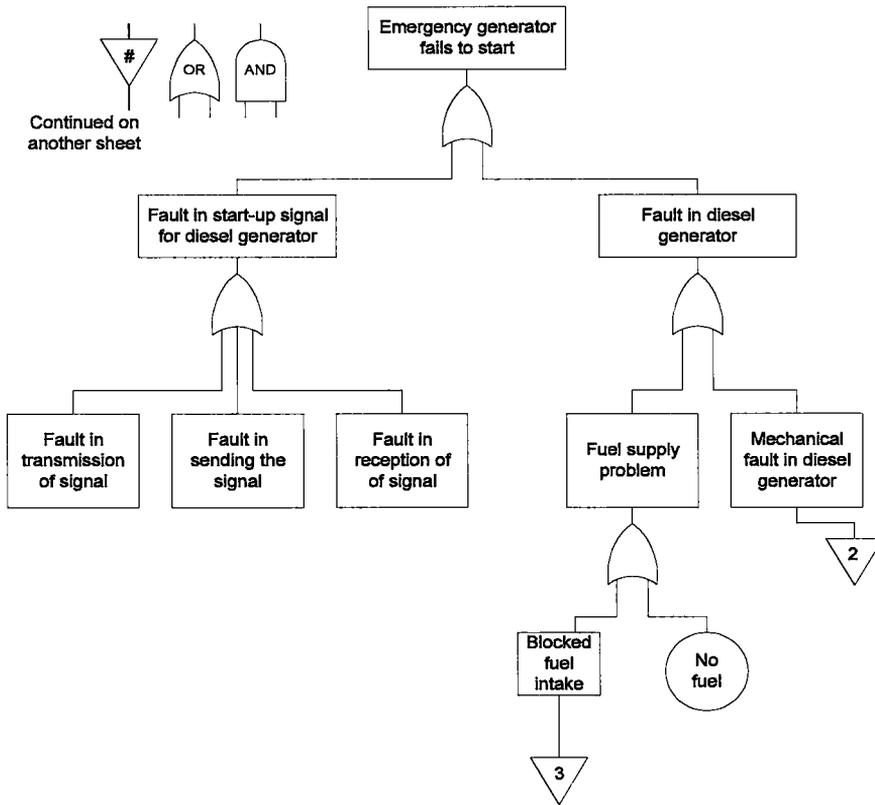
**Figure 6** Structure d'un arbre d'événement (Zwinglestein, 1996).

La MAE n'est pas particulièrement bien adaptée au contexte du génie civil : les défaillances des ouvrages et de leurs composants sont rarement binaires ni chronologiques, mais plutôt progressives, bouclées et redondantes. La MAE peut toutefois présenter un intérêt dans les études de sûreté de fonctionnement pour l'analyse quantitative de scénarios de défaillance pouvant conduire à la rupture. Elle doit être alors précédée obligatoirement d'une AMDE.

La Méthode des Arbres des Causes (MAC), parfois appelée la méthode de l'Arbre de Défaillances, est une méthode déductive : on part de l'événement indésirable situé au sommet de l'arbre (Top Event) et on déduit les événements intermédiaires et de base. Chaque niveau d'événements est relié en cascade à l'aide de symboles correspondant à des opérateurs logiques (et, ou, si...).

L'élaboration des arbres des causes a souvent été considérée comme un art pratiqué par l'analyste. (Villemeur, 1988) propose des éléments méthodologiques pour conduire une analyse MAC mais souligne les difficultés à s'assurer de l'exhaustivité des modes de défaillance. A ce titre, il propose l'application préalable d'une AMDE pour éviter les oublis lors de la construction des arbres.

En synthèse, la méthode MAC présente les mêmes inconvénients que la MAE dans le contexte du génie civil : logique binaire, défaillances chronologiques (Fig. 7).

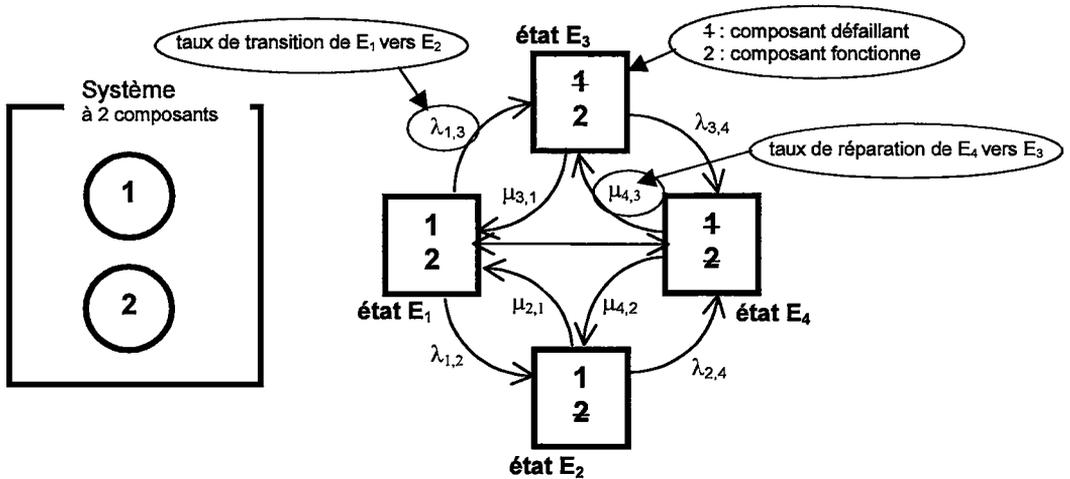


**Figure 7** Structure d'un arbre d'événement (Peyras, 2003).

La Méthode de l'Espace des Etats (MEE), ou la méthode des processus de Markov, consiste à représenter le comportement d'un système par un ensemble de composants pouvant se trouver dans un nombre fini d'états de fonctionnement. La combinaison de l'ensemble des états de fonctionnement des composants donne l'état du système à un instant donné (Fig. 8).

On recherche ensuite toutes les transitions possibles et leurs origines entre les différents états que le système peut occuper au cours de son exploitation. L'analyse est effectuée à partir de graphes d'états permettant de représenter ces différents états et les transitions entre chacun d'eux.

Pour un ouvrage de génie civil, tel que les digues, constitué de nombreux composants susceptibles de connaître plusieurs états de dégradation progressifs, les transitions à étudier deviennent rapidement très importantes, rendant la méthode inutilisable (données disponibles insuffisantes, complexité des mécanismes en jeu).



**Figure 8** Graphe d'état d'un système à deux composants et deux états possibles (marche ou défaillant) (Peyras, 2003).

Les réseaux de Petri stochastiques utilisent une représentation sous forme de graphes orientés marqués, indiquant les états (ou les places) des composants du système et les transitions entre chaque place, associées à un délai régi par une loi (déterministe ou probabiliste).

Même s'il est possible d'imaginer la conception d'un réseau de Petri stochastique pour un ouvrage du génie civil particulier, les limites de la méthode apparaissent dès lors que le système à étudier est complexe et qu'on envisage plusieurs états de dégradation : nombres de places et de transitions très importantes, lourdeur du graphe...

Lorsque le système à étudier est trop complexe, les méthodes du processus de Markov ou des réseaux de Petri stochastiques ne permettent pas un traitement correct sans approximations grossières ou mal maîtrisées. On préfère alors la simulation de Monte Carlo. Deux conditions sont nécessaires :

- un modèle de comportement du système étudié capable de reproduire de manière correcte son fonctionnement et son évolution au cours du temps lorsqu'il est soumis à différents aléas (défaillance, réparations, événements extérieurs...). La MEE ou les réseaux de Petri stochastiques peuvent constituer des supports intéressants,
- un logiciel de simulation de Monte-Carlo pour effectuer des tirages aléatoires des variables d'entrée (état du système), pour réaliser des histoires du système à partir de son modèle de comportement et pour analyser statistiquement les variables de sortie.

Dans le contexte du génie civil, cette méthode nécessite des informations particulièrement difficiles à obtenir, voire impossible (lois de variables, modèle de comportement).

### **3.1.2.3 Synthèse des méthodes et choix de l'AMDE pour les digues**

En synthèse, les méthodes que nous venons d'examiner permettent l'identification des risques et l'analyse du comportement des systèmes complexes. Elles sont quantitatives (MAC, MAE...), basées sur la construction de graphes d'états (MEE, réseaux de Petri stochastiques) ou basées sur la simulation (simulation de Monte-Carlo) ou qualitatives (APD, AMDE, MCPR).

La méthode AMDE semble la mieux adaptée à notre contexte. Elle permet, d'une part, de recenser de façon exhaustive les modes de défaillance et leurs effets dans les différentes phases de la vie du système (conception, réalisation et exploitation), d'autre part, de structurer les informations relatives aux dégradations des digues. Nous proposons donc d'adapter cette technique aux digues fluviales de protection contre les inondations.

## **3.2 L'application aux digues**

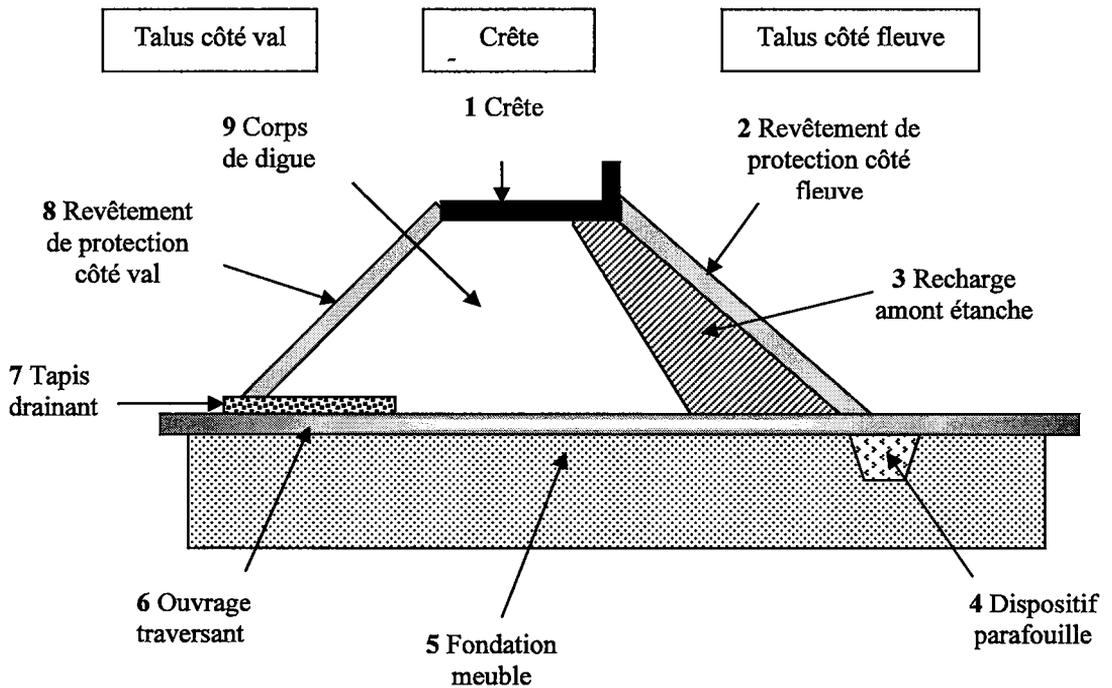
Une fois le choix des méthodes d'analyse réalisé, nous pouvons alors les appliquer aux digues de protection contre les inondations : tout d'abord l'analyse fonctionnelle puis l'AMDE. Nous présentons un exemple de scénario de rupture de digue en expliquant en quoi cette modélisation est intéressante pour la suite de notre recherche.

### **3.2.1 L'analyse fonctionnelle appliquée aux digues**

Nous traitons ici un exemple d'application pour un profil type de digue. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'analyse fonctionnelle interne qui concerne directement l'ouvrage.

La première étape est l'analyse structurelle : elle détermine d'une part à quelle granularité spatiale nous souhaitons (pouvons) entrer dans le détail de la composition de la digue (la digue d'une manière globale, ses composants ou les matériaux constitutifs) et d'autre part les éléments qui composent la digue (les composants). Nous avons vu que très peu de données sont disponibles quant à la composition des digues, de fait nous ne pouvons pas actuellement traiter l'ouvrage à l'échelle de ses matériaux : nous limitons notre étude au niveau du composant.

L'analyse structurelle des digues nous a conduit à retenir trois profils en travers types. Dans cet article, nous n'en présenterons qu'un (la méthode est la même pour chaque profil), correspondant au profil structurel d'une digue à étanchéité amont (Fig. 9). Les deux autres correspondent aux digues à étanchéité interne et aux digues en maçonnerie.



**Figure 9** Profils de digue en remblai à étanchéité amont.

L'ensemble des composants correspondant au résultat de l'analyse structurelle sont recensées dans un tableau (Tab. 2). Nous en avons retenu onze. A chacun d'entre eux est associé un numéro de nomenclature et nous établissons une description de la nature des matériaux pouvant rentrer dans la constitution des composants.

**Table 2** Liste des composants pour les digues en remblai à étanchéité amont.

Numéro	Composant	Nature possible
1	Crête	Granulats Terre
2	Revêtement de protection côté fleuve	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale Enrochements Enrochements et terre végétale
3	Recharge amont étanche	Argiles compactées Géomembrane
4	Dispositif para fouille	Enrochements Enrochements et rideau (palplanches ou pieux) Rideau (palplanches ou pieux) Maçonnerie Béton
5	Fondation meuble	Sol
6	Ouvrage traversant	Béton Métal Fonte Plastique Bois
7	Tapis drainant	Géotextile Granulats
8	Revêtement de protection côté val	Terre végétale Terre végétale et grillage anti-fouisseur Perré Perré et terre végétale
9	Corps de digue	Matériaux disponibles sur place
10	Dissipateur d'énergie	Béton Enrochements
11	Déversoir	Béton Perré

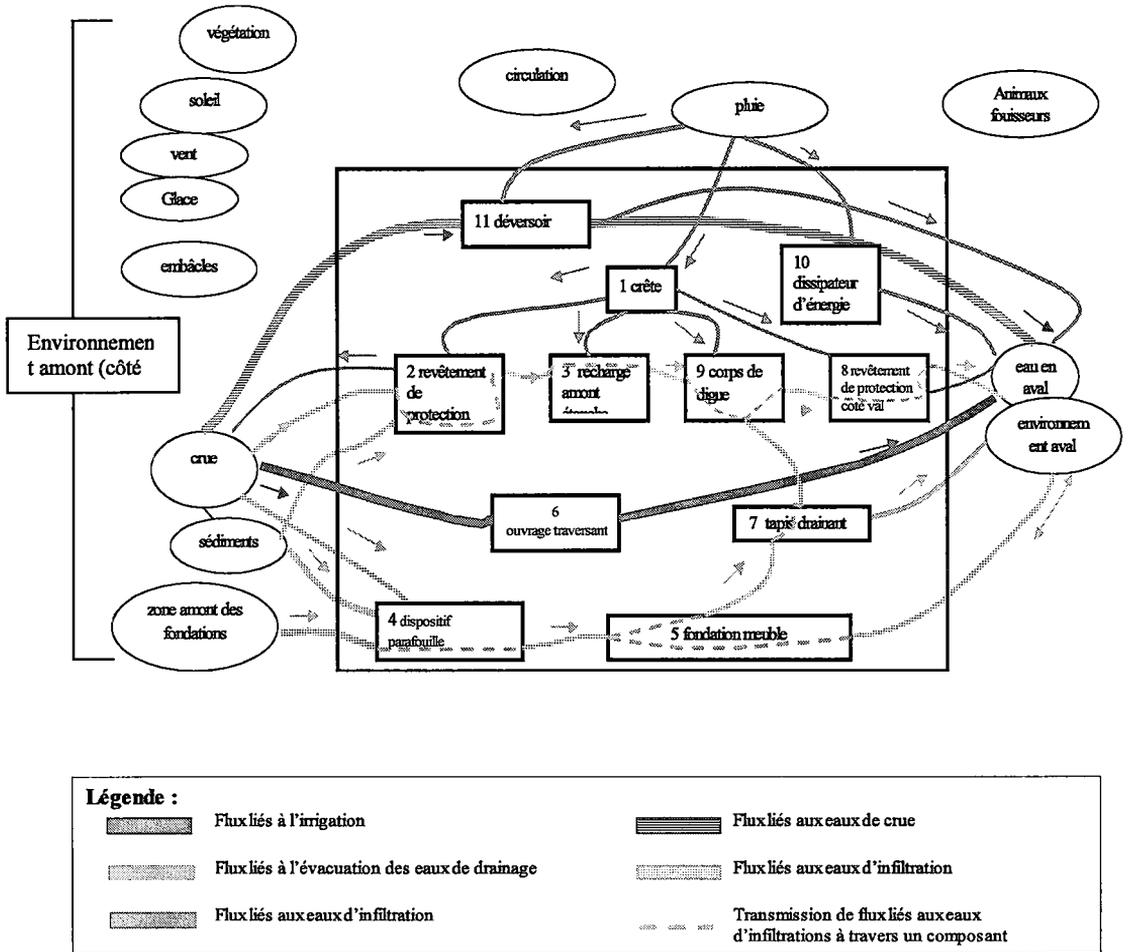
Une fois cette étape essentielle réalisée et validée par les experts, nous pouvons désormais construire les blocs diagrammes fonctionnels (BdF) qui permettent de représenter les différents contacts et flux entre les composants eux-mêmes mais aussi avec l'environnement extérieur.

Pour chaque profil structurel, nous avons construit quatre blocs diagrammes fonctionnels différents représentant quatre types de relations possibles :

- les relations de contact (contacts entre les éléments et l'environnement) ;
- les relations de flux hydrauliques (circulation de l'eau) ;
- les relations de flux de charges (forces agissantes) ;

- les relations de flux liés aux sollicitations hydromécaniques (érosion et colmatage).

À titre d'exemple, nous présentons (Fig.10) le bloc diagramme fonctionnel concernant les relations de flux hydrauliques :



**Figure 10** Bloc diagramme fonctionnel « relations de flux hydrauliques ».

À partir des quatre blocs diagrammes fonctionnels, nous pouvons élaborer les tableaux d'analyse fonctionnelle (Tab. 3).

**Table 3** Extrait du tableau d'analyse fonctionnelle.

n°	Composant	Fonctions génériques et fonctions de précision
1	crête	<p><b>1 - limiter les flux hydrauliques</b>                      .1 limiter l'infiltration d'eau de pluie</p> <p><b>2 - évacuer les flux hydrauliques</b>                      .1 évacuer l'eau de ruissellement vers le revêtement de protection côté val</p> <p><b>3 - résister aux sollicitations mécaniques</b>                      .1 résister aux charges dues à la circulation                      .2 résister aux développement des racines</p> <p><b>4 - résister à l'érosion externe</b>                      .1 résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement                      .2 résister à l'érosion externe au cours d'une crue</p>

Ce tableau récapitule, pour chaque composant, et de manière exhaustive, les fonctions que le composant doit réaliser d'un point de vue hydraulique, hydromécanique et des flux de charge.

Tout écart par rapport à la réalisation de la fonction (fonction partiellement réalisée ou non réalisée) peut alors entraîner la dégradation de nouvelles fonctions pouvant conduire à la ruine de l'ouvrage.

### 3.2.2 L'analyse des modes de défaillance et de leurs effets appliquée aux digues

L'AMDE (Tab. 4) va déterminer, pour chaque fonction accomplie par les composants des digues, tous leurs modes de défaillance<sup>3</sup> susceptibles d'apparaître aux différents cycles de la vie de l'ouvrage, leurs causes et leurs effets.

Les résultats de l'AMDE sont listés dans un tableau (Tab. 4) :

<sup>3</sup> Un mode de défaillance est la non-réalisation d'une fonction quelconque dans des conditions prévues : pas de fonction, perte de fonction, dégradation de fonction, fonction intempestive (ISDF).

Table 4 Structure de l'AMDE adaptée aux digues.

1 N°	2 COMPOSANT	3 FONCTION	4 MODE DE DEFAILLANCE	5 CAUSE POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	6 EFFET POSSIBLE DE LA DEFAILLANCE	7 SYMPTOME DE LA DEFAILLANCE	8 MOYEN DE DETECTION
1	<b>Crête</b>						
	<b>1 - limiter les flux hydrauliques</b>	la fonction "limiter les infiltrations d'eau de pluie" est dégradée ou est défaillante	la fonction "limiter les infiltrations d'eau de pluie" est dégradée ou est défaillante	~ Processus conception-réalisation : . composition  ~ Etat intrinsèque du composant  . fissuration  . déformation  ~ Flux hydrauliques  . stagnation d'eau sur la crête	~ Flux hydrauliques  . eaux d'infiltration dans le corps de digue . eaux d'infiltration dans la recharge amont étanche  ~ Flux de charges  . sous-pressions dans le corps de digue . sous-pressions dans la recharge amont étanche	. fuites sur le parement aval    . piézométrie	. observation visuelle    . piézomètres
	<b>2 - évacuer les flux hydrauliques</b>	la fonction "évacuer les eaux de ruissellement vers l'environnement amont ou aval" est dégradée ou est défaillante	la fonction "évacuer les eaux de ruissellement" est dégradée ou est défaillante	~ Etat intrinsèque du composant  . colmatage des drains  ~ Processus conception-réalisation : . composition	~ Flux hydrauliques  . stagnation d'eau sur la crête	. constat de stagnation d'eau sur la crête	. observation visuelle
	<b>3 - résister aux sollicitations mécaniques</b>	la fonction "résister aux charges dues à la circulation" est dégradée ou est défaillante	la fonction "résister aux charges dues à la circulation" est dégradée ou est défaillante	~ Processus conception-réalisation : . composition  ~ Flux de charges  . charges d'exploitation	~ Etat intrinsèque du composant  . fissuration  . déformation	. fissures en forme d'écailles  . mesures du développement des fissures	. observation visuelle  . levés de fissures  . fissuromètres
	<b>2 résister au développement des racines</b>	la fonction "résister au développement des racines" est dégradée ou est défaillante	la fonction "résister au développement des racines" est dégradée ou est défaillante	~ Processus conception-réalisation  composition  ~ Flux de charges  charges de végétation	~ Etat intrinsèque du composant  . fissuration  . déformation	. fissures en forme d'écailles  . mesures du développement des fissures	. observation visuelle  . levés de fissures  . fissuromètres
	<b>4 - résister à l'érosion externe</b>	la fonction "résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement" est dégradée ou est défaillante	la fonction "résister à l'érosion externe provenant des eaux de ruissellement" est dégradée ou est défaillante	~ Flux hydrauliques  Érosion des revêtements de protection  ~ Processus conception-réalisation : . composition	~ Etat intrinsèque du composant  . fissuration	. fissures en forme d'écaille  . mesures du développement des fissures	. observation visuelle  . levés de fissures  . fissuromètres
	<b>2 résister à l'érosion externe au cours d'une crue</b>	la fonction "résister à l'érosion externe au cours d'une crue" est dégradée ou est défaillante	la fonction "résister à l'érosion externe au cours d'une crue" est dégradée ou est défaillante	~ Flux hydrauliques  Érosion des revêtements de protection  ~ Processus conception-réalisation : . composition	~ Flux de charges  . sous-pressions dans le corps de digue . sous-pressions dans la recharge amont étanche	. piézométrie	. piézomètres

Les colonnes 1 et 2 représentent les composants et leur numéro de nomenclature correspondent à la décomposition structurelle à la granularité intermédiaire (échelle du composant).

La colonne 3 correspond aux fonctions de conception des composants obtenues à partir de l'analyse fonctionnelle.

Dans la colonne 4, nous distinguons deux types de mode de défaillance :

- la défaillance (totale) d'une fonction, pouvant correspondre, d'une part à une fonction qui était réalisée et qui ne l'est plus, d'autre part à une fonction qui n'a jamais été réalisée,
- la dégradation d'une fonction, qui correspond à une fonction partiellement ou mal réalisée.

La colonne 5, décrit les causes d'une défaillance d'un composant à partir des Blocs diagrammes Fonctionnels. Elles peuvent avoir quatre origines possibles :

- les différents flux (de charges, hydraulique, hydrodynamique et thermique) sollicitant le composant ;
- les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants ;
- l'état intrinsèque du composant (caractéristiques propres ou dégradation à la granularité intermédiaire du composant) ;
- le processus de conception ou de réalisation du composant.

Dans la colonne 6, de façon analogue aux causes, les BDF donnent les effets possibles d'une défaillance. Nous distinguons trois catégories de conséquences, selon qu'elles portent sur :

- les flux émis par le composant ;
- les contacts avec les milieux extérieurs ou les composants environnants ;
- l'état intrinsèque du composant.

Les symptômes (colonne 7) traduisant la manifestation des effets des défaillances sont détectés par différents moyens de détection (colonne 7) associés aux symptômes.

### **3.2.3 Les scénarios de rupture des digues**

A partir de cette analyse des modes de défaillance et de leurs effets, nous allons pouvoir construire les scénarios de rupture des digues.

Différents scénarios peuvent provoquer les ruptures de digues : l'analyse fonctionnelle et l'AMDE, validées par une analyse experte, nous permet de conceptualiser les principaux d'entre eux et nous en avons retenu sept :

- la surverse (en situation de crue) ;
- l'affouillement (en situation de régime quasi-permanent) ;
- l'érosion interne en fondation (en situation de crue) ;
- perte d'étanchéité de la recharge amont étanche (en situation de crue) ;
- l'érosion interne dans le corps de digue (en situation de régime quasi-permanent) ;
- le glissement côté fleuve (en situation post-crue) ;
- le glissement côté val (en situation de crue).

L'écriture d'un scénario de dégradation est réalisée comme ci-dessous (Fig. 11).

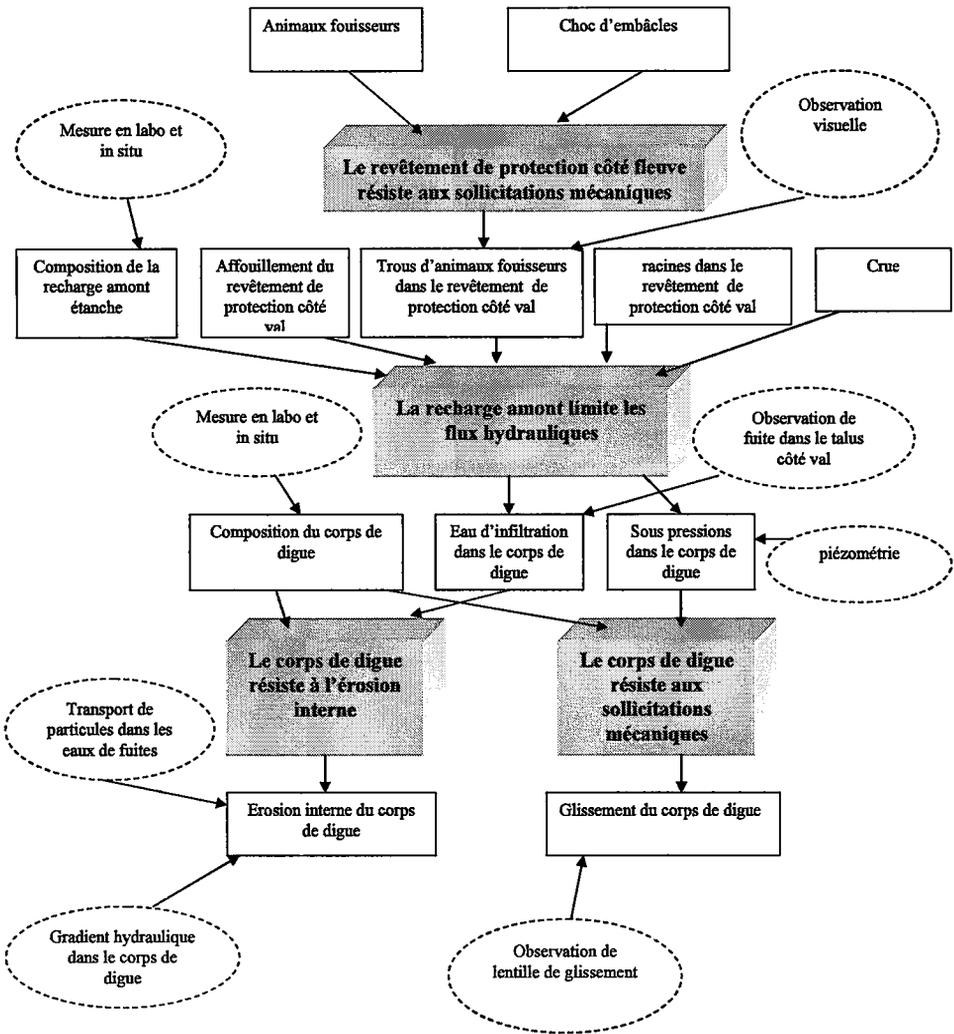


Figure 11 Scénario lié à la perte d'étanchéité de la recharge amont étanche (en situation de crue).

Physiquement, ce scénario modélise une perte de résistance du revêtement de protection côté fleuve, due à l'action des animaux fouisseurs (qui creusent des terriers) et aux chocs d'embâcles (troncs par exemple) transportés pendant la crue. Ensuite, d'autres phénomènes agissent (persistance de la crue, affouillement du revêtement de protection côté fleuve...) qui conduisent à la perte d'étanchéité de la recharge amont étanche : la fonction « la recharge amont étanche limite les

flux hydrauliques » n'est plus réalisée. La digue va donc se charger en eau. Nous assisterons donc à l'érosion interne du corps de digue, et, parallèlement, à la perte de sa résistance mécanique et à la rupture du tronçon.

Un scénario est un graphe causal composé de plusieurs séquences de défaillances lesquelles se décomposent en quatre éléments (Figeac, 2003) :

- les modes de défaillance ;
- les phénomènes, qui regroupent les effets et les causes des modes de défaillance ;
- les effets des modes de défaillance ;
- les symptômes qui traduisent les manifestations des effets des modes de défaillance.

Les phénomènes sont observés sous forme de symptômes. Nous en différencions trois sortes :

- les symptômes observés issus d'une observation visuelle (les fissures par exemple) ;
- les symptômes calculés issus d'un essai, d'un calcul faisant intervenir des données d'auscultation (le gradient hydraulique par exemple) ;
- les symptômes mesurés issus d'une mesure (les tassements par exemple).

Pour la suite de notre recherche, les symptômes joueront un rôle très important, notamment lors de la construction d'indicateurs d'état des digues.

## **4 Conclusion et perspectives de recherche**

Etant donné le manque d'informations et de données sur les digues fluviales, la démarche la plus adaptée pour modéliser leur fonctionnement et leur sûreté de fonctionnement consiste à combiner une analyse fonctionnelle et une analyse des modes de défaillance et de leurs effets. Cette démarche a été déployée sur les barrages (Peyras, 2003), lesquels, nous l'avons vu, ont des modèles structurels (profils en travers) relativement semblables aux digues. La différence majeure est que nous pouvons considérer les barrages comme des ouvrages « quasi-ponctuels », alors que les digues sont des ouvrages longitudinaux de grande longueur.

L'application de cette démarche aux digues a permis d'obtenir les résultats suivants :

- une modélisation structurelle cohérente des différents types de digues ;
- une synthèse des fonctions, phénomènes et symptômes intervenant dans les mécanismes de rupture ;
- une modélisation des scénarios de rupture des digues.

Notre travail va porter maintenant sur la définition d'indicateurs de performance des digues. La méthode présentée (analyse fonctionnelle et AMDE) sert de base pour l'acquisition de connaissances sur les digues, et c'est justement à partir de

ces méthodes que nous envisageons la construction d'une partie des indicateurs d'états, notamment en concentrant nos efforts à l'identification des symptômes observables, calculables ou mesurables sur les digues.

La bibliographie a montré que de nombreuses recherches sont en cours pour la construction d'indicateurs dans le domaine d'ouvrages linéaires tels que les routes (El-Assaly *et al*, 2001) ou les réseaux d'assainissement (Le Gauffre *et al*, 2002) et nous pensons adapter ces modes de construction d'indicateurs au cas des digues. L'objectif de ces indicateurs est de parvenir à évaluer la performance ou l'état d'un tronçon de digue par une note finale résultant de la combinaison de plusieurs notes selon les scénarios de rupture envisageables : il semble alors évident qu'il faudra conserver la note la plus élevée représentant la performance minimale (Diab, 2001).

Enfin, la dernière partie de nos recherches consistera à intégrer ces indicateurs dans le SIRS digue afin de rendre cet outil très performant en terme d'aide à la décision.

## Bibliographie

Ariaratnam S. T., MacLeod C. W. (2002) « Financial outlay modelling for a local sewer rehabilitation strategy » *ASCE*, vol 128, n°6, p. 486-495.

Belouze P., (1999) « Connaissance et gestion des endiguements de protection contre les inondations. Etude préalable à la mise en place d'un Système à Références Spatiales. Première étape : Diagnostic stratégique ». Rap. Cemagref, 58 p.

Degoutte G. (1999) « Rivières endiguées. Mécanismes de rupture des digues. Indice de dangerosité d'un tronçon de digue » ENGREF, Formation continue, Clermont-Ferrand, 20p.

Diab Y. (2001) « Génie civil urbain et environnement : quelques pistes de recherche ». Mémoire de dossier d'Habilitation à Diriger les Recherches, Université de Savoie, janvier 2001, 120 p.

Durant J., Royet P., Mériaux P. (1999) « Technique des petits barrages en Afrique sahélienne et équatoriale » Cemagref Editions, 354 p.

El-Assaly A., Abourizk S., Stoeck J. (2001) « Adequate data collection frequency and gauging length for surface condition rating in Alberta » *Canadian journal of civil engineering*, n°28, p. 871-874.

Figeac N (2003) « Ecriture des scénarios de vieillissement des barrages en remblai à partir d'une méthodologie basée sur la modélisation fonctionnelle et de l'analyse d'expertise » Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en génie civil, CUST, Université Blaise Pascal – Clermont 2, 99 p.

ISDF (?). AMDEC- Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité – guide pédagogique. Ed. ISDF – Institut de la Sécurité de Fonctionnement. 36 p.

Maurel P., Mériaux P., Guillot J., Nérard M.P. (2001) « Gestion intégrée des zones endiguées : du diagnostic des ouvrages de protection à l'élaboration d'un Système d'Information à Référence Spatiale dédié aux gestionnaires. Exemple de la Camargue ». *Conférence Internationale Lyon Fleuves 2001*, Lyon, 6-8 juin 2001, 8 p.

Maurel P., Turpeaud B., Barbe E., Tourment R., Mériaux P., Royet P., (2002) « Dossier de consultation pour l'appel d'offres développement de l'application SIRS digues » Rap. Cemagref, 71 p.

Mériaux p., Royet P., Folton C., (2001) « Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations » Cemagref Editions, 191 p.

Peyras L. (2003) « Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages, développement de méthodes d'aide à l'expertise. », Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal – Clermont 2, 199 p.

Rouzet C., Labbé S., (1997) « SIG en " multi-partenariat " : mobiliser les acteurs et partager les données ». *Revue internationale de géomatique*. Volume 7 - n°3-3/1997, p. 279-295.

Villemeur A. (1988) « *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. Fiabilité - Facteurs humains – Informatisation* » Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Editions Eyrolles, p. 121-141.

Zwingelstein G. (1996) « *La maintenance basée sur la fiabilité. Guide pratique d'application de la RCM* » Hermès Editions, 666 p.



# Typologie des eaux courantes pour la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : l'approche par Hydro-écorégion

## *Running Waters Typology for the European Water Framework Directive: the Hydro-ecoregion approach*

Jean-Gabriel Wasson, André Chandesris, Hervé Pella, Laurence Blanc

CEMAGREF, UR Biologie des Ecosystèmes Aquatiques,  
Laboratoire d'Hydro-écologie Quantitative, BP 220, 69336 Lyon cedex 09, France.  
Tél. : 04.72.20.87.99 - Fax : 04.78.47.78.75  
Email : jean-gabriel.wasson@cemagref.fr

**Résumé :** La mise en œuvre de la Directive Cadre requiert une typologie préalable des écosystèmes aquatiques, sur des bases géographiques. L'approche proposée par « Hydro-écorégions » (HER) repose sur le concept de contrôle hiérarchique des écosystèmes. Les déterminants primaires du fonctionnement écologique des cours d'eaux sont la géologie, le relief et le climat. La cartographie de ces facteurs permet de définir en France métropolitaine 22 HER de niveau 1. Les concepts, la méthodologie et la carte des HER sont présentés. La validation biologique en cours permet d'espérer une applicabilité opérationnelle de cette méthode.

**Abstract:** The implementation of the Water Framework Directive requires a previous typology of aquatic ecosystems based on geographical features. The proposed « Hydro-ecoregion » (HER) approach relies upon the ecosystem hierarchical control concept. Primary determinants of aquatic ecosystems functioning are geology, relief and climate. The cartography of these factors enables the delimitation of 22 first level HER in France. Concepts, methodology and the HER map are presented. The undergoing biological validation allows to expect a good applicability of this method.

## 1 Introduction

La typologie préconisée par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) est principalement axée vers la définition des conditions de référence hydro-morphologiques, physico-chimiques et biologiques par type de milieu. Ainsi, la typologie s'applique à des écosystèmes aquatiques et doit être significative en terme de « structure et de fonctionnement » des cours d'eau naturels, et la méthode doit être robuste, opérationnelle et scientifiquement fondée. En outre, comme la typologie constitue le premier niveau de délimitation des « masses d'eau », une correspondance entre

les types naturels et la spatialisation des pressions anthropiques permettrait un regroupement des cours d'eau en unités cohérentes d'évaluation et de gestion. Ce dernier objectif nous oriente vers un système hiérarchique utilisable à plusieurs niveaux de précision selon les besoins.

La DCE laisse le choix entre deux systèmes typologiques : un système A figé, basé sur des « écorégions » et des paramètres imposés avec des limites de classe prédéfinies, et un système B plus souple avec plusieurs paramètres optionnels. Les deux systèmes sont basés sur des caractéristiques abiotiques naturelles et requièrent *a minima* une base géographique incluant la géologie et l'altitude, couplée à la taille du cours d'eau. Le cadre conceptuel du système A est valide, car la diversité naturelle des écosystèmes aquatiques dépend principalement de leurs caractéristiques géographiques et de leur dimension. Mais ce système n'est pas pertinent pour deux raisons : les écorégions proposées sont en fait des régions biogéographiques tirées de la distribution des insectes aquatiques (*Limnofauna Europea*), sans relation forte avec le fonctionnement de l'écosystème, et les classes prédéfinies ne permettent pas une discrimination correcte des discontinuités spatiales. Cependant, une approche écorégionale, intégrant sur une base spatialisée les facteurs de contrôle du fonctionnement des écosystèmes aquatiques offre de nombreux avantages : simplicité, robustesse et cohérence avec les pressions anthropiques.

Pour ces raisons, nous avons développé en France une approche par « Hydro-écorégions » (HER), spécifiquement dédiée à la typologie des eaux courantes, et cohérente avec les exigences de la DCE. Nous présentons ici le cadre conceptuel, la méthodologie et la carte des HER de France. Les aspects géomatiques sont détaillés dans l'article de Pella *et al.* (2004).

## 2 Cadre conceptuel

Cette régionalisation diffère d'une simple typologie d'objets connus, car son but est de délimiter *a priori* des entités géographiques dans lesquelles les écosystèmes d'eau courante devraient présenter des caractéristiques communes. Il s'agit d'une approche descendante, liant le fonctionnement de l'écosystème aux caractéristiques géographiques du bassin et basée sur le concept de contrôle hiérarchique des écosystèmes.

L'approche par écorégions a été adaptée aux écosystèmes aquatiques par Omernick (1987) afin de définir des objectifs régionaux pour la qualité et la gestion de l'eau (Hughes & Larsen 1988, Warry & Hanau 1993). Le cadre conceptuel, basé sur les idées de Hynes (1975) et Lotspeich (1980), a été sensiblement amélioré par les théories de contrôle hiérarchique des hydrosystèmes, et en particulier par l'emboîtement des structures physiques, du bassin jusqu'aux microhabitats, proposé par Frissell *et al.* (1986) et Naiman *et al.* (1992). Tous ces auteurs reconnaissent la géologie, le relief et le climat comme les déterminants primaires du fonctionnement des écosystèmes d'eau courante à l'échelle du bassin versant. Les hydro-écorégions sont délimitées sur la base de ces déterminants primaires (Wasson 1996, Wasson *et al.* 2002 a et b). Les hypothèses sous-jacentes sont :

- à l'intérieur d'une même hydro-écorégion, les cours d'eau présenteront des caractéristiques physiques, chimiques et biologiques similaires, ainsi qu'un même gradient d'évolution longitudinale;
- les écosystèmes d'eau courante de différentes régions devraient se distinguer sur au moins un paramètre abiotique important, conduisant à des différences quantifiables au niveau des peuplements.

### 3 Méthodes

Les données de base sont des caractéristiques physiques naturelles : géologie, relief et climat. Cependant, leur validité et pertinence ont dû être soigneusement évaluées en comparant différentes sources d'information (Pella *et al.* 2004). L'échelle commune des différentes couches est le 1/1 000 000<sup>ème</sup>. La carte géologique a été interprétée selon la structure lithologique et les propriétés des roches (dureté, perméabilité, influence sur la chimie de l'eau). La densité du réseau hydrographique a été utilisée comme indicateur de perméabilité des roches. Un modèle numérique de terrain (MNT) à pas de 250 m a permis de caractériser l'altitude, la pente des versants et des vallées. Des cartes hydrogéologiques et géomorphologiques ont également été consultées. Les facteurs climatiques se réfèrent aux précipitations (moyenne annuelle, variabilité saisonnière et pluies décennales...) et à la température (maximale de juillet), mais ont été interprétées par rapport à la végétation naturelle et aux données bioclimatiques et hydrologiques (étages bioclimatiques, bilan hydrique).

Ces couches d'informations géographiques, homogènes à l'échelle de la France, ont été rassemblées dans un SIG. La délimitation des HER a été réalisée visuellement, en recherchant les discontinuités naturelles pour chacun des paramètres et les concordances régionales de leur distribution. Le principe de base a été de minimiser la variance intra-régionale et d'accentuer les différences inter-régionales. La pertinence de la délimitation a été testée *a posteriori*, premièrement sur les paramètres géographiques utilisés pour la partition des HER, et deuxièmement en utilisant des données biologiques collectées sur des sites de référence.

Quelques points de méthodologie doivent être soulignés :

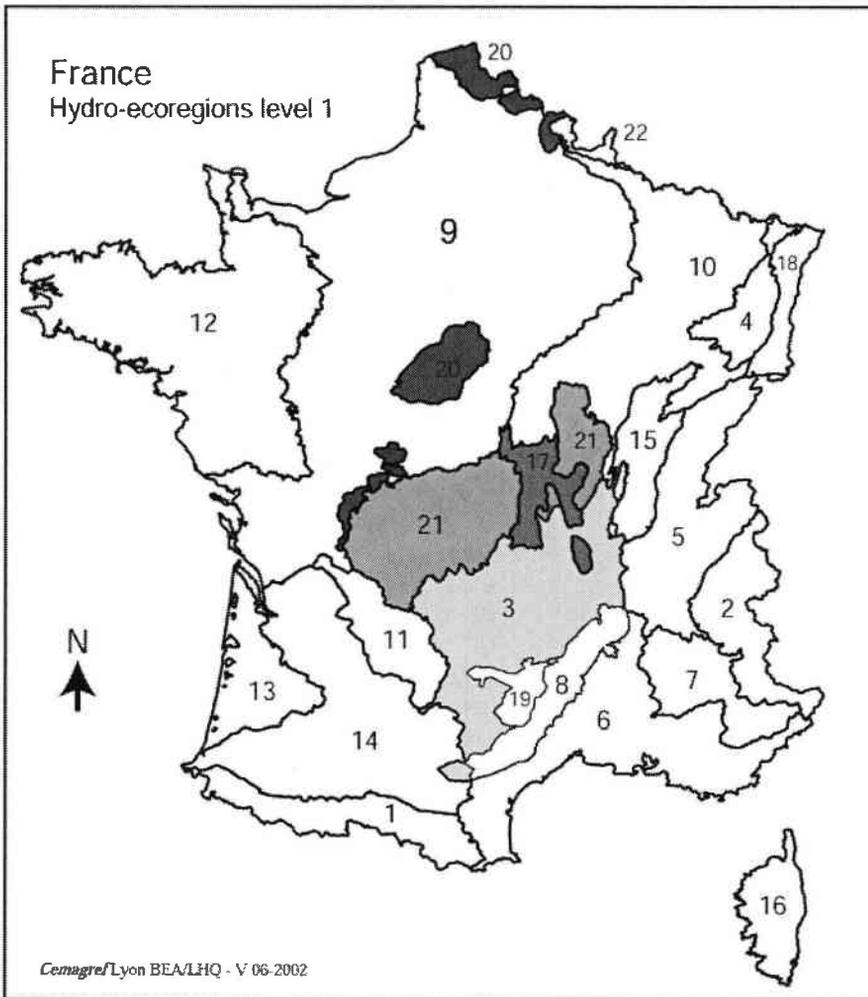
- L'approche descendante permet de définir deux niveaux hiérarchiques. Le niveau 1 (HER-1) correspond aux grandes structures géophysiques et climatiques ; le niveau 2 (HER-2) correspond à des variations régionales à l'intérieur de ces types.
- Dans le processus de délimitation, le poids de chaque facteur dépend du contexte des autres. Par exemple, en climat méditerranéen, le stress hydrique est considéré comme le principal facteur de contrôle, alors que la géologie semble moins importante ; dans les régions montagnardes, l'altitude et le climat sont étroitement liés et la structure du massif donne les

limites régionales ; dans les zones de plaines, en climat humide, la géologie et la perméabilité paraissent être des facteurs aussi importants l'un que l'autre.

- La régionalisation s'appuie parfois sur des frontières naturelles évidentes, mais doit aussi traiter les gradients climatiques et géomorphologiques. Pour ces derniers, nous avons privilégié une régionalisation par massifs géomorphologiques avec l'hypothèse d'une évolution longitudinale prévisible des cours d'eau dans ces massifs.
- Les cours d'eau intègrent rapidement l'hétérogénéité locale de leur bassin, ce qui constitue un grand avantage pour leur régionalisation. Une telle hétérogénéité, par exemple dans la nature des roches, peut être considérée statistiquement comme une caractéristique des HER.
- A l'évidence, les hypothèses de départ ne sont valides que pour des bassins de taille petite à moyenne situés dans une seule région (endogènes). Pour les rivières de rang plus élevé, traversant plusieurs régions (exogènes), la prévision de leurs caractéristiques doit être faite en considérant la proportion des différentes HER qui se trouvent dans leur bassin.

#### **4 Résultats : les hydro-écorégions de France**

A l'échelle de l'Europe, la France est un pays géographiquement diversifié. Nous avons identifié au total 22 HER de niveau 1 ( cf. figure 1 ). Cependant, dix de ces HER-1 représentent 81% de la surface totale du pays. Les principales particularités des HER-1 sont indiquées dans la table 1 . Cette description qualitative se rapporte à des classifications détaillées selon les paramètres utilisés pour la délimitation des HER ; ainsi cette typologie sera facilement comparable aux systèmes utilisés par les autres états membres (Wasson *et al.* 2002a). Les HER-1 sont employées comme premier critère pour la typologie des eaux courantes. La taille des cours d'eau est évaluée par les rangs de Strahler (Pella *et al.* 2004). Le croisement entre les HER-1 et les rangs donne la typologie de base, mais un regroupement des petits cours d'eau permet des simplifications. Pour les rivières plus larges, des sous-types tenant compte des bassins endogènes ou exogènes sont également définis. Le niveau HER-2 sera utilisé pour identifier si nécessaire des variations des conditions de référence liées à l'hétérogénéité interne des HER-1. La typologie finale sera stabilisée à la fin du processus d'évaluation des conditions de référence, à la lumière des données biologiques. Pour les lacs, les HER sont également utilisées en tant que critères typologiques décrivant la géologie et l'altitude, complétées par les paramètres morphométriques.



**Figure 1** Carte des Hydro-écorégions françaises de niveau 1. Les HER-1 sont identifiées par un numéro ( cf. Table 1 ). Les régions constituées de plus d'un polygone sont ombrées.

## 5 Validation des résultats

Une première validation a été réalisée en analysant une base de données d'invertébrés benthiques provenant de 76 sites de référence répartis sur 10 HER-1. Dans l'ensemble, on observe une bonne correspondance entre les hydro-écorégions et la faune d'invertébrés (Wasson *et al.* 2002a). L'effet « écorégion » est de loin le plus important pour expliquer la structure biotique, mais d'autres facteurs comme le rang et la saison devront être pris en compte. La typologie par HER a aussi été comparée à des classifications hiérarchiques effectuées

directement sur la faune ; le pouvoir de discrimination des deux approches s'avère sensiblement équivalent. Enfin, la distribution régionale de la faune induit des variations significatives des valeurs de référence de l'indice IBGN utilisé pour évaluer la qualité écologique des cours d'eau, et les valeurs de référence ont été calculées pour la plupart des types. Les peuplements de diatomées présentent également une distribution liée aux hydro-écorégions, et l'adaptation des indices correspondants est en cours.

**Table 1** Caractéristiques de base des Hydro-écorégions de niveau 1.

ID	HER-1	Relief	Géologie	Climat
1	PYRENEES	Hautes Montagnes	Granite métamorphique	Montagnard humide
2	ALPES INTERNES	Hautes Montagnes	Granite métamorphique	Montagnard humide, froid
4	VOSGES	Montagnes	Granite métamorphique	Montagnard humide
3	MASSIF CENTRAL SUD	Montagnes	Granite métamorphique	Montagnard humide
21	MASSIF CENTRAL NORD	Montagnes	Granite métamorphique	Océanique tempéré
5	JURA-PREALPES DU NORD	Montagnes	Calcaire sédimentaire	Montagnard humide
22	ARDENNES	Relief peu marqué	Granite métamorphique	Océanique tempéré
12	ARMORICAIN	Plaines	Granite métamorphique	Océanique tempéré
10	COTES CALCAIRES EST	Relief peu marqué	Calcaire sédimentaire	Océanique tempéré
9	TABLES CALCAIRES	Plaines	Calcaire sédimentaire	Océanique tempéré
11	CAUSSES AQUITAINS	Relief peu marqué	Calcaire sédimentaire	Océanique méridional
14	COTEAUX AQUITAINS	Relief peu marqué	Détritique	Océanique méridional
20	DEPOTS ARGILO SABLEUX	Plaines	Détritique	Océanique tempéré
18	ALSACE	Plaines	Détritique	Océanique continental
13	LANDES	Plaines	Détritique	Océanique méridional
15	PLAINE SAONE	Plaines	Détritique	Océanique méridional
17	DEPRESSIONS SEDIMENTAIRES	Plaines	Détritique	Océanique méridional
6	MEDITERRANEEN	Relief peu marqué	Hétérogène	Méditerranéen
8	CEVENNES	Montagnes	Granite métamorphique	Méditerranéen
16	CORSE	Montagnes	Granite métamorphique	Méditerranéen
19	GRANDS CAUSSES	Montagnes	Calcaire sédimentaire	Sub-Méditerranéen
7	PREALPES DU SUD	Montagnes	Calcaire sédimentaire	Sub-Méditerranéen

## 6 Conclusion

L'approche par hydro-écorégion, simple et robuste, semble être pertinente pour définir des conditions biologiques de référence des eaux courantes. Sur la base d'une précédente application au bassin de la Loire, nous pouvons attendre une bonne concordance entre les HER et la spatialisation des pressions anthropiques. Des modèles « pressions / impacts » cherchant à mettre en évidence les causes d'altération des peuplements d'invertébrés sont en cours de développement à l'échelle des HER. De tels modèles régionalisés constitueront des outils opérationnels pour atteindre les objectifs fixés par la DCE.

## Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD – Direction de l'Eau). Il s'inscrit dans le programme de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR). Nous remercions Béatrice Dutang du GIE VALOREZ pour son aide à la préparation du manuscrit.

## Bibliographie

Frissell C.A., Liss W.J, Warren C.E. & Hurley, M.D. 1986: A hierarchical framework for stream habitat classification: viewing streams in a watershed context. *Environmental Management* 10:199–214.

Hughes R.M. & Larsen D.P. 1988: Ecoregions: an approach to surface water protection. *Journal of Water Pollution Control Federation* 60(4):486–493.

Hynes H.B.N. 1975: The stream and its valley. *Ver. Internat. Verein. Limnol.* 19:1-15.

Lotspeich F.B. 1980: Watersheds as the basic ecosystem: this conceptual framework provides a basis for a natural classification system. *Water Resources Bulletin* 16(4):581–586.

Naiman R.J., Lonzarich D.G., Beechie T.J. & Ralph S.C. 1992: General principles of classification and the assessment of conservation potential in rivers.— In Boon P., Calow P. & Petts G. (eds.). *Rivers Conservation and Management*, Wiley & Sons Chichester UK, pp. 93–123.

Omernick J.M. 1987: Ecoregions of the conterminous United States. *Annals of the Association of American Geographers* 77(1):118—125.

Pella H., Chandesris A. & Wasson J.G. 2004 : Constitution d'un système d'information à référence spatiale dans le contexte de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, in *Mise en place de systèmes d'information à référence spatiale, V<sup>e</sup> séminaire du réseau d'animation REGLIS du Cemagref, Les Actes*, 47-59.

Warry N.D. & Hanau M. 1993. The use of terrestrial ecoregions as a regional-scale screen for selecting representative reference sites for water quality monitoring. *Environmental Management* 17(2):267-276.

Wasson J.G. 1996: Structures régionales du bassin de la Loire. *La Houille Blanche* 6/7:25-31.

Wasson J.G., Chandesris A. & Pella H. 2002a: Définition des hydro-écoregions de France métropolitaine. Approche régionale de typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. Rapport Cemagref Lyon BEA/LHQ et MATE/DE, 190pp.

Wasson J.G., Barrera S., Barrère B., Binet D., Collomb D., Gonzales I., Gourdin F., Guyot J.L., & Rocabado G. 2002b : Hydro-ecoregions of the Bolivian Amazon Basin – the geographical frame of running water ecosystems functioning.— In McClain M.E. (ed.), *Ecology of South American Rivers and Wetlands* : IASH special publication N°6, chap. 5, 69-91.



# **Constitution d'un système d'information à référence spatiale dans le contexte de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau.**

## *Constitution of a geographical information system with spatial reference in the European Water Framework Directive context.*

Hervé PELLA, André CHANDESRIS & Jean-Gabriel WASSON

Cemagref, Département Gestion des Milieux Aquatiques - UR Biologie des Ecosystèmes  
Aquatiques, Laboratoire d'Hydroécologie Quantitative  
3 bis quai Chauveau, CP 220 - 69366 Lyon Cedex 09  
Tél. : 04 72 20 87 87 – Fax : 04 78 47 78 75  
prénom.nom@cemagref.fr

**Résumé :** La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE), avec son objectif ambitieux de "bonne qualité écologique" pour l'ensemble des cours d'eau, requiert pour sa mise en œuvre :

- une typologie de masses d'eau selon des critères géographiques ;
- l'identification de "références" parmi les hydrosystèmes existants ;
- l'évaluation du "bon état écologique", concept novateur ;

le tout dans des délais très courts pour les administrations et services gestionnaires concernés. La nécessité de disposer d'outils méthodologiques immédiatement disponibles et opérationnels à l'échelle du territoire est apparue très vite ; ces outils fiables et aisément applicables devant être partagés et acceptés par les acteurs. Ce projet de régionalisation des écosystèmes aquatiques, qui est le cadre adopté pour la définition des masses d'eau, a nécessité la mise en place d'une plate forme SIG et d'une équipe pluridisciplinaire.

**Abstract:** The implementation of the European Water Framework Directive (WFD) with its ambitious goal of "good ecological status" for all the water bodies requires:

- a water bodies typology according to geographical criteria;
- the selection of references among the existing hydrosystems;
- the evaluation of the "good ecological status", an innovative concept;

in a tight timetable for administrations and management boards. From that arise the needs for methodological tools quickly available and operational, at the national scale, accepted by all the actors, relevant and easily applicable. This project of aquatic ecosystem regionalization, which is the adopted frame to delineate water bodies, required the implementation of a GIS platform and a pluridisciplinary team.

# 1 Introduction

La Directive Cadre Européenne sur l'Eau (DCE) pose clairement le principe d'une évaluation de l'état écologique des milieux aquatiques par la mesure d'un écart à des conditions de référence, principalement sur la base de bioindicateurs. La première étape de sa mise en œuvre, en ce qui concerne les eaux de surface continentales, passe donc par l'établissement d'une typologie permettant la définition des conditions de référence biologiques, mais aussi hydro-morphologiques et physico-chimiques.

L'article intitulé "Typologie des eaux courantes pour la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : l'approche par Hydro-écorégions" (Wasson *et al.*, 2004) revient sur les objectifs de la typologie, expose le cadre conceptuel des hydro-écorégions (HER) ainsi que les principes méthodologiques qui ont conduit à leur délimitation et aborde le problème de leur validation biologique.

Le présent article est complémentaire du précédent puisqu'il aborde l'aspect géomatique de cette étude. Dans un premier temps, nous présentons la mise en place du système d'information géographique (SIG) en réponse aux objectifs de la DCE. Ensuite, nous évoquons le traitement et l'analyse des informations géographiques pour la délimitation des HER. Enfin, un exemple d'utilisation des données pour caractériser localement les pressions anthropiques est exposé.

## 2 Constitution du SIG

### 2.1 Données géographiques à l'origine du SIG

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont essentiellement des couches d'informations géographiques acquises par le *Cemagref* ou mises à disposition pour les besoins de l'étude par l'IFEN<sup>1</sup> dans le cadre de la convention entre le *Cemagref* et le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. Celles-ci sont détaillées dans le tableau ci-après :

---

<sup>1</sup> IFEN : Institut Français de l'Environnement.

Données	Sources	Propriété
Géologie	Banque de données de la Carte géologique au 1/1 000 000 <sup>ème</sup> (6 <sup>ème</sup> édition) BRGM <sup>2</sup> 1996	Convention IFEN
Relief	Modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 250 m dérivé de la BDALTI® de l'IGN	Convention IFEN
Climat	METEO FRANCE Carte des moyennes mensuelles des précipitations pour la période 1961-1990 calculées par la méthode AURHELY ; maille 5 x 5 km	Convention IFEN
Climat	METEO FRANCE Carte des moyennes mensuelles des températures maximales et minimales pour la période 1961-1990 ; maille 1 x 1 km Carte des précipitations sur 24 H sur une période de retour de dix ans ; maille 1 x 1 km	Acquisition par le Cemagref
Végétation	Carte des régions phyto-écologiques de Dupias et Rey (1980)	Convention IFEN
Réseau hydrographique	©BD CARTHAGE V 3.0 dérivée de la ©BDCARTO de l'IGN	Acquisition par le Cemagref

Ces données ont été exploitées avec les logiciels Arcview® et Arcinfo®.

## 2.2 Mise en place du SIG

Pour répondre aux objectifs de régionalisation et pour caractériser le milieu naturel et les pressions qui s'y exercent, la création d'un SIG à l'échelle nationale s'est très vite imposée au sein du laboratoire. L'élaboration de cette plate-forme nous a demandé un travail important de collecte, de validation, de mise en cohérence et d'archivage des données. Cette base de données géographiques est composée d'informations "brutes" (pluviométrie, altitude...) et d'informations "dérivées" (densité de drainage, pente...) calculées par analyse spatiale. Ainsi, par exemple le modèle numérique de terrain (MNT) au pas de 250 m de l'institut géographique national (IGN) au format raster est l'information de base pour le calcul des couches suivantes : les pentes, le modèle numérique modifié pour l'écoulement, le plan de la direction d'écoulement, le plan des surfaces amont drainées et le réseau hydrographique théorique.

Cette base compte une cinquantaine de couches ce qui représente près de 10 giga-octets. Les données sont organisées par thèmes : limites administratives, occupation du sol, pressions polluantes, régionalisation, géologie, morphologie, hydrologie et climatologie. Elle sert de support effectif à tous les travaux de recherche multisites du laboratoire (mise en relation de la biologie, de la physique et de la chimie des cours d'eau à différentes échelles). Cette base est utilisée plus

<sup>2</sup> BRGM : Bureau des Recherches Géologiques et Minières.

largement dans le cadre de la "Zone Atelier Bassin du Rhône" (ZABR) ainsi que pour celle consacrée à la Seine (PIREN-Seine). Cette plate-forme SIG fait l'objet de mises à jour régulières.

## 2.3 Catalogage

Etant donné que les couches d'informations géographiques sont de provenances diverses, il nous a paru important d'archiver les informations générales (métadonnées) sur les couches géographiques qui constituent la plate-forme SIG. L'objectif principal de ce catalogage est de pouvoir consulter facilement toutes les informations relatives à une couche, comme par exemple son mode d'acquisition, la gamme des échelles d'utilisation ou bien encore la précision du tracé. Après quelques recherches sur les outils existants permettant de formaliser, stocker et interroger ces métadonnées, nous avons choisi l'outil développé par le pôle géomatique du CERTU<sup>3</sup>. Conforme à la norme PR ENV 12657 relative aux métadonnées des informations localisées, le logiciel Reports V2 (fig. 1) permet la constitution et la maintenance de catalogues de données géographiques. Celui-ci est doté de moyens d'importation et d'exportation de métadonnées. Les formats de ces données sont publiques, afin de permettre à d'autres logiciels plus sophistiqués ou plus adaptés d'échanger selon ce format.

Le catalogue réalisé précise pour chacune des couches les informations relatives à leur production, à leur mode d'acquisition, à leur qualité et enfin à leur référencement. La partie production renseigne sur l'organisme qui est à l'origine de la donnée, son rôle, la personne contact au sein de l'organisme ainsi que sur l'utilisation potentielle qui peut en être faite et les documents de référence. La propriété intellectuelle et les restrictions d'utilisation sont aussi précisées. La partie mode d'acquisition détaille le cadre dans lequel le laboratoire détient les données, qu'il s'agisse d'un achat, d'une convention dans le cadre d'une étude (en précisant la date finale de la convention au-delà de laquelle les données doivent être supprimées) ou d'une simple mise à disposition. La partie qualité liste les gammes d'échelles d'utilisation, la précision du tracé, la date de validité des informations ainsi que leur fréquence de mise à jour. Enfin, le référencement précise le système de positionnement et l'emprise géographique.

---

<sup>3</sup> CERTU : Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques

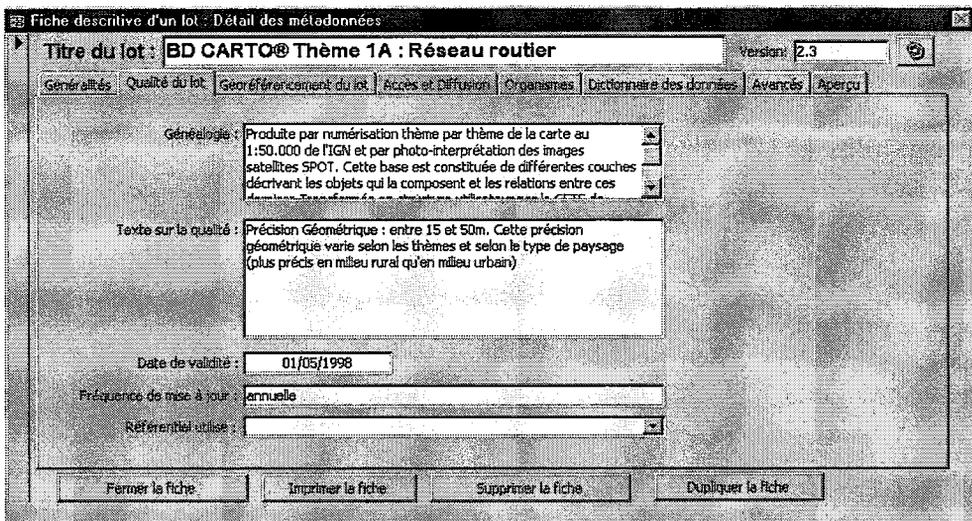


Figure 1 Fenêtre "qualité" de l'application Report V2.

### 3 Détermination des hydro-écorégions

#### Les hydro-écorégions : cadre conceptuel.

La démarche est basée sur une approche *descendante* dont le principe de base consiste à utiliser pour la classification les facteurs de contrôle globaux plutôt que leurs conséquences au niveau local. A l'échelle du bassin versant, les déterminants primaires universellement reconnus du fonctionnement écologique des cours d'eau sont la géologie, le relief et le climat (voir Wasson *et al.*, 2004 ; Wasson *et al.*, 2002 ).

#### Principes méthodologiques

Des couches d'information spatialement homogènes portant sur les structures géophysiques et climatiques sont utilisées au moyen d'un SIG. Les HER sont délimitées visuellement en recherchant les discontinuités des différents facteurs.

La dimension longitudinale est décrite de manière simple et robuste par l'ordination du réseau selon la méthode de Stralher. Cette méthode consiste à attribuer le rang 1 aux cours d'eau de tête de bassin, ensuite, en progressant vers l'aval, chaque cours d'eau recevant un affluent de même rang voit son rang augmenter d'une unité (la confluence de deux cours d'eau d'ordre 1 donne un ordre 2, la confluence de deux cours d'eau d'ordre 2 donne un ordre 3...). Le couplage HER x Rang constitue la base de la typologie à l'échelle nationale

### 3.1 Les données géographiques utilisées

Les données utilisées visent à décrire spatialement deux grands ensembles de facteurs ; d'une part la structure physique des bassins et d'autre part le climat qui s'exerce sur ces bassins, en tant que déterminant aussi bien de la quantité et de la variabilité des écoulements que de la température.

- **La structure physique des bassins** est appréhendée à partir :
  - de la *géologie* qui intervient au travers des caractéristiques lithologiques : résistance à l'érosion, perméabilité, propriétés chimiques des eaux qui en découlent ;
  - du *relief* décrit par l'altitude, mais aussi de la *géomorphologie* : pentes des terrains, pentes des vallées, formes du relief ;
  - de l'*hydrographie* : la structure et l'organisation du réseau de drainage donnent des informations complémentaires aux données géologiques (perméabilité, drainage phréatique).
- **Le climat** est appréhendé par :
  - le régime des *précipitations* : annuelles, saisonnières, écart saisonnier et maximum décennal sur 24 heures ;
  - les *températures* maximales ;
  - les types de végétation naturelle (potentielle) ou les étages bioclimatiques qui intègrent des informations sur les bilans hydriques et thermiques ;
  - des informations complémentaires, notamment sur les surplus ou déficits hydriques, les glaciers...

#### **Autres documents utilisés :**

L'utilisation de couches d'informations géographiques en format numérique n'a pas exclu le recours aux cartes, notamment :

- l'Atlas des Eaux souterraines de la France (Margat, 1970) ;
- les cartes géomorphologiques de la France, coord. F. Joly - GIP Reclus<sup>4</sup> - 1988, 1987, 1992, 1993 ;
- la carte des surplus et déficits hydrologiques de la France, Trzpit 1984 (scannée et géoréférencée) ;
- certaines cartes de la végétation de la France au 1/200 000<sup>ème</sup> (CNRS), notamment pour le bassin du Rhône ;
- la carte des glaciers (Rogers et Wasson, 1997) ;
- les cartes topographiques, touristiques, routières éditées par l'IGN.

---

<sup>4</sup> GIP Reclus : Groupement d'Intérêt Collectif Réseau d'Études des Changements dans les Localisations et les Unités Spatiales, Montpellier.

## 3.2 Le traitement des données géographiques

### 3.2.1 Structure physique

#### **Altitude**

L'information du MNT 250 m a été utilisée après regroupement en classes d'altitudes.

#### *Pente*

Une carte des pentes à l'échelle nationale, réalisée à partir du MNT 250 m a également été utilisée.

#### **Relief "ombré" (hillshade)**

Ce mode de transformation des données du MNT permet de visualiser les formes du relief et d'identifier les discontinuités existantes entre zones de morphologie différentes.

#### **Pente des vallées**

A partir du MNT, un réseau de drainage théorique a été reconstitué. Les pentes des tronçons ont été calculées sur ce réseau. Le résultat permet de visualiser à grande échelle les valeurs dominantes de pentes de vallées et facilite ainsi le contrôle de la discrimination opérée à partir des informations de relief utilisées ci-dessus.

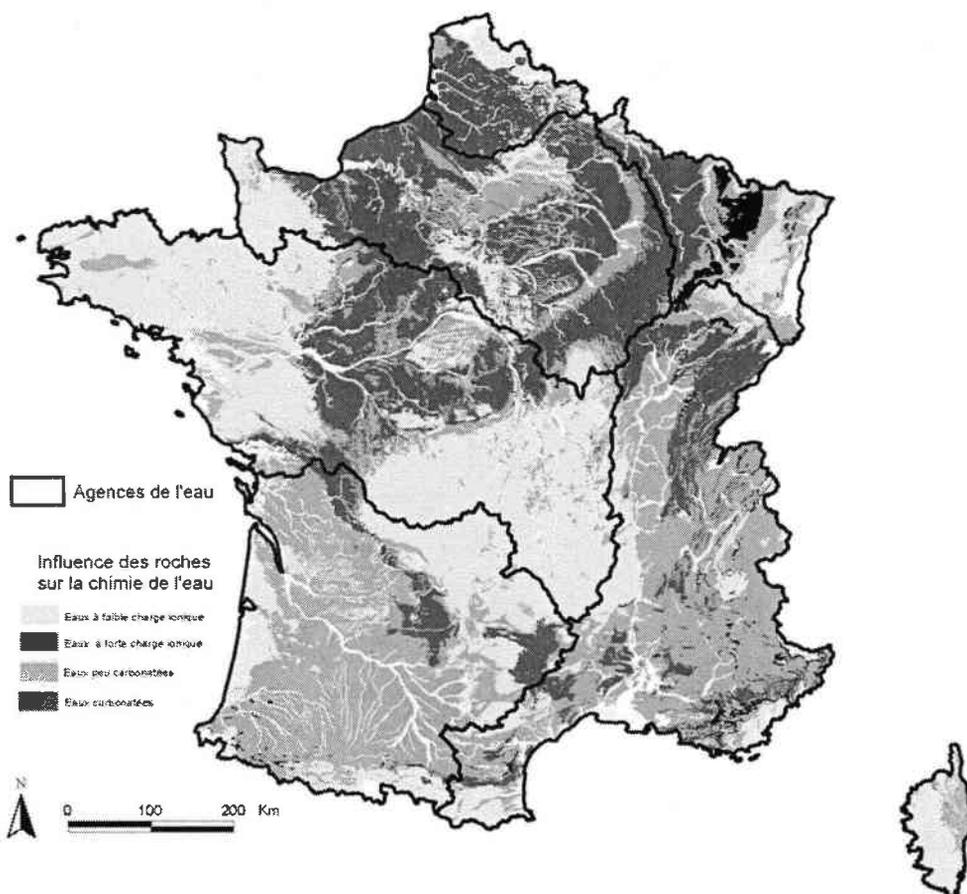
#### **Géologie**

Les cartes existantes à l'échelle de la France métropolitaine constituent avant tout une description stratigraphique et structurale du sous sol. Elles ne renseignent pas directement la nature des roches et ne sont donc pas immédiatement exploitables pour une spatialisation des caractéristiques des bassins versants.

#### **Nature des roches (lithologie)**

Plusieurs sources de données complémentaires ont été utilisées pour rendre compte de l'influence de la lithologie sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques. La carte géologique (Bonney *et al.*, 1996) du BRGM au 1/1 000 000<sup>ème</sup> (sixième édition) a fait l'objet d'une analyse et d'un classement des polygones en fonction de la nature des roches identifiées à partir de documents cartographiques et de synthèses nationales du BRGM. La classification simple, élaborée spécifiquement pour cette étude, a pour objectif de décrire l'influence de la géologie sur le fonctionnement des cours d'eau (résistance à l'érosion, perméabilité, propriétés chimiques des eaux. cf fig. 2)

*NOTE : une carte lithologique est en cours d'élaboration au BRGM sous la direction de M. Laville ; les comparaisons avec les versions préliminaires de cette carte montrent une bonne concordance globale.*



**Figure 2** Influence des roches sur la chimie de l'eau. Données dérivées et interprétées à partir de la carte géologique BRGM au 1/1 000 000<sup>ème</sup>, 6<sup>ème</sup> édition.

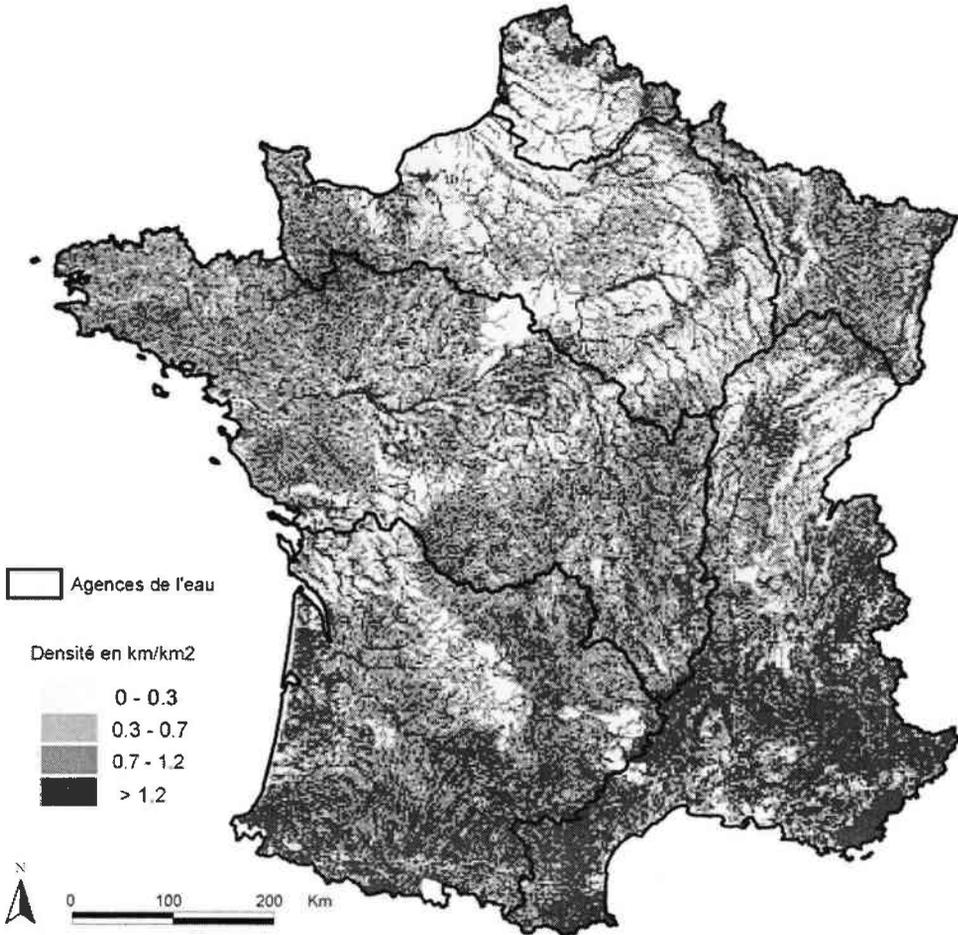
### **Carte géomorphologique au 1/1 000 000<sup>ème</sup>**

Ce document (en quatre parties) a été édité par le GIP Reclus sous la direction de Fernand JOLY (collection Reclus Modes d'Emploi de 1988 à 1993). Ces cartes individualisent des unités différenciées par leur style topographique et secondairement par leur altitude ou leur matériel. Elles constituent un complément très utile et très efficace pour corriger les imperfections inhérentes à la carte lithologique élaborée dans le cadre de ce travail.

### **Densité du réseau hydrographique**

La ©BD Carthage - acronyme de Base de Données de Cartographie Thématique des Agences de l'Eau – constitue le référentiel spatial commun à l'ensemble des organismes publics en charge de missions liées à la gestion de l'eau. Elle a été constituée à partir des fichiers numériques de la © BD CARTO de l'IGN saisis à l'échelle du 1/50 000<sup>ème</sup>.

L'examen de la carte du réseau, issue directement de la ©BD Carthage, apporte un éclairage et un complément d'information quant à la nature des formations lithologiques, en particulier lorsque des formations superficielles mal renseignées sur les cartes géologiques viennent modifier la perméabilité des roches sous-jacentes. Un calcul de la densité de drainage (en  $\text{km} / \text{km}^2$ ) par maille carrée de 2,5 km a permis d'éditer une carte rendant l'information "densité du réseau hydrographique" plus directement lisible (fig. 3).



**Figure 3** Densité de drainage calculée à partir de la © BD Carthage sur une grille (maille carrée de 2,5 km). France continentale.

### 3.2.2 Données climatiques

#### ***Précipitations annuelles moyennes***

Cette carte résulte du cumul sur l'année des moyennes mensuelles de précipitations (période 1961-1990).

#### ***Précipitations saisonnières***

Les valeurs mensuelles ont été cumulées par saison en groupant décembre, janvier, février pour l'hiver, mars, avril, mai pour le printemps, etc.

#### ***Cartes de saisonnalité***

Trois cartes exprimant les saisons de précipitations dominantes et minimales ainsi que l'écart de précipitation entre saison, ont été dérivées des précédentes. Ces cartes se sont avérées pertinentes pour identifier les tendances de continentalité et surtout délimiter la région méditerranéenne au sens climatique.

#### ***Carte des régions phytoécologiques de Dupias et Rey (CNRS 1980)***

Cette carte basée sur la distribution des associations phyto-écologiques naturelles découpe le territoire national en zones de quatre niveaux hiérarchiques différents. Les deux premiers niveaux expriment les grandes structures géologiques et climatiques à travers le filtre de la végétation terrestre. Cette carte a été utilisée comme trame de travail et pour la validation de certains paramètres, avec toutefois une ré-interprétation approfondie pour une régionalisation des milieux aquatiques.

## 4 Analyse des pressions

Cette analyse consiste à évaluer le degré d'anthropisation des cours d'eau de façon cohérente et homogène à l'échelle du territoire national, dans un double but : d'une part mettre en évidence les zones les moins anthropisées pour sélectionner des sites de référence, et d'autre part élaborer des modèles "pressions / impacts" reliant l'altération des peuplements aquatiques aux activités anthropiques (rejets polluants, agriculture, occupation du sol...). Le couplage entre les données biologiques observées sur des stations ponctuelles, et les pressions s'exerçant sur les bassins et l'environnement immédiat des stations (corridor rivulaire) a nécessité des développements informatiques spécifiques (langage objet) sous SIG.

### 4.1 Données utilisées

#### ***Données biologiques***

L'indice Biologique Global Normalisé (IBGN) basé sur les invertébrés benthiques est la méthode la plus largement utilisée en France pour évaluer la qualité écologique des rivières. Une base de données sur les stations IBGN suivies par les DIREN<sup>5</sup> est en cours de développement au sein du laboratoire. Actuellement, plus de 3500 stations sont répertoriées et géoréférencées. Un travail similaire est en cours sur les Diatomées.

---

<sup>5</sup> DIREN : Direction Régionale de l'Environnement

## **Occupation du sol**

La base de données utilisée est CORINE<sup>6</sup> Land Cover (CLC). Elle couvre l'ensemble du territoire et repose sur une nomenclature standard hiérarchisée à 3 niveaux et 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire (territoires artificialisés, territoires agricoles, forêts et milieux semi-naturels, zones humides et surfaces en eau). Etant donné que l'échelle de travail est le 1/100 000<sup>ème</sup> pour cette base, l'analyse présentée est en limite d'utilisation. Il convient donc d'émettre quelques restrictions d'usage sur les résultats.

Pour caractériser les pressions sur le milieu aquatique, une typologie simplifiée pour les postes d'occupation du sol a été réalisée préalablement au traitement. Ainsi, les 44 postes initiaux ont été reclassés en huit catégories :

- 1 - Territoire artificialisé dense (regroupant les types CLC 111, 12 et 13) ;
- 2 - Territoire artificialisé discontinu (regroupant les types CLC 112 et 14) ;
- 3 - Agricole intensif (regroupant les types CLC 21, 22, 241 et 242) ;
- 4 - Agricole à faible impact (regroupant les types CLC 231, 243 et 244) ;
- 5 - Forêts (regroupant les types CLC 31) ;
- 6 - Pelouses, landes et friches (regroupant les types CLC 32) ;
- 7 - Espaces ouverts (regroupant les types CLC 33) ;
- 8 - Zones humides (regroupant les types CLC 4 et 5).

## **4.2 Traitement**

Les hypothèses de travail sont les suivantes :

- le tronçon étudié mesure environ 3 kilomètres de long, soit 1,5 km à l'amont et à l'aval de chaque station considérée,
- la largeur de la zone à prendre en compte de part et d'autre du cours d'eau dépend tout naturellement de la largeur du lit mineur. Des travaux (Souchon et al., 2000) ont montré la possibilité d'extrapoler les largeurs moyennes des cours d'eau à partir des rangs de Strahler. La largeur de la zone prise en compte est donc fonction du rang.

La méthodologie appliquée pour l'analyse spatiale consiste pour chacune des stations à :

- créer un cercle de trois kilomètres de diamètre ayant pour centre la station,
- intersecter le cercle d'analyse et la BD Carthage,
- récupérer l'arc sur lequel la station est située,
- récupérer les arcs ayant le même code hydrographique et le même rang,
- créer une zone tampon autour des arcs d'une largeur fonction du rang,
- intersecter le thème Corine Land Cover classé en huit niveaux avec la zone tampon (fig. 4).

---

<sup>6</sup> CORINE : Co-ORdination of INformation on the Environment

Seuls les arcs de même rang sont retenus pour le calcul de la zone tampon. Il est donc possible, lorsque la station est proche d'une confluence qui change le rang en aval, de ne considérer que la portion du cours d'eau de même rang que celle sur laquelle est située la station. Le calcul de surface par type d'occupation du sol est donc pondéré par le linéaire traité. Ce traitement a été automatisé par l'écriture d'un script en langage Avenue sous ArcView 3.2.

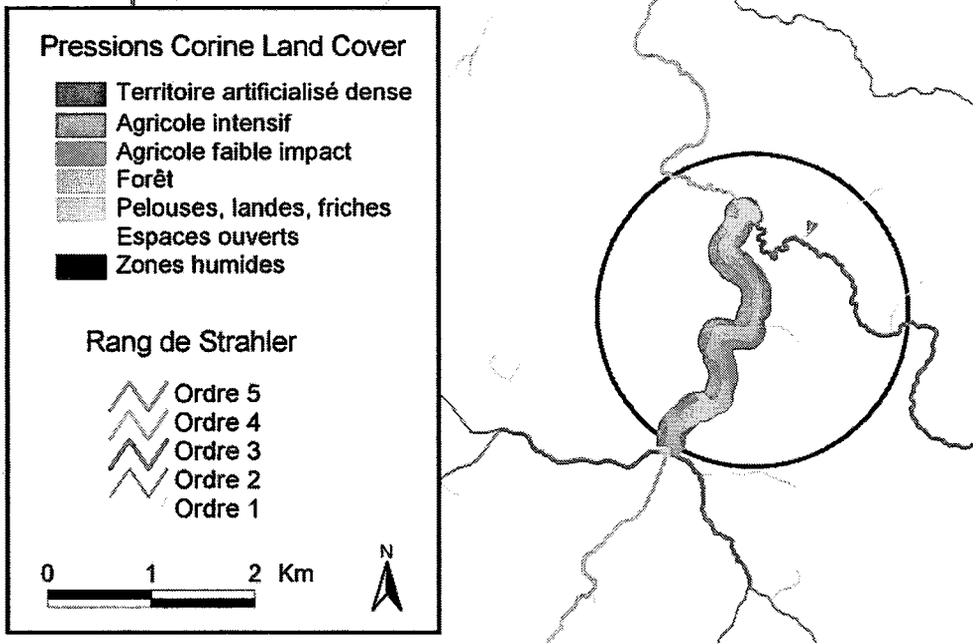


Figure 4 Pressions anthropiques dérivées de l'analyse de CORINE Land Cover.

## 5 Conclusion

Les travaux du laboratoire sur les bassins versants de la Loire et du Rhône initiés dans les années 90 ont conduit à l'utilisation des systèmes d'informations géographiques. Pour répondre aux objectifs de la Directive Cadre, le recours aux mêmes systèmes s'est fait tout naturellement, dans la continuité des travaux antérieurs.

La constitution de la plate-forme SIG à l'échelle nationale telle qu'elle est partiellement présentée dans ce document a demandé un long et important travail de collecte, de mise en cohérence et de traitement des données géographiques.

Cette base de donnée nous permet de faire le lien avec les modèles d'habitat et les modèles pressions-impacts développés au sein du laboratoire.

## Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD – Direction de l'Eau). Il s'inscrit dans le programme de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR). Nous remercions Béatrice Dutang du GIE VALOREZ pour son aide à la préparation du manuscrit. Nous remercierons également Nicolas Mengin du GIE VALOREZ pour son travail sur les stations IBGN.

## Références Bibliographiques

- Bonnefoy D., Chantraine J., Le Bret P., Rabu D. 1996 – Carte géologique de la France à 1/1.000.000 numérique. Guide d'utilisation. Rapport BRGM R39145, 33p.
- BRGM Carte géologique au 1/1.000.000<sup>ème</sup> (6<sup>ème</sup> édition) 1996.
- Notice de la carte géologique au 1/1.500.000<sup>ème</sup>, édition de 1980.
- Cartes géologiques au 1/250.000<sup>ème</sup> (Valence, Nice, Annecy, Marseille, Gap, Dijon, Paris, Chalons sur Saône, Thonon les Bains, Corse).
- Cartes géologiques diverses.
- Dupias G. & Rey P. 1985. Document pour un zonage des régions phyto-écologiques, CNRS, 39 p. + cartes.
- Margat J. (ed) 1970. *Atlas des eaux souterraines de la France*. BRGM, DATAR. Editions du BRGM, Orléans, non paginé.
- Rogers C. F. & Wasson J. G. 1997. Cadrage géographique de la structure et de la dynamique du physique des hydrosystèmes du bassin Rhodanien Français : L'approche hydro-écorégions. Rapport GIP hydrosystèmes : Zone Atelier bassin du Rhône, 03/97- Université de Saint-Etienne, CRENAM/CNRS, UMR 5600 ; Cemagref Lyon BEA/LHQ.
- Souchon Y., Andriamahefa H., Cohen P., Breil P., Pella H., Lamouroux N., Malavoi J.R., Wasson J.G. 2000. Régionalisation de l'habitat aquatique dans le bassin de la Loire. In. Agence de l'eau Loire Bretagne, Cemagref Bely/LHQ, p 291 Southwood, T. R. E. (1978) *Ecological method*. London, Chapman and Hall.
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H. 2002. Définition des hydro-écorégions de France métropolitaine. Approche régionale de typologie des eaux courantes et éléments pour la définition des peuplements de référence d'invertébrés. Rapport Cemagref Lyon BEA/LHQ et MATE/DE, 190pp.
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., Blanc L., 2004, Typologie des eaux courantes pour la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : l'approche par Hydro-écorégion, in *Séminaire Mise en place de systèmes d'information à références spatiales, Montpellier, 13 et 14 novembre 2003, Les Actes*, Cemagref Éditions, p. 39-45.



# Mise en place d'un système d'information à références spatiales sur un ensemble « bassin versant/zone côtière » en appui à un projet de recherche

## *Design and implementation of a spatial information system in support of a ICM (integrated coastal management) research project*

Françoise VERNIER<sup>1</sup>, Gilles TRUT<sup>2</sup>, Danièle MAURER<sup>2</sup>, Isabelle AUBY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Cemagref – Groupement de Bordeaux - Unité ADER (Agriculture et dynamique de l'espace rural)

50, Avenue de Verdun BP3 - 33 612 Cestas Cedex

Tél : 05.57.89.08.36 Fax : 05.57.89.08.01

francoise.vernier@bordeaux.cemagref.fr

<sup>2</sup>Ifremer – Station d'Arcachon

Quai du commandant Silhouette – 33 120 Arcachon

Tél : 05.57.72.29.80 Fax : 05.57.72.29.99

gilles.trut@ifremer.fr ; iauby@ifremer.fr ; danièle.maurer@ifremer.fr

**Résumé :** Ce travail a été réalisé dans le cadre du programme de recherche LITEAU, mené conjointement par le Cemagref, l'Ifremer et l'Université, sur la zone d'influence du bassin d'Arcachon où sont apparues dans les années 90 des proliférations de macroalgues. Un des objectifs de ce programme était d'étudier de manière globale les flux d'azote, leur production par les activités du bassin versant amont et leur influence sur l'écosystème de la lagune. En support au projet, une base de données a été constituée pour permettre de réaliser des calculs de bilans stock/apport massique (N et P) aux échelles spatiales et temporelles pertinentes, à partir d'un travail d'intégration des connaissances et de la mise en cohérence des données des équipes. Après analyse, définition d'unités fonctionnelles et d'échelles temporelles pertinentes, un modèle des données a été établi en utilisant le formalisme UML (Unified Modelling Language) et une maquette de la base réalisée pour tester les requêtes thématiques et spatiales. La base ainsi constituée doit permettre de confronter les hypothèses de fonctionnement du système à certaines périodes-clés.

**Abstract:** This work was carried out in support of Liteau project (Cemagref, Ifremer, Bordeaux University) developed with the aim to study the coupling between land-use and coastal lagoon processes in the Arcachon Basin and its catchment area. Macroalgal blooming as a result of eutrophication has been observed during the last twenty years in the area. A spatial information system was designed in order to compute nitrogen mass balances at relevant spatial and time scales. An inventory of existing data was made in various fields :

land-use and human activities, climate, soil, hydrology, vegetation... Functional conceptual sub-units were defined in the Arcachon Bay and its catchment area as well as relevant time scales. An UML (Unified Modelling Language) model was built and a database prototype (using ArcView and Microsoft Access) designed for setting thematic and spatial queries. This information system linked with hydrological and hydrodynamic models can be helpful to understand changes in the lagoon (primary producers) upon changing nutrient loadings at different key periods.

## 1 Introduction

Le projet de recherche LITEAU à l'origine de la mise en place du SIRS<sup>1</sup> devait contribuer à la conservation de l'écosystème du Bassin d'Arcachon, notamment de l'herbier de zostères (*Zostera noltii*) et permettre de mieux comprendre le problème des proliférations macroalgales (*Monostroma obscurum*) apparues depuis 1990 (1). L'effet des variations d'apports en nutriments devait être évalué sur les communautés des producteurs primaires majeurs dans le souci de contribuer à la conservation des herbiers de zostères et de garantir une productivité phytoplanctonique capable de soutenir une activité ostréicole durable. Les interactions entre producteurs primaires sont fortement déterminées par les quantités de sels nutritifs qui entrent dans la lagune ainsi que par leur répartition spatiale (2). La limitation du développement des macroalgues passe donc par une meilleure gestion du bassin et de son bassin versant, où deux activités économiques, l'agriculture et la sylviculture, prédominent, chacune produisant des flux de nutriments bien différenciés tant en quantité qu'en nature (azote minéral/organique) (3)(4). Le partenariat entre le Cemagref, l'Université Bordeaux I, le CNRS et l'IFREMER ont permis une approche pluridisciplinaire selon le concept de « continuum aquatique » associant les zones terrestres et la zone côtière (2).

La réalisation d'un SIRS permettant la mise en commun des données déjà acquises par les équipes et la confrontation pertinente de ces données a été identifiée comme une tâche à part entière du projet de recherche. L'objectif de ce système d'information était notamment de pouvoir réaliser des calculs de bilans massiques aux échelles spatiales et temporelles pertinentes à partir d'un travail d'intégration des connaissances.

## 2 Démarche adoptée

L'implantation d'un système d'information doit s'intégrer dans une démarche plus large d'analyse des objectifs du système et des besoins des usagers pour éviter l'écueil du SIRS « alibi » d'une meilleure efficacité mais sans véritable utilité (5).

Dans le cadre de ce projet, le système devait prendre en compte les données géographiques et thématiques acquises par les équipes de recherche à des pas

---

<sup>1</sup> Système d'Information à Références Spatiales.

de temps et des échelles très variées, les confronter, les combiner de manière à pouvoir produire des indicateurs et des bilans pertinents par rapport à la problématique de recherche. Le système à construire devait également pouvoir échanger des données (en entrée et en sortie) avec le modèle hydrologique en cours de mise au point au Cemagref (Geriqueau) et certains modèles développés à Ifremer (dispersion des flux, production primaire dans le bassin d'Arcachon).

Bien que l'ensemble des équipes aient à s'impliquer dans la mise en place du système, la nécessité de travailler de manière conjointe et approfondie a conduit à la mise en place d'un groupe de projet (4 personnes) chargé de piloter la mise en œuvre du système, de dialoguer avec les utilisateurs et le comité de pilotage du projet de recherche.

La démarche suivie a combiné l'expertise des équipes et une méthode de mise en place d'un système d'information ( figure 1 ) calqué au départ sur une méthode type Merise, avec les étapes suivantes :

- inventaire de l'information spatialisée et thématique gérée par les différentes équipes, analyse des besoins,
- choix des échelles et objets spatiaux pertinents,
- analyse conceptuelles des données et traitements (formalisme UML),
- étude du couplage avec les modèles externes,
- réalisation d'une maquette sous ArcView et Access,
- mise en cohérence des données des équipes avec le modèle des données,
- implémentation de la base.

Une validation par les équipes de recherche était prévue entre chaque étape.

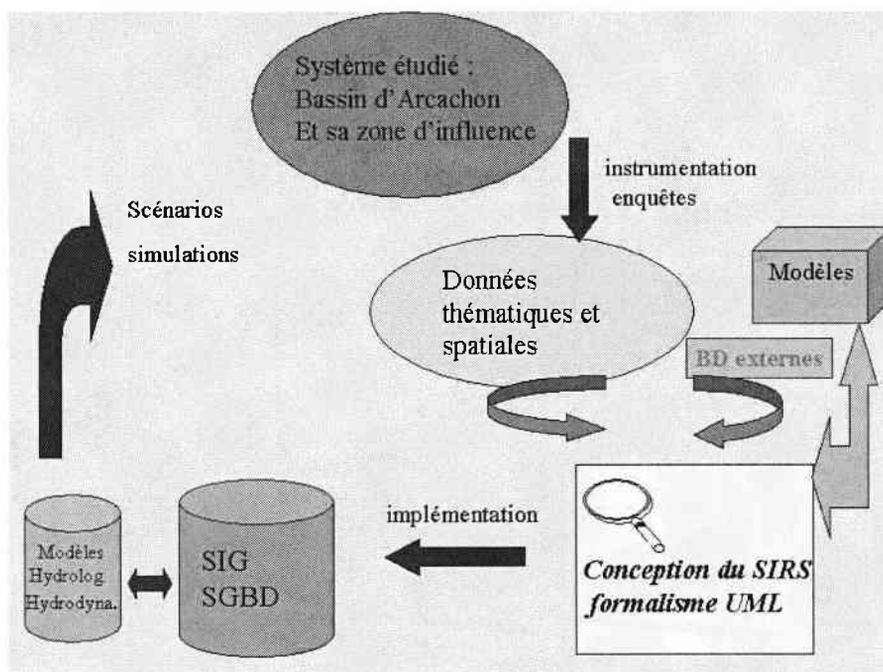


Figure 1 Schéma général de la démarche.

### 3 Inventaire des données et analyse des besoins

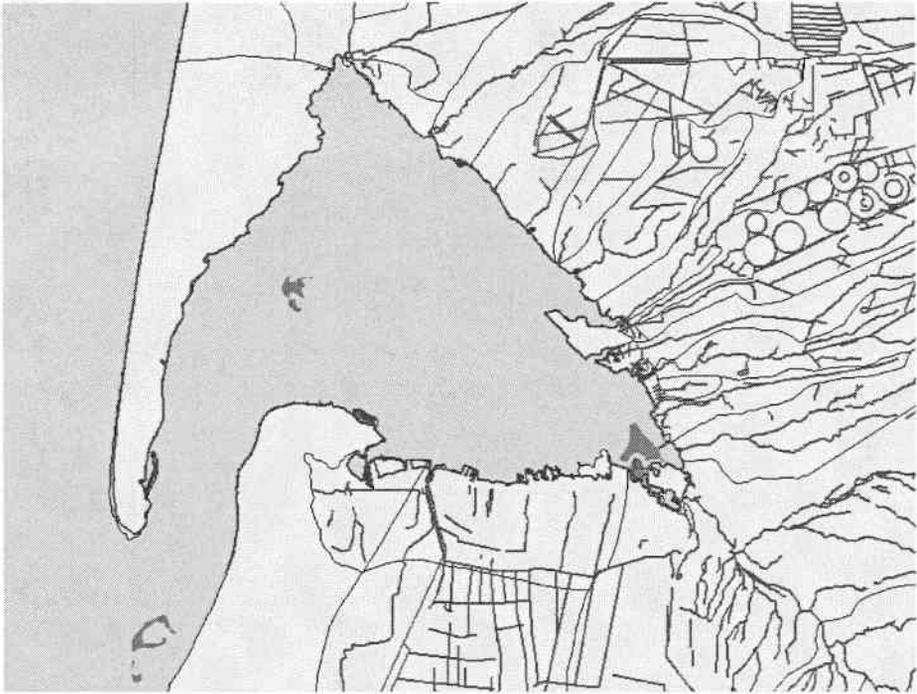
Une phase d'analyse des besoins auprès des équipes de recherche et d'inventaire des données existantes, qu'elles soient thématiques ou spatiales, précède la mise en place de modélisation du système d'information. Sont recensées parallèlement toutes les sources externes de données (bases de données publiques ou privées, existence d'études spécifiques, travaux antérieurs). Si certains guides existent déjà concernant la gestion des zones côtières (8) ou sur des bassins versants (7), ils ne traitent pas du problème spécifique de qualité d'eau côtière en relation avec des flux de nutriments dus aux pollutions diffuses, dans une approche intégrée.

Les données géographiques stockées au Cemagref sur la zone d'influence du bassin d'Arcachon et celles disponibles à l'Ifremer différaient par leur échelle d'origine et leur référentiel : Lambert II, Mercator, Lambert III selon les cas. Le trait de côte ne correspondait pas, les contours du bassin étaient gérés de manière beaucoup plus fine par l'Ifremer, en revanche le Cemagref détenait une occupation du sol actualisée sur la zone amont (traitement d'images). Il a donc fallu extraire de toutes ces informations les plus précises et pertinentes pour la question traitée, et les mettre en commun.

Un travail d'inventaire a permis d'établir un catalogue des données géographiques précisant la date d'acquisition, la source des données, l'échelle d'origine, le référentiel, le gestionnaire de l'information. Suite à cette première étape, la mise en correspondance des bases de données du Cemagref et de l'Ifremer posait le problème de l'appariement (6), de la mise en correspondance ou de la fusion de données de différentes sources dans la perspective d'une utilisation plus large. Nous nous sommes contentés dans le cadre de ce projet d'analyser les spécifications de chacune des bases et d'évaluer la compatibilité géométrique et sémantique de l'information détenue par chaque organisme. Le résultat obtenu suite à cette analyse a été la création de nouvelles couches d'information validées dans un référentiel commun ( figure 2 ).

En ce qui concerne les données thématiques, l'analyse de l'existant a permis de collecter les informations détenues par les équipes, leur mode et fréquence d'acquisition, leur support, leur fréquence de mise à jour, leur disponibilité. Les entretiens avec les équipes ont permis d'aboutir à la mise en place d'une première version du dictionnaire des données mais aussi d'aborder les problèmes de fond : de quelles données a-t-on besoin pour répondre à la question de recherche ? Ces données existent-elles ? Ou restent-elles à acquérir ? Enfin, cet inventaire a permis d'impliquer les équipes de recherche dans le processus de mise en place du système d'information en faisant passer quelques idées :

- la nécessité de définir une sémantique commune et précise (qu'est-ce qu'un point d'apport, une campagne, un débit, un point de mesure....) alors que ces notions sont implicites dans des équipes très spécialisées,
- ne pas agréger des bases de données déjà existantes dans les équipes (base hydrologique ou piézométrique à pas de temps très fin, par exemple) mais réfléchir quelles informations issues de ces bases doivent être mises en commun car pertinentes pour la question de recherche,
- ne pas sous-estimer le travail nécessaire pour « traduire » ces données, qui peut être non négligeable : changement de format, d'algorithmes, agrégation à des pas de temps différents...

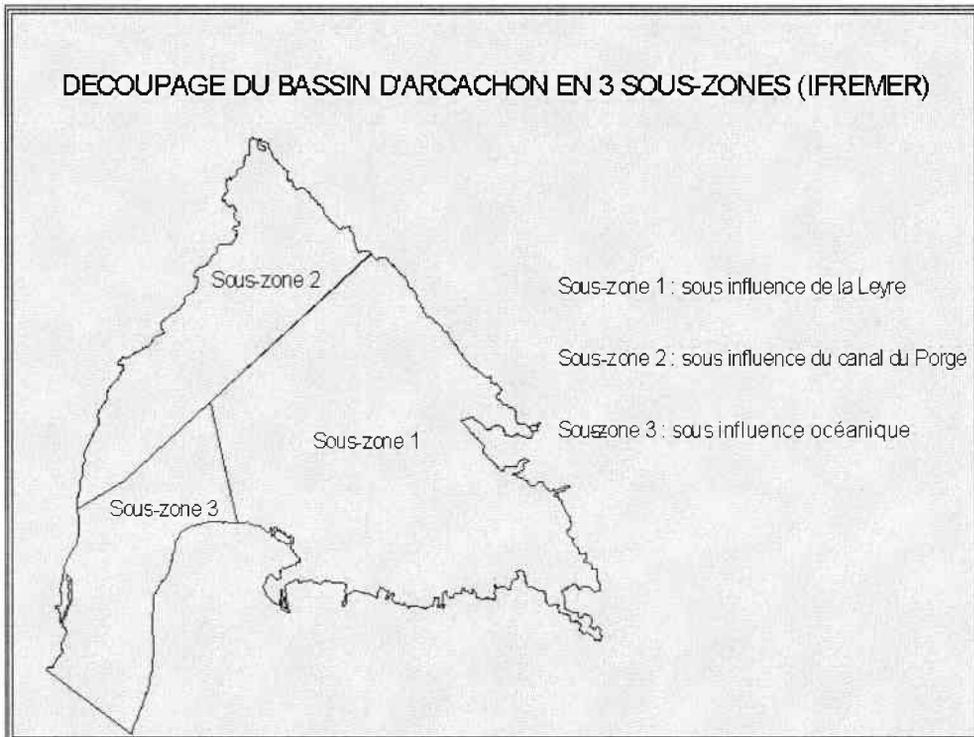


**Figure 2** Mise en cohérence des couches d'information issues d'échelles et de référentiels différents : exemple du trait de côte.

Les premières réunions de validation ont permis à chacun de mieux appréhender la diversité des sources de données existantes et de réfléchir sur les méthodes à employer pour les confronter de manière pertinente : à quelle échelle spatiale ? temporelle ? Elles ont permis de réaliser les difficultés d'intégration dans le système d'information de certains résultats qui procèdent de la compréhension de processus (par exemple le rôle des zones humides) sans qu'on soit capable de les quantifier. Ainsi ces données pourront faire partie du système d'information, notamment de manière cartographique mais elles seront difficiles à intégrer dans un calcul d'indicateur ou de bilan. Enfin, dans ce contexte, cas d'un SIRS développé en appui à la recherche, des difficultés supplémentaires apparaissent : certaines données ou résultats ne seront acquis qu'en cours de programme, les modèles sont encore en cours de développement lors de l'analyse. Des modifications peuvent donc intervenir en cours de projet. Le système d'information doit donc être conçu comme évolutif et modulaire pour prendre en compte les inflexions possibles.

## 4 choix des échelles de travail et des objets spatiaux pertinents

Lors de la mise en place d'un SIRS, l'inventaire et les premières analyses des besoins réalisés doivent permettre d'avancer suffisamment la réflexion pour aboutir au choix d'échelles et d'objets spatiaux pertinents pour le problème posé. Le choix de l'échelle de travail doit prendre en considération à la fois les unités administratives de gestion auxquelles sont subordonnées l'acquisition de certaines données, ainsi que les enjeux environnementaux identifiés. Ces derniers correspondent à des processus biogéochimiques qui échappent à toute délimitation administrative. On parlera d'unité fonctionnelle pour désigner le sous-système (hydrologie, hydrogéologie) dans lesquels ces processus peuvent être individualisés et à laquelle on se ramènera pour déterminer par la suite une unité cohérente de gestion ou d'intervention. Le bassin d'Arcachon a été ainsi découpé en trois sous-zones en fonction de la circulation de l'eau (1). L'une est sous influence du Cirès et du Canal des étangs, l'autre de la Leyre et autres tributaires, la troisième est sous influence marine et reçoit les eaux des deux autres zones ( figure 3 ).

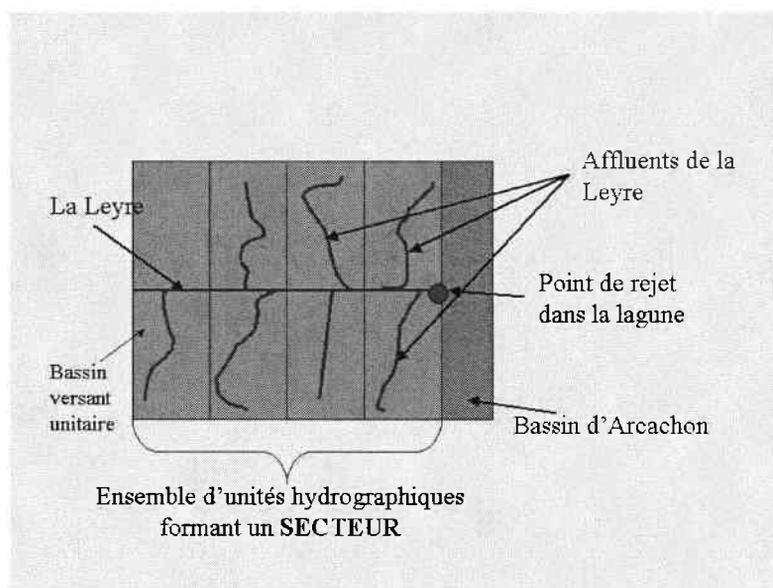


**Figure 3** Découpage du bassin d'Arcachon en trois sous-zones (unités fonctionnelles).

À l'échelle d'un grand bassin versant comme la zone d'influence du bassin d'Arcachon, les données disponibles sont des données statistiques ou obtenues à

petite échelle géographique (données issues de la télédétection par exemple). Elles n'ont pas la même signification que des données mesurées, exhaustives ou échantillonnées comme on peut en obtenir à l'échelle de parcelles, d'exploitations ou de petits bassins expérimentaux (mais ces données existent également). La description des systèmes de production et des pratiques agricoles ne peut donc être envisagée que sous forme de typologie. A côté des données « brutes », résultats de mesures effectuées sur le terrain, cohabitent donc des résultats de typologies ou des indices calculés dont il faut préciser le domaine de validité d'utilisation.

Le projet Liteau s'est intéressé particulièrement à la production et au devenir des flux d'azote arrivant dans le bassin d'Arcachon via le réseau hydrographique : l'unité fonctionnelle retenue pour le bassin versant a été l'unité hydrographique où sont générés les flux de nutriments. Ces unités hydrographiques sont regroupées en secteur. A chaque secteur correspond un point d'apport au bassin ( figure 4 ).



**Figure 4** Découpage de la zone d'influence en unités fonctionnelles.

Les unités fonctionnelles choisies constituent les objets de référence et il a fallu s'astreindre à ce que toutes les données y soient rattachées, mais dans certains cas cette affectation s'est avérée difficile. En effet, ces unités fonctionnelles se réfèrent à des limites naturelles et non administratives. De ce fait, Il n'est pas possible d'utiliser en l'état des données statistiques (statistiques agricoles ou forestières) à l'échelle de l'unité fonctionnelle choisie, à savoir pour la partie territoire l'unité hydrographique, sans faire appel à des techniques d'agrégation ou de désagrégation de données.

Deux échelles de travail ont été privilégiées : le 1/250 000 pour les données acquises ou existantes à petite échelle et les interfaces avec les modèles, le

1/50 000 pour les données acquises sur les zones « zoom ». La mise en cohérence des données a nécessité dans certains cas des numérisations complémentaires (trait côtier, localisation des points d'apport...). La coexistence de ces différents niveaux d'échelle dans le système doit être prise en compte lors de la mise en place des requêtes : il faut veiller à ne pas utiliser ou confronter des données ou des résultats qui ne sont pas valides à la même échelle géographique, y compris par des paramétrages logiciels (possibles dans les logiciels SIG ArcView ou ArcGis).

La définition des échelles de temps implique aussi un consensus des équipes : certaines données ont été acquises à des pas de temps journalier ou hebdomadaire, dans d'autres cas les mesures sont annuelles : campagne ponctuelle de mesures, pour les pratiques agricoles données collectées sur une campagne agricole... Pour le système d'information Liteau, c'est un pas de temps mensuel qui a été privilégié, ramené à la quinzaine selon la précision des différentes sources de données à confronter. Cependant, pour certaines couches d'information, le pas de temps est resté annuel faute de données mensuelles existantes (algues, occupation du sol, etc.)

Les échanges entre équipes ont fait émerger l'importance de la notion de saisonnalité : la période à laquelle les flux d'azote arrivent au bassin d'Arcachon par le réseau hydrographique influence de façon majeure le devenir de ces flux dans la lagune. Cependant cette notion est difficile à concrétiser en termes de données : agrégation sur des périodes dont il faudra définir les bornes, difficultés pour désagréger des données annuelles en deux valeurs « saisonnières » par exemple.

## **5 Mise en place du SIRS : les outils utilisés**

Après analyse de l'existant, le choix des échelles et des objets, le modèle des données peut être décrit. Nous avons choisi d'utiliser une méthode d'analyse « orientée objet » : UML ( figure 5 ) qui présente l'avantage de permettre la modélisation complète d'une application selon trois plans complémentaires :

- statique : modéliser la structuration des données à l'aide des diagrammes de classes,
- dynamique : décrire la communication et la coopération entre les objets grâce aux use-cases, aux diagrammes de séquences,
- opératoire : préciser les contraintes d'intégrité des objets par des invariants.

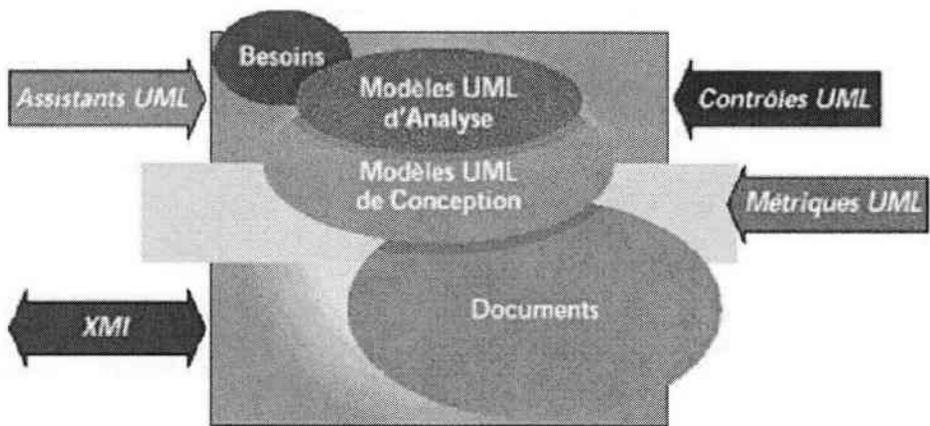


Figure 5 Conception d'un modèle avec UML (source : Softeam).

Le formalisme UML permet de représenter un système sous l'angle des données (représentation statique) et sous l'angle des traitements (représentation dynamique). Le logiciel utilisé (Objectteering de Softeam) a permis de gérer facilement la documentation qui est mise à jour en fonction des modifications apportées et générée à la demande. Ceci a été particulièrement utile dans le cadre d'un projet de recherche où le groupe de projet restreint disposait de peu de temps pour la logistique. A chaque étape ou modification importante une validation des équipes impliquées s'imposait. Elle a été grandement facilitée par la sortie automatique d'un document « à jour ».

Nous avons choisi de réaliser l'implémentation du système en utilisant un logiciel SIG (ArcView) et un logiciel de SGBD (Access) dont les équipes partenaires du projet étaient déjà équipées et dont elles maîtrisaient l'utilisation. Dans ce contexte, il a été possible de « traduire » le modèle décrit en langage de bases de données relationnelles (SQL)<sup>2</sup>. Le gain de temps a été important même si une partie des opérations a du être effectuée manuellement (requêtes, liaisons avec les modèles).

## 6 Mise en place du SIRS : modélisation à l'aide du formalisme UML

L'inventaire des données s'affine avec la conceptualisation des objets et de leurs relations au sein du modèle des données. A ce stade, la disponibilité des données, leur facilité d'acquisition et de mise à jour doivent être prises en compte. Le travail conduit en partenariat avec Ifremer a permis de proposer aux équipes de recherche une structuration des données en modules :

<sup>2</sup> module SQL de l'Atelier de Génie Logiciel Objectteering de Softeam.

- Module « bassin » : données sur la lagune, végétation, algues, mesures de qualité,
- Module « hydrologie » : unités hydrographiques, données hydrologiques sur la zone d'influence,
- Module « activités humaines » : données sur les pratiques agricoles, forestières,
- Module « territoire » : caractéristiques physiques, écologiques, occupation du sol,
- Module « découpage administratif » : unités administratives, mesures incitatives ou réglementaires,
- Module « couplage avec les modèles » : interface entrée/sortie.

Là encore le logiciel utilisé a permis de générer une documentation reprenant la description détaillée des objets et des relations, ce qui a été très utile dans la phase d'analyse où de nombreux aller-retours avec les utilisateurs et de nombreuses modifications ont été nécessaires. Le formalisme UML a dû être assimilé par les équipes de recherche pour pouvoir discuter du modèle et le valider : il est conseillé de prévoir une formation des équipes impliquées, faute de quoi les discussions peuvent s'enliser par incompréhension des questions posées. Dans cette phase du projet, chaque module ou package a été décrit avec tous ses objets et ses relations ( figure 6 ).

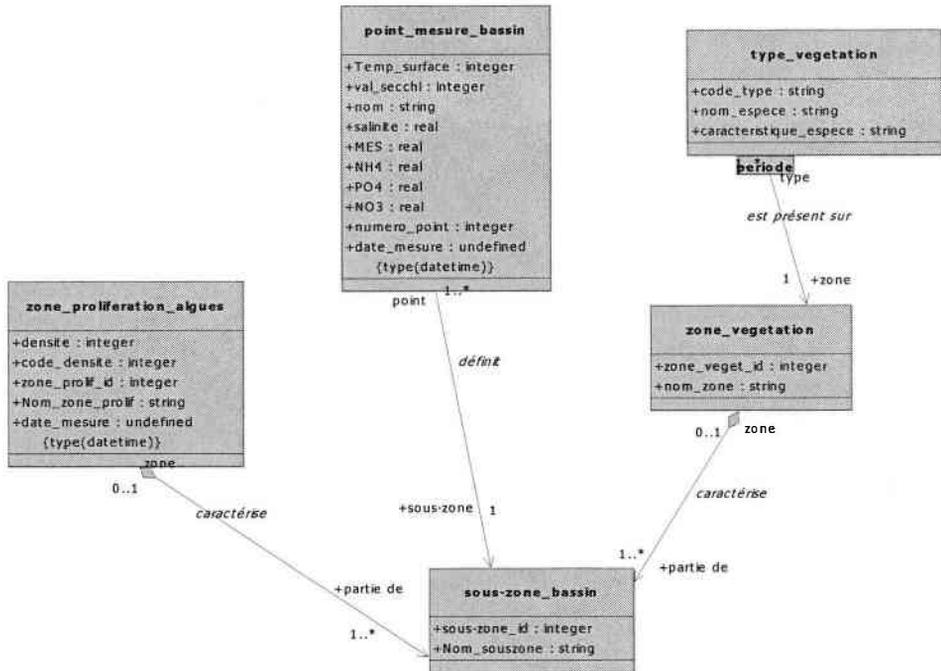
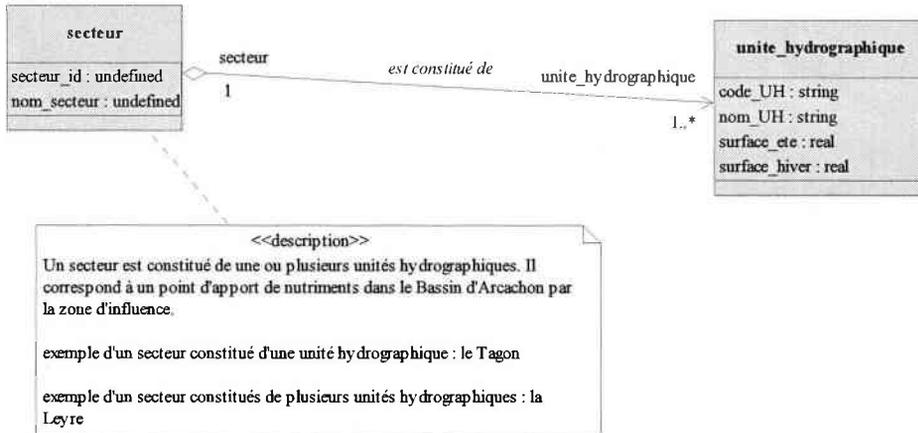


Figure 6 Diagramme statique du package « Bassin ».

Les objets ou classes sont reliés entre eux par des relations, elles-mêmes porteuses le cas échéant d'attributs. Ces relations portent des cardinalités (0, 1, n ou \*) qui indiquent le type de relation entre les objets : un à un, un à plusieurs, plusieurs à plusieurs ( figure 7 ).



**Figure 7** Exemple de la relation secteur-unité hydrographique : un secteur est constitué de une ou de plusieurs unités hydrographiques (relation 1,n).

Une fois analysés les objets qui composent la base de données et leurs relations, il faut également décrire l'ensemble des cas d'utilisation de la base en construction, les acteurs impliqués et les opérations qui composent chaque cas d'utilisation. Ces opérations peuvent être de plusieurs natures :

- sélectionner selon des critères thématiques ou spatiaux : quelles sont les pratiques agricoles des agriculteurs présents sur les unités hydrographiques qui influencent la sous-zone numéro 1, détermination d'une période de temps où des données sont présentes à la fois sur la lagune et sur la zone d'influence, etc.
- mettre à jour la base en fonction de nouveaux résultats acquis ou mis en forme par les équipes (exemple mise à jour de ces pratiques en fonction de la dernière enquête annuelle),
- effectuer des calculs à partir de données présentes dans le système pour produire des données agrégées ou des indicateurs,...

In fine la mise en œuvre d'une chaîne d'opérations doit permettre à la base de produire les bilans massiques recherchés.

Le module « interface avec les modèles » avait pour objectif de s'interfacer avec les modèles développés dans le cadre de ce projet :

- le modèle hydrologique (Geriqueau) développé au Cemagref pour modéliser le transfert des flux de nitrates produits par les bassins versants de la zone d'influence du bassin d'Arcachon,

- le modèle de fonctionnement hydrodynamique de la lagune (MARS) développé à Ifremer pour modéliser la dispersion de ces flux de nitrates dans la lagune et à terme leur utilisation par les producteurs primaires,

Pour s'interfacer avec ces modèles, le module « interface » du SIRS Liteau devait permettre de mettre en forme automatiquement un fichier des paramètres d'entrée en considérant le pas de temps et la maille du modèle. Les données identifiées comme étant pertinentes en entrée du modèle (exemple type de sol, occupation du sol.. pour le modèle hydrologique) devaient être agrégées automatiquement par le module à l'échelle de la maille choisie et avec un mode de calcul validé par le modélisateur. D'autre part, le module « interface » du SIRS devait pouvoir récupérer les paramètres de sortie du modèle après passage de simulation et les intégrer dans le SIRS comme des données simulées. A terme, l'intérêt est effectivement de pouvoir simuler des scénarios d'occupation du sol, passer des paramètres en entrée du modèle hydrologique afin de récupérer en sortie de ce modèle des flux d'azote simulés ; ces flux simulés peuvent à leur tour être fournis en paramètre d'entrée du modèle de fonctionnement hydrodynamique d'Ifremer pour simuler leur devenir dans la lagune et donc leur impact possible sur les producteurs primaires ( figure 8 ).

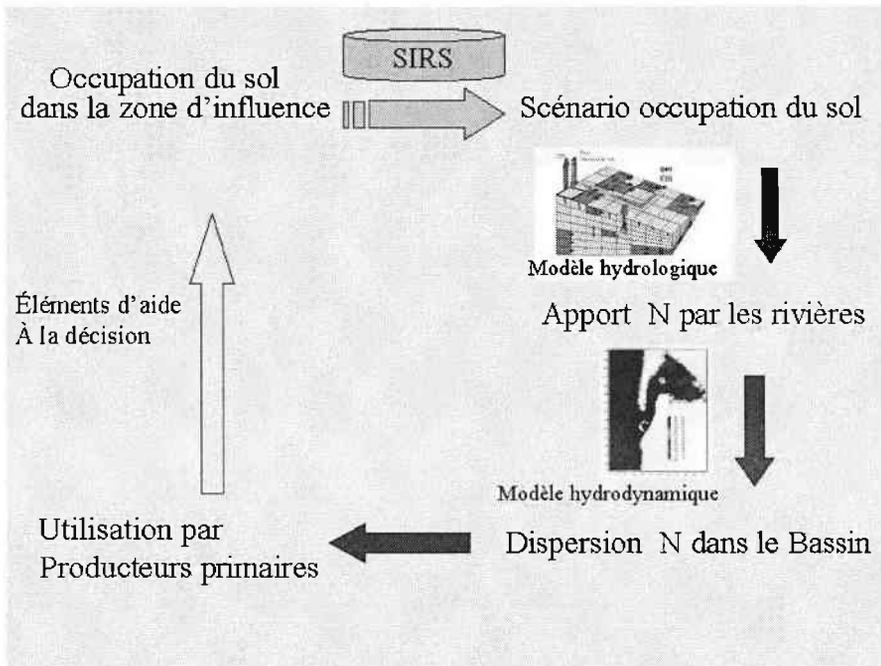


Figure 8 Couplage SIRS - modèle hydrologique et de dispersion des flux dans la lagune.

## 7 Mise en place du SIRS : maquette et mise en oeuvre

La réalité de l'équipement informatique et des compétences des équipes de recherche a conduit à une traduction du modèle vers une base de données relationnelle classique et non vers une base orientée objet, ce qui est certes l'idéal. La génération de la base de données peut se faire en partie automatiquement à l'aide d'un AGL.<sup>3</sup> Chaque objet et relation décrit donne lieu à la génération de langage SQL qui permet la création des tables associées. La traduction du modèle prend en compte : les classes, les attributs, les associations, les héritages. Les associations sont traduites selon le sens de navigation décrit dans le modèle et génèrent ou non des tables Access selon le cas :

- pour les associations de cardinalité 1, il y a ajout d'une clef dans la table d'où part l'association,
- pour les associations de cardinalité 1, chaque classe donne lieu à la création d'une table et l'association donne lieu à la création d'une table supplémentaire en jointure.

Le schéma relationnel ACCESS inclut des tables liées qui sont les tables attributaires des couches d'information spatiales. Ces tables liées assurent la cohérence entre les tables attributaires des couches d'information géographique et les tables thématiques Access.

Une maquette a ensuite été réalisée pour illustrer les possibilités de croisement et agrégation de données, de requêtes thématiques et spatiales qui pourraient être utiles au projet LITEAU. A partir du jeu de données intégré à la maquette, il est possible d'identifier rapidement les périodes temporelles les plus pertinentes pour une validation des hypothèses, celles où l'on dispose du maximum de données par rapport à une sélection de critères thématiques ou géographiques. Un autre exemple d'utilisation du système est d'exécuter une requête spatiale sur la partie lagune pour « remonter » à la zone d'influence amont, et y analyser les secteurs ou unités hydrographiques sur des critères géographiques ou thématiques ( figure 9 ). L'exemple inverse est possible en analysant les mesures existantes ou simulées sur un territoire donné, puis en confrontant les résultats de cette analyse aux mesures effectuées dans la lagune sur la même période de temps.

La limite de cette souplesse d'utilisation du SIRS est la difficulté d'une réelle gestion spatio-temporelle dans les requêtes : répondre à une question thématique posée sur une période donnée et « aiguiller » sur un affichage pertinent de couche d'information géographique aux dates choisies, par exemple.

---

<sup>3</sup> Logiciel utilisé Objecteering de Softeam – module SQL.

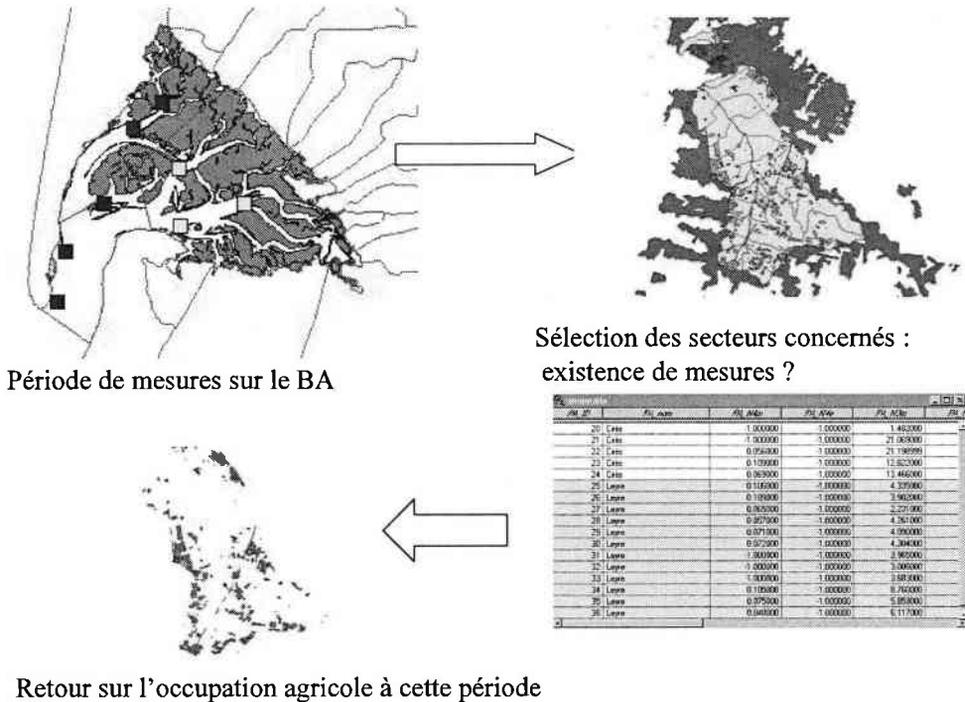


Figure 9 Exemple de requête thématique et spatiale sur le jeu d'essai.

## 8 Conclusion

Les problèmes de pollution diffuse à l'échelle de grands bassins versants et zones côtières correspondantes sont abordés dans les régions par l'ensemble des acteurs de terrain, services de l'Etat, collectivités locales, organisations professionnelles. Rapidement, il apparaît utile aux acteurs de stocker les nombreuses données existantes ou acquises sous une forme informatique, très souvent un SIG, avec un objectif d'aide à la décision et de suivi. Néanmoins l'utilisation de ces systèmes reste souvent limitée à une mise en forme cartographique. Des difficultés supplémentaires apparaissent lorsque le suivi devient pluriannuel. La recherche est alors souvent sollicitée pour apporter une aide méthodologique et produire des éléments d'aide à la décision.

On peut constater en effet l'absence sur le marché d'outils adaptés à l'analyse de systèmes complexes impliquant l'utilisation de plusieurs bases de données géographiques et thématiques. Dans l'attente de tels outils, l'utilisation du formalisme UML en appui à l'analyse et à la mise en place de SIRS présente de nombreux avantages. Elle permet de décrire le système d'information dans ses composantes statiques et dynamiques, de gérer la « traduction » en langage SQL, et de produire une documentation régulièrement mise à jour. Les contrôles

intégrés permettent de détecter les incohérences dans la définition des données et permettent ainsi d'éviter des pertes de temps lors de l'implantation de la base de données. Des difficultés perdurent cependant pour modéliser les dynamiques temporelles et le temps de mise en œuvre reste important. L'implication et la motivation forte des différents partenaires restent indispensable pour aboutir à un système opérationnel.

Des démarches comme celle effectuée dans le cadre du projet Liteau peuvent contribuer à faire émerger, dans le cadre de projets européens comme ELOISE, des outils méthodologiques pour l'évaluation de l'impact des activités humaines sur les milieux littoraux et les stratégies à mettre en œuvre pour y remédier.

## Bibliographie

1 - Manaud F., Bouchet J.M., Deltreil J.P., Maurer D., Trut G., Auby I., Dreno J.P., L'Yavanc J., Masson N. & Pellier C. (1997). Etude intégrée du Bassin d'Arcachon. Tome 1 : Physique ; Tome 2 : Qualité de l'eau et des sédiments ; Tome 3 : Biologie ; Tome 4 : Activités ; Tome 5 : Activités ressources vivantes. Rapport interne DEL/Arcachon, 5 classeurs.

1 bis - Auby I., Manaud F., Maurer D., Trut G. (1994). Etude de la prolifération des algues vertes dans le Bassin d'Arcachon. *Rapport IFREMER - CEMAGREF - SSA - SABARC* (Contrat Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon), 163 p.

2 – De Wit et al, (2003) Rapport final du projet de recherche sur le littoral (LITEAU) –gestion des richesses écologiques et des ressources économiques du Bassin d'Arcachon : limites du pouvoir tampon de la lagune vis-à-vis des apports du bassin versant

3 – Vernier F., Beuffe H., Chossat JC - Qualité des eaux issues d'un bassin versant forestier en sol sableux : le cas des Landes de Gascogne - à paraître dans revue forestière française (2003)

4 - Leibreich, J., Beuffe, H., Delmas, F., Laplana, R., Vernier, F. (2000). Programme TERRA; mise au point d'indicateurs pour l'aide à la décision en matière de gestion des espaces d'influence du Bassin d'Arcachon. Report CEMAGREF, Bordeaux 79 pp. + 24 annexes

5 - Pomon H. (1996) - SIRS et images de l'organisation – revue internationale de géomatique – vol 6– p 61-71.

6 -Sheeren D. (2002) L'appariement pour la constitution de bases de données géographiques multirésolutions - Revue internationale de géomatique vol 12 no2 p 151-168

7 - Vernier, F. Turpin, N et Bioteau T. (2001) - Méthode de mise en place d'une base de données spatialisée et de cartographie sur un bassin versant agricole Cemagref - groupements de Bordeaux et Rennes.

8 - Yves Henocque et Jacques Denis (1997) Zonation et qualification de l'espace littoral : un outil méthodologique au service de l'approche intégrée de la zone côtière — colloque Bordomer Aménagement et protection de l'environnement littoral pp69-80.



# Aperçu des méthodes de conception de SIRS disponibles et proposition d'alternatives pour la modélisation de la dynamique des données spatio-temporelles

## *Overview of GIS conception methods available and proposition of alternatives for the design of spatio-temporal data dynamics*

François Laplanche

Boursier FRIA

Laboratoire SURFACES - Université de Liège

Allée du 6 Août, 17 - 4000 Liège - Belgique

Tél. : +32 (4) 366 57 52 - Fax. : +32 (4) 366 56 93

F.Laplanche@ulg.ac.be

**Résumé :** Le domaine de la conception de SIRS<sup>1</sup> est sans cesse en évolution et les méthodologies de conception spécifiques sont de plus en plus riches et nombreuses. Nous proposons dans cet article une comparaison de quatre méthodes parmi les plus significatives. Les différences sont mises en évidence sur base d'une série de critères de comparaison. Ensuite, nous énonçons quelques idées sur l'utilisation des diagrammes comportementaux d'UML<sup>2</sup> en conception de SIRS.

**Abstract:** The domain of GIS modelling is always in evolution and the dedicated methods are richer and larger. This article offers a comparison between four of the most significant methods. Their oppositions are highlighted using some criteria of comparison. Secondly some ideas for the use of the UML dynamic diagrams in GIS design are introduced.

## 1 Introduction

Depuis presque 15 ans maintenant, le domaine de l'information géographique a proposé un certain nombre de méthodes pour la conception des systèmes d'information à référence spatiale. Certaines étaient l'adaptation de méthodes non spécifiques principalement par la spatialisation et parfois la temporalisation de modèles conceptuels tandis que d'autres proposaient des méthodes spécifiques avec des outils qui leur étaient propres. Le domaine n'est donc pas neuf, mais il a

---

<sup>1</sup> SIRS : Système d'information à Référence Spatiale.

<sup>2</sup> UML : Unified Modeling Language.

subi un nombre important de changements au cours des années, chaque nouvelle méthode se proposant de pallier les manques laissés par ses prédécesseurs. Mais qu'en est-il à présent, pour le concepteur, quels sont les choix qui lui sont proposés, et qu'est ce que ces choix impliquent dans la suite du processus de conception ?

Parmi les méthodes les plus souvent citées, nous avons relevé Perceptory et son Geo-UML, MADS et le Projet MurMur, la méthode MECOSIG et le formalisme CONGOO ainsi que la méthode POLLEN plus spécifique aux Systèmes d'Information sur l'Environnement (SIE). Nous proposons une comparaison basée sur une série de critères tels que l'expression de la spatialité et de la temporalité ainsi que les outils qui supportent ces méthodes. Les points 2 et 3 suivants présentent tout d'abord brièvement chacune des méthodes indépendamment puis les comparent sur base des critères précités.

Malgré l'importance des solutions préexistantes, un élément reste problématique à nos yeux, c'est la gestion de la dynamique en terme de cycle de vie des entités géographiques. Dans l'ensemble des diagrammes qu'il fournit, le formalisme UML en offre quelques-uns qualifiés de comportementaux ou dynamiques. Ceux-ci sont au nombre de quatre. Il s'agit des diagrammes d'états-transitions, d'activités, de séquences et de collaboration. En les adaptant, une utilisation conjointe de ceux-ci avec le diagramme de classes, offre la possibilité de modéliser de manière élégante et pratique certains aspects dynamiques propres aux entités géographiques. Nous esquissons dans la partie 4 de cet article, les premières réflexions sur une méthode de conception de SIRS se voulant spécifiquement adaptée à la modélisation de la dynamique spatiale des données géographiques et qui tiendra compte des standards en vigueur tels les types abstraits de l'OpenGIS ou les standards ISO et CEN en matière de catalogage de données, de types de données... (OpenGIS, 2003) (ISO/TC 211, 2003).

Pour l'ensemble des figures de cet article, et par analogie avec le formalisme CONGOO (cf. paragraphe 2.3), nous avons retenu le choix de substantifs au pluriel pour le nom des classes.

## **2 Les méthodes de conception de SIRS**

### **2.1 Perceptory et son Geo-UML<sup>3</sup>**

L'équipe d'Yvan Bédard de l'Université Laval au Québec a développé une méthode générale qui permet d'étendre n'importe quel formalisme graphique de modélisation pour la conception géographique. Cette méthode est basée sur les PVL (Plug-in for Visual Language) que l'on pourrait traduire par « extension pour langage visuel ». Il existe des PVL spatiaux et des PVL spatio-temporels.

---

<sup>3</sup> (Bédard Y., 1999) (Brodeur J. et al, 2000) (Bédard Y. et al, 2003).

Les PVL ont été développés indépendamment de tout langage de modélisation. Ils se présentent sous forme de pictogrammes à ajouter au modèle. Cette représentation graphique permet d'appréhender rapidement l'information qu'ils véhiculent sans pour autant surcharger exagérément le modèle.

Pour le moment, les PVL spatiaux se limitent à une représentation en deux dimensions, ils ne permettent pas de traiter des volumes. On distingue plusieurs grandes catégories de géométries : la géométrie simple, la géométrie alternative, la géométrie multiple et la géométrie complexe.

L'utilisation des PVL spatio-temporels repose sur deux concepts temporels de base que sont l'existence et l'évolution.

L'existence d'un objet correspond à sa période de vie et va de sa naissance à sa mort. L'évolution quant à elle caractérise les divers changements d'état d'un objet au cours de sa vie. On distingue l'évolution descriptive et l'évolution spatiale. La première comprend les différents changements de valeurs des attributs de l'objet tandis que la seconde s'attache à la gestion de ces changements de forme ou de position.

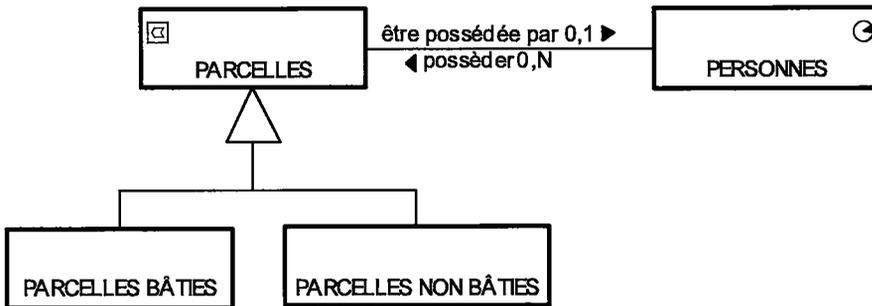


Figure 1 Modèle réalisé avec Perceptory.

Perceptory est un gabarit intégrable au logiciel VISIO permettant de créer des diagrammes de classes UML supportant les PVL. Il comprend également un dictionnaire de données et est capable de générer des rapports sur le contenu de celui-ci dans différents formats. Les terminologies utilisées sont d'une part, la terminologie d'UML et d'autre part, les normes ISO/TC 211-19107 Geographic Information : Spatial Schema et ISO/TC 211-19109 Geographic Information : Temporal Schema ainsi que ISO/TC 211-19110 Geographic Information : Feature Cataloguing Methodology et ISO/TC 211-19115 Geographic Information : Metadata (ISO/TC 211, 2003).

Il est possible, à partir d'un diagramme de classe UML, de générer automatiquement le squelette du code en langage SQL dans le format d'entrée du système de gestion de base de données Oracle 8.

La figure 1 est un modèle créé avec Perceptory, les parcelles représentées par des polygones sont possédées par des personnes dont l'existence est conservée sous la forme d'un intervalle de temps.

## 2.2 MADS et le Projet MurMur<sup>4</sup>

MADS (Modélisation d'Application à Données Spatio-temporelles) est un formalisme orienté objet. Il supporte l'encapsulation des données et des traitements et permet la définition d'attributs complexes et multivalués.

La définition des types spatiaux de MADS se fait grâce à l'utilisation d'une structure de généralisation. De plus, comme le soulignent ses auteurs, MADS est susceptible d'être enrichi avec de nouveaux types spatiaux selon les besoins de ses utilisateurs en étendant la hiérarchie proposée ( cf. figure 2 ).

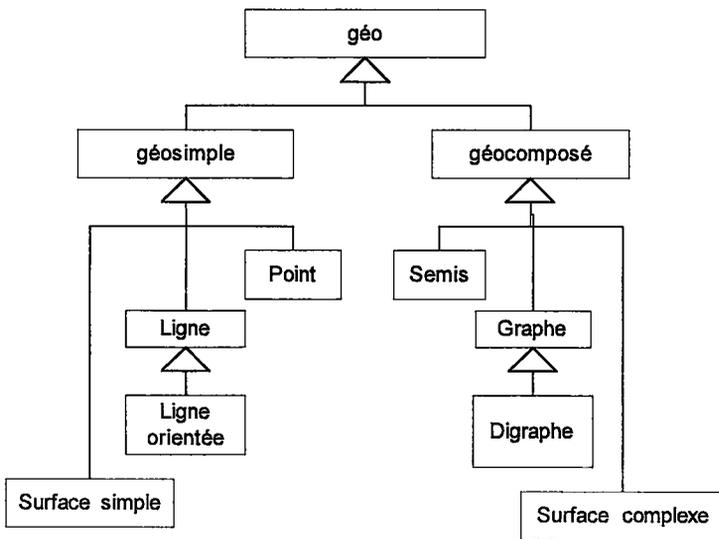


Figure 2 Hiérarchie des types abstraits spatiaux de MADS (d'après Parent C. *et al.*, 1998a).

MADS offre la possibilité de rajouter un pictogramme aux éléments que l'on veut gérer au cours du temps mais il propose également un ensemble de relations temporelles permettant de saisir assez précisément le comportement temporel des éléments du système.

<sup>4</sup> (Parent C. *et al.*, 1998a) (Parent C. *et al.*, 1998b) (Parent C. *et al.*, 1998c) (Parent C. *et al.*, 1999) (Parent C. & Spaccapietra S., 2000) (MurMur, 2003).

MADS propose un nombre important d'associations. Tout d'abord, on distingue les associations classiques telles que l'association au sens strict, la généralisation et l'agrégation. Ensuite il propose des associations spatiales et des associations temporelles. Parmi les premières, on distingue les relations topologiques et l'agrégation spatiale tandis que les secondes proposent à la fois des versions temporelles des associations classiques et des associations temporelles plus spécifiques telles que l'association de transition pour modéliser le changement de classe d'un objet, l'association de génération qui modélise l'émergence de nouveaux objets, l'association inter-temporelle qui définit les relations topologiques temporelles (précède, succède, rencontre...) et enfin l'agrégation d'instantanés où la période de vie du composé comprend les périodes de vie des composants.

Les associations topologiques entre objets géographiques sont exprimées sous la forme d'un verbe enrichi d'un pictogramme symbolisant la situation topologique.

Notons encore que MADS, bien que favorisant une discrétisation de l'espace, offre la possibilité de modéliser des champs spatiaux continus grâce à la notion d'attribut complexe.

MurMur, pour « Multi-representations and multiple resolutions in geographic databases », est un projet réalisé dans le cadre du programme IST de l'Union Européenne. Son objectif est de définir une nouvelle approche pour manipuler les bases de données géographiques où plusieurs représentations d'une même information doivent être prises en compte (MurMur, 2003). Le point de départ du projet était le formalisme MADS qui avait été développé par certains partenaires du projet. Une première étape devait être l'extension de MADS pour la prise en compte de la multi-représentation, ensuite, un éditeur de schémas et un traducteur de schémas ont été développés et enfin, un outil d'interrogation spécifique a été également implémenté.

### **2.3 MECOSIG et CONGOO<sup>5</sup>**

MECOSIG (MEthode de CONception de SIG) est une méthode complète de conception de systèmes d'information géographique. Elle est basée à la fois sur des outils traditionnels (Diagramme de Flux de Données, organigrammes, enquêtes...) et des outils originaux (Matrices de conduite, pyramides, formalisme CONGOO...).

Pour la modélisation conceptuelle des données, MECOSIG propose le formalisme CONGOO (CONception Géographique Orientée Objet), celui-ci est un formalisme original basé sur OOA<sup>6</sup> et qui offre la possibilité de modéliser des objets géographiques (terme proposé par les auteurs pour distinguer les données ayant une

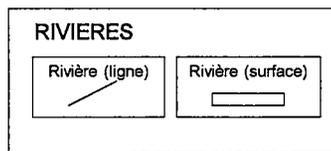
---

<sup>5</sup> (Pantazis D. & Donnay J.-P., 1996) (Dravie S. 1997.) (Brihaye M. 1999.) (Sheeren D., 1999).

<sup>6</sup> (Coad P. & Yourdon E., 1993a) (Coad P. & Yourdon E., 1993b).

représentation graphique référencée spatialement). Le terme objet prend un sens bien particulier dans CONGOO puisqu'il constitue une « fiche » vide, avec une structure prédéterminée. L'instance ou l'occurrence (termes synonymes dans CONGOO) constitue cette même « fiche » remplie avec les caractéristiques d'une instance. Une classe quant à elle est un ensemble de fiches vides et remplies. Un objet semble très lié à sa représentation spatiale, en effet deux occurrences d'un même objet possèdent toujours la même représentation ( cf. figure 3 ).

Les objets géo-graphiques simples de CONGOO sont au nombre de quatre : il y a les objets géo-graphiques de type point, de type ligne, de type polygone et de type surface. Au sein des objets de type ligne, on peut encore distinguer si la ligne est orientée ou non et fermée ou ouverte.



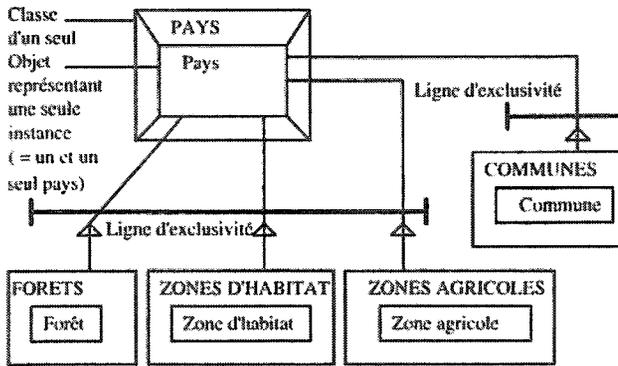
**Figure 3** Classe d'objets à mode d'implantation multiple dans CONGOO (d'après Pantazis D. & Donnay J.-P., 1996).

CONGOO définit également des objets géo-graphiques composés lorsqu'un objet est représenté par plusieurs éléments de même géométrie. Par contre, s'il s'agit d'objets formés par l'agrégation de plusieurs géométries, ils portent le nom d'objets géo-graphiques complexes.

Les couches et sous-couches sont des éléments de regroupement d'objets sur base des relations qu'ils entretiennent, et notamment des relations topologiques. Il ne s'agit donc pas nécessairement d'éléments sémantiquement homogènes.

Trois types de relations sont définies dans CONGOO entre objets géo-graphiques ou non : les relations de structure, les relations topologiques et les relations logiques.

Parmi les relations de structure, on retrouve la relation généralisation-spécialisation et la relation composé-composant. La première, dans CONGOO, ne s'applique qu'entre classes et les propriétés qui sont transmises par héritage doivent être spécifiées en apposant un (H) à leur côté. La relation composé-composant quant à elle est une relation de composition classique, mais elle ne permet pas de distinguer ce que l'on nomme parfois l'agrégation indépendante et l'agrégation composite (Gardarin G., 1999). La relation composé-composant de CONGOO peut être contrainte par une ligne d'exclusivité qui indique de manière exclusive l'ensemble des composants. La figure 4 donne un exemple de l'utilisation de la ligne d'exclusivité, un pays est composé d'une part de communes et d'autre part d'un ensemble de forêts, de zones d'habitat et de zones agricoles.



**Figure 4** Le concept de ligne d'exclusivité dans CONGOO (d'après Pantazis D. & Donnay J.-P., 1996)

En définissant les deux relations topologiques de base de superposition et de voisinage, CONGOO permet de lever toute ambiguïté sur la situation topologique de deux ou plusieurs objets, du moins en ce qui concerne les représentations bidimensionnelles. Néanmoins, l'introduction de ces relations dans le modèle n'est pas chose aisée.

Cette possibilité de définir les relations topologiques dans CONGOO découle d'abord de sa philosophie qui veut qu'à partir du moment où un même élément du monde réel peut être représenté de deux ou plusieurs manières différentes dans une application, il ne peut constituer un seul et même objet.

En ce qui concerne la temporalité, CONGOO n'était à la base pas capable de gérer les concepts temporels mais une extension a été développée dans (Sheeren D., 1999).

Enfin, aucun AGL n'est disponible pour la modélisation en CONGOO, même si plusieurs recherches sur son intégration dans un tel outil ont été entreprises (Dravie S. 1997.) (Brihaye M. 1999.).

## 2.4 POLLEN<sup>7</sup>

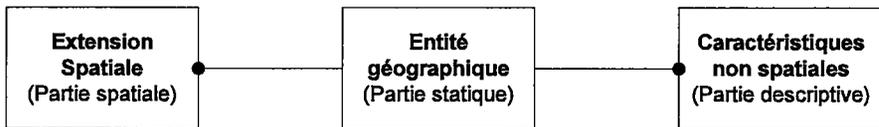
POLLEN (Procédure d'Observation et de Lecture de L'ENVironnement) est une méthode complète de conception de Système d'Information sur l'Environnement (SIE). Elle est basée sur la méthode OMT (Rumbaugh J. *et al*, 1995) et s'articule autour de trois modèles : le modèle objet, le modèle fonctionnel et le modèle du système. Chacun de ces modèles se compose d'un diagramme et d'un dictionnaire. L'ensemble de la conception du SIE est envisagé depuis la pré-analyse jusqu'à la maintenance dans un processus pouvant être symbolisé par une spirale et affinant à chaque étape chacun des trois modèles.

<sup>7</sup> (Gayte O. & Libourel T., 1997).

On retrouve dans le diagramme objet l'ensemble des outils offerts par la plupart des formalismes objet : la généralisation avec héritage, l'agrégation... Il offre en outre de nouveaux outils de modélisation tels la notion de classe d'objet opaque qui sont des classes d'objets dont la structure interne n'est pas connue mais qui rendent des services qui sont identifiés et celle de désagrégation pour représenter des objets spatiaux nés de l'intersection d'autres objets spatiaux.

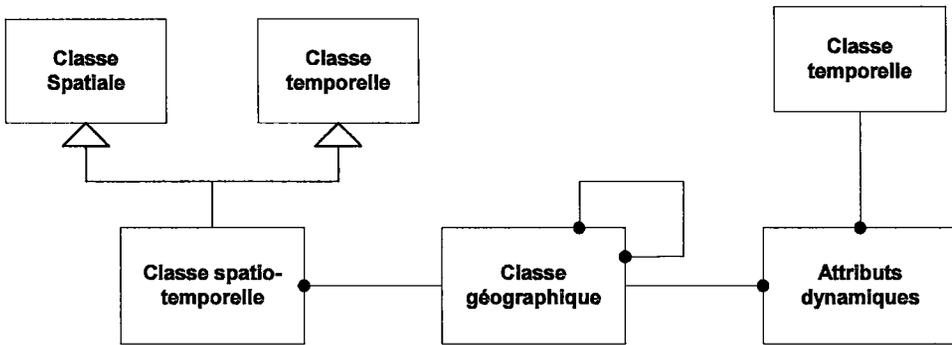
Les classes opaques spatiales fondamentales sont le point, la ligne et l'aire. Dans POLLEN, l'entité géographique est un tout constitué d'une partie statique (identification), de la ou des caractéristiques spatiales et de la ou des caractéristiques descriptives (thématiques). La temporalité est appréhendée à partir des deux classes temporelles fondamentales : Instant et Intervalle.

La figure 5 présente la façon générale une entité géographique. Lorsqu'une entité géographique évolue, cette évolution peut affecter aussi bien ses caractéristiques spatiales que non spatiale voir les deux à la fois.



**Figure 5** Structure générale des entités géographiques  
(d'après Gayte O. & Libourel T., 1997).

Les auteurs proposent à partir des travaux de (Cheylan J.-P. *et al.*, 1994) de définir huit types d'entités géographiques « dynamiques » selon le type d'évolution subie (évolution de la partie identification, de la partie spatiale, de la partie thématique) : entité géographique non dynamique, entité géographique fixe, entité géographique modifiable (avec partie thématique statique), entité géographique modifiable (avec partie thématique dynamique), entité géographique déformable (avec partie thématique statique), entité géographique déformable (avec partie thématique dynamique), entité géographique transformable (avec partie thématique statique), entité géographique transformable (avec partie thématique dynamique). La figure 6 présente le cas d'une entité géographique déformable avec partie thématique dynamique.



**Figure 6** Entité géographique déformable avec partie thématique dynamique (d'après Gayte O. & Libourel T., 1997).

Le modèle fonctionnel définit les services rendus par le système. Deux types de diagrammes sont proposés, le diagramme à flots de données (DFD) et les actigrammes de la méthode SADT (Jaulent P., 1989).

Enfin le modèle du système permet de modéliser l'architecture du système à concevoir ainsi que ses relations avec les ressources humaines et matérielles nécessaires à son bon fonctionnement.

La méthode POLLEN n'est actuellement pas soutenue par un atelier de génie logiciel.

### 3 Comparaison des méthodes présentées

#### 3.1 La grille de lecture

Pour nous permettre de comparer efficacement les différentes méthodes précitées, nous allons introduire une grille de lecture basée sur une série de critères qui nous permettront de mettre en évidence les avantages et lacunes de chacune des méthodes.

Le premier critère portera sur les types spatiaux et sur la possibilité de se référer aux types définis par les organes de standardisation comme l'OGC ou l'ISO (OpenGIS, 2003) (ISO/TC 211, 2003).

Ensuite, nous envisagerons les types temporels offerts par les différentes méthodes. De nouveau, nous verrons si elles peuvent renvoyer vers certains types standard.

Après avoir analysé les types de données tant spatiaux que temporels, nous nous attacherons à comparer la façon dont les spécificités des données géographiques sont prises en compte au niveau des associations. Bien entendu nous verrons si

les formalismes offrent des facilités pour définir les relations topologiques, mais nous analyserons aussi si des outils sont proposés pour modéliser la dynamique spatio-temporelle.

L'expressivité des modèles sera aussi envisagée. En effet, vu le nombre d'outils proposés par les méthodes pour « coller » au mieux à la réalité terrain des données géographiques, la surcharge du modèle peut empêcher la bonne compréhension de celui-ci.

Enfin, nous regarderons si les méthodes présentées sont soutenues par des outils de type atelier de génie logiciel et quelles sont les fonctionnalités offertes par ceux-ci.

## **3.2 La comparaison**

### **3.2.1 Les types spatiaux de données**

Un premier constat est la présence dans chacune des méthodes proposées des types simples, point, ligne et polygone. Il s'agit déjà d'une intéressante « standardisation » car en effet, avec ces simples types, probablement près de 80% des situations rencontrées peuvent être modélisées.

Après, les différences surviennent, nous pourrions même parler d'opposition. Perceptory offre par exemple, en plus de la géométrie simple, des géométries multiples, alternatives et complexes tandis que CONGOO se limite aux objets composés et complexes. MADS propose quant à lui une structure de généralisation extensible fort proche des standards de l'OGC et dans POLLEN, c'est dans les relations qu'entretient l'objet avec sa représentation spatiale qu'il faut rechercher la présence d'une géométrie autre que celles de base. Il semble que le but poursuivi dans les différentes méthodes n'ait pas été le même car si dans Perceptory, on a voulu proposer le plus d'éléments possibles pour couvrir les exigences des utilisateurs, dans CONGOO, c'est avant tout la volonté de définir de manière rigoureuse les relations et contraintes topologiques qui semble avoir dicté le choix des types spatiaux proposés. L'utilisateur de MADS par contre, n'est pas limité puisqu'on lui offre la possibilité de définir ses propres types si ceux proposés ne lui conviennent pas. Évidemment, aucune règle stricte sur l'utilisation des relations topologiques n'a dès lors pu être édictée. Dans POLLEN, la liste des types n'est pas vraiment limitée puisque l'utilisation des associations et des contraintes entre l'objet géographique et l'objet « représentation spatiale » permet de définir les types désirés.

Au niveau de l'intégration avec les standards, MADS bénéficie d'un net avantage par rapport aux autres puisque la correspondance est évidente. Perceptory se veut également compatible avec la norme ISO sur les types spatiaux de données (Brodeur J. *et al.*, 2000), néanmoins la correspondance n'est pas tout à fait évidente. Aucun travail d'intégration avec les standards n'a été entrepris pour POLLEN et CONGOO qui existaient avant les travaux de standardisation menés par l'ISO et dont les développements semblent en suspens.

### **3.2.2 Les types temporels de données**

Au niveau des types temporels, contrairement aux types spatiaux, une certaine universalité semble prévaloir à l'introduction des concepts dans le diagramme d'objets. Le temps peut être perçu de manière discrète ou continue, et après avoir préalablement établi une résolution temporelle, c'est-à-dire le plus petit élément temporel discernable dans l'application, l'existence ou l'évolution de tout objet pourront être caractérisées soit par un instant (0D), soit par un intervalle de temps (1D).

C'est cette façon d'aborder le temps qui a été retenue dans chacune des méthodes étudiées.

### **3.2.3 Les relations topologiques**

De ce point de vue, des différences flagrantes existent entre les modèles. Ni dans POLLEN, ni dans Perceptory, une réflexion n'a été menée sur les relations topologiques entre objets géographiques. Bien entendu, rien n'empêche le concepteur de faire apparaître ces relations dans le modèle sous la forme d'associations classiques, néanmoins, aucune contrainte sur la manière de les utiliser n'est définie. Dans MADS, ce qui différencie les relations topologiques des associations classiques, ce sont quelques pictogrammes à apposer sur l'association qui revêt un caractère topologique ; de nouveau, l'utilisation de telles relations n'est pas contrainte et rien ne permet de déterminer de manière plus ou moins automatique si des erreurs ont été commises.

La seule véritable réflexion sur la définition des relations topologiques dans un modèle de données a été menée par Pantazis dans le formalisme CONGOO. Dans celui-ci, les relations topologiques ne sont pas semblables aux associations classiques, elles en sont indépendantes. En outre, des règles ont été établies pour empêcher les concepteurs de définir des relations incompatibles ou impossibles.

### **3.2.4 La dynamique spatio-temporelle**

Ici de nouveau, des disparités surviennent. Perceptory et CONGOO restent très pauvres à ce niveau même si les relations topologiques temporelles ont été introduites pour CONGOO dans (Sheeren D., 1999). Dans POLLEN, une réflexion sur la dynamique des entités géographiques a été entreprise, celle-ci était basée sur (Cheylan J.-P. *et al.*, 1994). Néanmoins cette discussion n'a pas été étendue aux associations temporelles que sont les générations d'entités, les transitions entre entités géographiques ou les relations topologiques temporelles. Une telle analyse a par contre été menée dans MADS qui propose une série d'associations spécifiques pour gérer ce type de problème.

### **3.2.5 L'expressivité du modèle**

L'expressivité d'un modèle est une qualité assez compliquée à juger, en effet, selon le niveau de connaissance du « lecteur », un modèle pourra exprimer plus

ou moins de chose. Néanmoins, pour qu'un modèle puisse être considéré comme expressif, il doit bénéficier de concepts aisément compréhensibles au premier regard tels des pictogrammes qui expriment clairement un concept comme la spatialité ou la temporalité. En outre, la surcharge du modèle par un grand nombre d'éléments en décroît également énormément le pouvoir d'expression.

Dans les modèles que nous avons envisagés, l'introduction des relations topologiques dans CONGOO a souvent amené à juger le modèle beaucoup trop complexe. Il est vrai que sans enlever aucun mérite à la réflexion menée sur les relations topologiques, leur introduction dans CONGOO reste quelque chose d'extrêmement compliqué à saisir pour les non initiés. Dans POLLEN c'est le nombre important de liens engendrés par la manière de représenter les entités géographiques qui amène à une surcharge du modèle. L'utilisation des pictogrammes est de ce fait très intéressante, car elle permet d'exprimer par un simple petit élément des caractéristiques importantes des entités. MADS souffre également d'une certaine surcharge du modèle, mais ici c'est plutôt dû au nombre important d'associations qu'il propose d'y introduire (associations classiques, associations temporelles, relations topologiques...). Enfin, les modèles réalisés avec Perceptory sont très clairs et très expressifs, mais c'est ici plutôt le manque de richesse des concepts qui pose parfois problème.

### **3.2.6 Les Ateliers de Génie Logiciel (AGL)**

Contrairement au point précédent, ici la comparaison est aisée. Il y a d'une part les méthodes qui sont soutenues par un outil de type AGL comme Perceptory et MADS et, d'autre part, celles non instrumentées comme CONGOO et POLLEN.

Les fonctionnalités offertes par ces AGL sont assez standardisées :

- la possibilité de créer son modèle dans un diagramme en glissant des éléments graphiques prédéfinis,
- un dictionnaire cataloguant les concepts du modèle graphique,
- des générateurs de rapport et de codes vers différentes plateformes.

La diffusion des méthodes supportées par un AGL est nettement supérieure aux autres car ces outils permettent de réduire énormément le temps imparti à la modélisation d'applications.

### **3.2.7 Conclusion de la comparaison**

Pour conclure cette comparaison, nous proposons un tableau synthétique reprenant les grandes idées des points précédents (cf. Table 1).

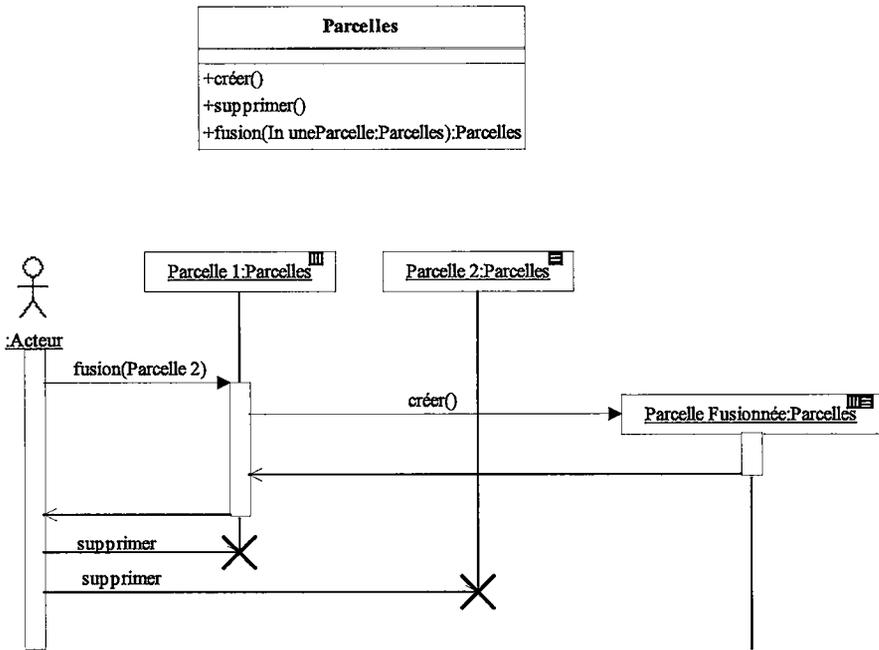
**Table 1** Tableau récapitulatif de la comparaison entre Perceptory, MADS, CONGOO et POLLEN.

	Perceptory	MADS	CONGOO	POLLEN
<u>Les types spatiaux de données</u>	++	++++	++	++
<u>Les types temporels de données</u>	++++	++++	++++	++++
<u>Les relations topologiques</u>		++	++++	
<u>La dynamique spatio-temporelle</u>	+	++++	++	++
<u>L'expressivité du modèle</u>	+++	++	+	++
<u>Les Ateliers de Génie Logiciel (AGL)</u>	++++	++++		

#### 4 Modélisation de la dynamique des données spatio-temporelles

Comme nous l'avons mis en évidence plus haut, l'introduction dans le diagramme de classes d'associations temporelles pour modéliser les dynamiques des entités géographiques telles qu'elles apparaissent dans MADS peut conduire à surcharger le modèle. De plus, le diagramme de classes est un diagramme qui, par définition, se veut statique. Il semble donc inadapté d'y figurer des informations sur la dynamique des objets géographiques.

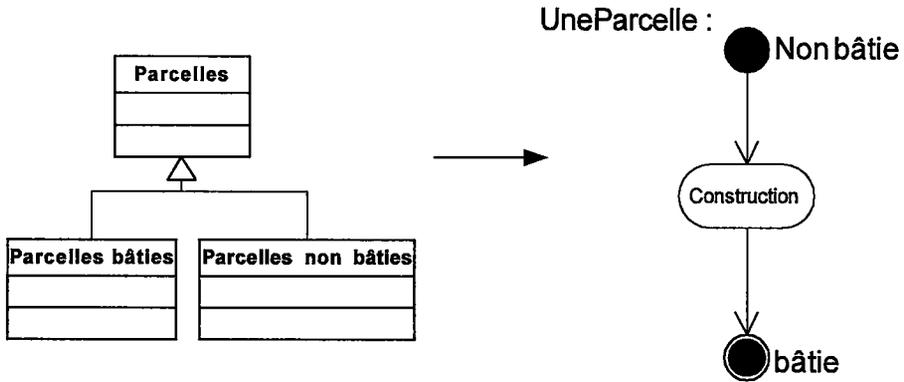
Dans la série de diagrammes qu'il propose, le formalisme UML en propose quatre qualifiés de comportementaux, pour modéliser les aspects dynamiques des systèmes. Il n'est pas impensable d'imaginer que ceux-ci, moyennant une éventuelle adaptation, pourrait aider à la modélisation de la dynamique des entités géographiques. Partant de cette réflexion, nous proposons ci-après quelques pistes quant à l'utilisation de ces diagrammes comportementaux pour la modélisation de la dynamique spatio-temporelle des SIG.



**Figure 7** La génération d'entités géographiques.

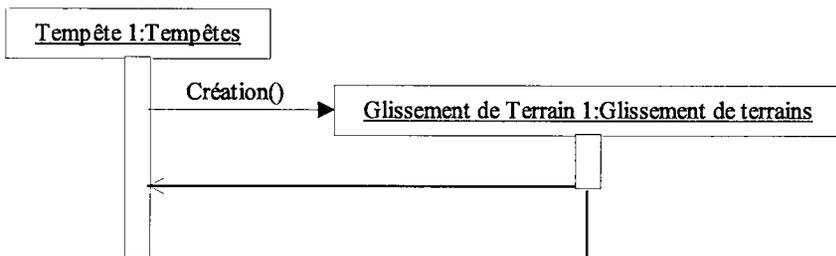
La figure 7 ci-dessus propose par exemple de modéliser la génération d'entités comme une fonction d'une classe à laquelle est associé un diagramme de séquence qui la documente. L'ajout de petit pictogramme dans les objets du diagramme de séquence pourrait expliciter les répercussions spatiales de l'opération.

La figure 8 présente quant à elle le cas d'une migration d'un objet d'une classe vers une autre issue de la même généralisation. La sémantique du diagramme d'états-transitions est quelque peu modifiée, puisqu'on modélise le changement de classes d'une instance plutôt que son changement d'état au sein d'une même classe. Les états initial et final ont été étiquetés avec les spécialisations (ici, bâties et non bâties) issues de l'association de généralisation-spécialisation du diagramme de classes. L'action construction fait migrer l'objet de la classe parcelles non bâties vers la classe parcelles bâtie.



**Figure 8** La transition entre classes issues d'une même généralisation modélisée grâce à la modification sémantique du diagramme d'états.

Enfin dans la figure 9 ci-dessous, nous proposons de gérer les relations topologiques temporelles (précède, succède...) à partir d'un diagramme de séquence.



**Figure 9** Topologie temporelle.

## 5 Conclusions

Au terme de cette comparaison, on peut dire que la méthode de conception parfaite n'existe pas, chacune possède des avantages et des inconvénients. Néanmoins, une série d'éléments peuvent être mis en évidence à la lueur de cette analyse.

Tout d'abord, la nécessité de tenir compte dans ses travaux de ce qui se fait ailleurs, et notamment des standards. En effet, les développeurs de logiciels SIG

participent activement à tous ces efforts de standardisation et la traduction du monde conceptuel au monde logique est une étape particulièrement importante dans la conception des SIRS. La mise en place de standard commun entre ces deux mondes ne fera qu'accroître l'efficacité des projets de conception de SIRS.

Ensuite, nous avons constaté que tout n'est pas nécessairement bon à ajouter dans un diagramme de classes, certains autres diagrammes peuvent être employés, certains existent déjà (séquences, activités...) d'autres pourraient être créés (topologie).

Enfin, on notera la prépondérance de l'outil. Sans atelier de génie logiciel pour la soutenir, une méthode de conception perd beaucoup de son rayonnement auprès des acteurs du domaine de l'information géographique.

Ces différentes constatations vont servir de base à nos futures recherches pour élaborer une méthode de conception de SIRS basée sur UML et axée sur une intégration des standards en vigueur.

## Bibliographie

- BEDARD Y. 1999. Visual modelling of spatial databases : towards spatial PVL and UML, *Géomatica*, 53(2), pp.169-186.
- BEDARD Y. et al. 2003. *Perceptory 2003, Un outil de modélisation conceptuelle de bases de données spatiales.* (<http://sirs.scg.ulaval.ca/perceptory/>).
- BRIHAYE M. 1999. *Contribution au développement d'un Outil CASE pour le soutien du formalisme CONGOO*, travail de fin d'étude, Université de Liège, Faculté des Sciences appliquées, inédit
- BRODEUR J., BEDARD Y. & PROULX M.-J. 2000. Modelling geospatial application databases using UML-based repositories aligned with international standards in geomatics, *ACM/GIS 2000*, november 10-11, Washington DC, USA
- CHEYLAN J.-P., LARDON S., MATHIAN H. & SANDERS L. 1994. Les problématiques liées au temps dans les SIG, *Revue internationale de Géomatique*, 4(3-4), pp. 287-305.
- CLARAMUNT C., COULOMBRE S. & LIBOUREL T. 1997. Autour des méthodes orientées objet pour la conception des SIG, *Revue Internationale de Géomatique*, 7(3-4), pp. 233-257.
- COAD P. & YOURDON E. 1993a. *Analyse orientée objets*, traduction française de Abdelkader Boughlam, Masson, Paris, Prentice Hall, London.
- COAD P. & YOURDON E. 1993b. *Conception orientée objet*, traduction de l'anglais par A.B. Fontaine, Masson, Paris, Prentice Hall, London.
- DRAVIE S. 1997. *Contribution au développement d'un ensemble d'Outils CASE pour le formalisme de conception géographique Orienté Objet (CONGOO)*, travail de fin d'étude, Université de Liège, Faculté des Sciences appliquées, inédit
- GARDARIN G. 1999. *Bases de données : objet et relationnel*. Paris : Eyrolles, 824 p.
- GAYTE O. & LIBOUREL T. 1997. *POLLEN : Méthode de conception des systèmes d'information sur l'environnement*. Rapport final, Institut des Aménagements Régionaux et de l'Environnement (IARE) et Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Micro-électronique (LIRMM), Montpellier, inédit
- ISO/TC211. 2003. Geographic Information / Geomatics. (<http://www.isotc211.or/>)

- JAULENT P. 1989. *SADT : Un langage pour communiquer*. Paris : Eyrolles, 336 p.
- MURMUR. 2003. *MurMur : Multi-representation and multiple resolution in geographic databases*, In the Frame of the IST Programme of the European Community. Site Internet (<http://www.mur-mur.org>).
- OPENGIS CONSORTIUM, INC. (OGC). 2003. (<http://www.openGIS.corg>)
- PARENT C. *et al.* 1998a. *MADS, modèle conceptuel spatio-temporel*. Site de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne - Laboratoire de Bases de Données (<http://lbdwww.epfl.ch>).
- PARENT C. *et al.* 1998b. *MADS ou l'information spatio-temporelle à portée de ses utilisateurs*. Site de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne - Laboratoire de Bases de Données (<http://lbdwww.epfl.ch>).
- PARENT C. *et al.* 1998c. *Modeling Spatial Data in the MADS Conceptual Model*. Site de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne - Laboratoire de Bases de Données (<http://lbdwww.epfl.ch>).
- PARENT C., SPACCAPIETRA S. & ZIMANYI E. 1999. *Spatio-Temporal Conceptual Models: Data Structures + Space + Time*. 7th ACM Symposium on Advances in GIS, Kansas City, Kansas, November 5-6, 1999.
- PARENT C. & SPACCAPIETRA S. 2000. *Supporting Multiple Representations in Spatio-Temporal databases*. 6th EC-GI & GIS Workshop, Lyon, France, June 28-30, 2000.
- RUMBAUGH J. *et al.*, 1995. *OMT. Modélisation et Conception orientées objet*. Prentice Hall – Masson 1995. pp 1-515.
- SHEEREN D. 1999. *La conception de bases de données spatio-temporelles, problématiques et solutions dans le cadre du formalisme CONGOO*, mémoire de fin d'études en sciences géographiques option géométrie, Université de Liège, inédit, 113 p.



# La modélisation de données spatio-temporelles avec les outils du projet européen MurMur Une aide à la conception d'un SIRS

## *Spatio-temporal data modelling Using MurMur European project tools An help to design a spatial reference information system*

Roland Burnet

Cemagref – UR Etna - 2, rue de la Papeterie  
BP 76 - 38 402 St Martin d'Hères  
Tél. : 04 76 76 27 19 – Fax : 04 76 51 38 03  
roland.burnet@cemagref.fr

**Résumé :** La conception d'un SIRS<sup>1</sup>, passe nécessairement par une phase de modélisation des données. Cette étape doit permettre de structurer les données par un échange entre les utilisateurs finaux et les concepteurs du SIRS. Cette opération, relativement classique lorsque les données sont textuelles, est encore au stade de la recherche dès que des données plus complexes sont affectées d'une composante spatiale, qui plus est, d'une composante temporelle. La modélisation de données spatiales et temporelles pose des problèmes complexes. Pour résoudre ces problèmes le projet européen MurMur du 5<sup>ème</sup> PCRD, qui avait pour objet la multi-résolution et la multi-représentation de données spatio-temporelles, a développé des outils d'aide à la modélisation et à la requête de données spatio-temporelles. Ces outils, encore au stade de prototypes, n'en constituent pas moins une aide pour la modélisation de données qui peuvent constituer un SIRS, surtout si celui-ci est destiné à des utilisateurs différents et prend en compte différentes échelles. MurMur a en effet été conçu pour définir des points de vue qui correspondent à une présentation et un niveau de détail des données adaptés à un utilisateur particulier. Au terme du projet, les outils comportent des lacunes qui rendent difficile une utilisation opérationnelle, mais offrent la possibilité de servir de support à des formations pour la structuration des données d'utilisateurs ou de concepteurs de SIRS en raison de la richesse des concepts qui ont été abordés au cours de leur réalisation.

**Abstract:** Data modelling step is necessary to design an information system using spatial data. This step structures the data by an exchange between the end-users and the information system designers. This operation, rather traditional when the data are textual, is still in a research stage as soon as more complex data are affected of a spatial component, which more is, of a

---

<sup>1</sup> Système d'Information à Référence Spatiale.

temporal component. There is a lot of complex problems to realize a data modelling using spatial and temporal components. The European project MurMur of the 5<sup>th</sup> PCRD, which coped with multi-resolution and multi-representation of spatio-temporal data, developed tools to help with spatio-temporal data modelling and requests on these data. These tools, still at the stage of prototypes, are even so an help for data modelling to draw up an information system, especially if this one is supposed to have sets of themes which relate to various scales and intended to different users. MurMur was indeed conceived to define points of view which correspond to a presentation and a data granularity adapted to a particular user. At the end of the project, the tools are not yet ready for operational use, but, on account of the richness of the concepts which were approached during their realization, they may be used as training supports for the structuring users data or for information system using spatial and temporal data designers.

## 1 Introduction

La conception d'un SIRS doit être réalisée en collaboration étroite entre les utilisateurs finaux d'une part et les concepteurs du SIRS d'autre part. Cette collaboration nécessite de parler un langage commun et de pouvoir manipuler des concepts compréhensibles par les deux parties et passe nécessairement par une phase de modélisation des données. Cette étape permet de structurer les données et leurs relations par un échange entre les utilisateurs finaux et les concepteurs du SIRS. Cette opération est facilitée et rendue courante, avec l'utilisation du langage UML (G. Booch *et al*, 1999), lorsque les données sont textuelles, mais est beaucoup plus délicate dès que les données ont des composantes spatiales et temporelles. On est alors dans un domaine qui est encore au stade de la recherche, et aucune méthode aboutie et opérationnelle n'est encore disponible. En s'appuyant sur des exemples liés à la gestion du risque naturel avalanche, cet article met l'accent sur les problèmes de la modélisation de données spatio-temporelles, et les solutions émergentes qui peuvent y être apportées en développant essentiellement les résultats du projet Européen MurMur<sup>2</sup> (MurMur Consortium 2000).

## 2 État de l'art sur la modélisation de données spatio-temporelles

Plusieurs approches<sup>3</sup> pour réaliser une modélisation de ce type de données ont été avancées, mais à ce jour, on peut ne retenir que deux d'entre-elles pour leur maturité et leur implémentation informatique.

---

<sup>2</sup> Le projet MurMur, avait pour objet la multi-résolution et la multi-représentation de données spatio-temporelles. Il a été mené durant les années 2000 à 2002.

<sup>3</sup> Perceptory, MADS, CONGOO, Geo-ER, GeoOOA, POLLEN...

## 2.1 Perceptory (Y. Bédard, 1999)

Sous cette dénomination, existe un logiciel d'AGL<sup>4</sup>, implémentant le formalisme UML, enrichi d'un plug-in pour gérer les spécifications spatio-temporelles des données (Spatial Plug-in for Visual Language). Pour chaque entité, il est possible de définir une ou plusieurs géométries, et des variations temporelles. Développé pour la modélisation de la réalité dans la perspective de mettre en place des bases de données spatiales, ce CASE Tools (*Computer-Assisted Software Engineering* ou AGL), c'est-à-dire un environnement de conception de systèmes, permet d'intégrer la géométrie et l'évolution temporelle des objets dans le modèle conceptuel de données. Ainsi, en utilisant un langage visuel tel qu'UML associé à des pictogrammes représentant la géométrie, le modèle trouve une lisibilité grandement améliorée, et sa compréhension facilitée. Cet UML "spatial" permet de formaliser notre modèle de l'espace et de générer des scripts pour générer automatiquement la structuration des données sur un SGBD commercial.

## 2.2 Le formalisme MADS utilisé dans le projet MurMur

Déjà conçu avant le démarrage du projet MurMur par les trois laboratoires de recherche impliqués dans le projet<sup>5</sup>, ce formalisme a été enrichi pour permettre de répondre au cahier des charges du projet dédié à la multi-représentation et la multi-résolution de données spatio-temporelles (C. Vangenot *et al*, 2000). MADS utilise une structure "entité-relation" qui a été étendue avec les notions suivantes :

- Type d'entité
- Type de relation
- Agrégation
- Identité pour les entités et les relations
- Hiérarchie de généralisation/spécialisation
- Attribut
- Méthode

Ce formalisme, basé sur un modèle conceptuel utilisant trois dimensions structure-espace-temps orthogonales, utilise, tout comme Perceptory, des pictogrammes pour représenter les caractéristiques spatiales et temporelles d'une entité, d'un attribut ou d'une relation entre deux entités. Pour faciliter les dialogues avec les utilisateurs finaux, un schéma des données est réalisé avec un outil de modélisation qui manipule les pictogrammes au sein d'une interface graphique. Le schéma est traduit automatiquement en langage SQL vers le SIG ou SGBD cible. Dans le cadre du projet MurMur, c'est le SGBD Oracle avec sa composante Spatial qui a été utilisé. Un outil de génération des requêtes a été développé, il utilise également une interface graphique où le schéma qui a servi à structurer les

---

<sup>4</sup> Atelier de Génie Logiciel.

<sup>5</sup> Le laboratoire d'informatique de l'Université Libre de Bruxelles, le laboratoire de base de données de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, l'institut d'informatique et organisation de l'Université de Lausanne.

données est importé pour choisir les objets sur lesquels la requête doit porter. Les prédicats de sélection peuvent impliquer des attributs textuels comme des relations spatiales, la visualisation étant assurée par un outil spécifique. Par convention dans la représentation d'une entité, d'une relation ou d'un attribut, les pictogrammes spatiaux sont placés à droite et les pictogrammes temporels à gauche.

### **3 Problèmes liés à la représentation spatiale et temporelle**

Une modélisation porte principalement sur des objets du monde réel. Pour réaliser la modélisation, il est indispensable de passer par un stade d'abstraction car il est impossible de représenter l'objet du monde réel dans toutes ses composantes. Prenons l'exemple d'une parcelle cadastrale qui dans le monde réel est matérialisée par des bornes reliées entre elles par des limites réelles ou virtuelles. Cette parcelle cadastrale est située sur un terrain dont l'altitude, le sol et le sous-sol avec leurs composantes pédologiques, géologiques, hydrographiques dépendent de l'emplacement exact considéré et elle peut accueillir un ou plusieurs types d'occupation du sol et appartenir ou avoir appartenu à plusieurs propriétaires. Il est alors impossible de prendre en compte toutes ces particularités dans le cadre d'une modélisation. Il faut donc réaliser une abstraction qui tient compte de l'utilisation qui va être faite de la représentation finale. Dans le cas d'une parcelle cadastrale, le but final est de déterminer l'imposition en fonction de la "surface" et de l'occupation du sol. L'abstraction réalisée consiste alors à représenter géométriquement la parcelle en utilisant une projection cartographique donnée, la base de l'imposition, étant déterminée sur la résultante surfacique de la parcelle, l'occupation du sol étant modélisée avec un attribut de la parcelle, mais qui peut être complétée avec une autre représentation cartographique (les bâtiments par exemple). Par cette modélisation, beaucoup de caractéristiques qui peuvent être utiles pour d'autres applications, ont été délaissées, c'est le cas de l'altitude ou de la partie temporelle.

#### **3.1 Problèmes liés à la spatialité**

La représentation spatiale réalise donc des abstractions qui portent sur la géométrie et le type d'objet du monde réel. La géométrie peut être considérée comme surfacique, linéaire ou ponctuelle, le type d'objet peut être très varié. Ceci peut soulever des problèmes car un objet du monde réel peut avoir, dans les limites de l'abstraction définie, plusieurs types de géométrie. C'est le cas d'une rivière ou d'un tracé d'un parcours d'avalanche qui peuvent mélanger surfacique et linéaire orienté. Pour le type d'objet, supposons que les types château, bâtiment et curiosité aient été définis dans l'abstraction, la curiosité ayant une représentation géographique ponctuelle et le bâtiment surfacique. Il est certain qu'un château est un bâtiment, mais il est possible que ce soit aussi une curiosité, il faudra donc gérer un double héritage qui implique la gestion de représentations spatiales multiples pour le même objet. De cette façon, un objet réel qui se voit attribuer le

type château, pourra être représenté de deux façons différentes, soit ponctuellement comme une curiosité, soit par un polygone comme un bâtiment. De plus, la mise en place de base de données géographiques, et particulièrement celles concernant les risques naturels, se heurte très rapidement aux difficultés de représentations des données à des échelles extrêmement différentes. En effet, le système doit gérer des données géographiques issues de sources très variées ayant des qualités et des représentations différentes. Divers acteurs s'intéressent à un même phénomène du monde réel regardé selon différents points de vue. L'information géographique est donc collectée, saisie et analysée à différentes échelles de résolution et d'abstraction de l'espace, de sorte que la perception des processus géographiques dépend de ces échelles d'observation (L. Raynal *et al*, 1996). Le formalisme de modélisation, qui n'est pas censé être dédié à une application précise, doit donc être le plus complet possible pour répondre aux besoins de chaque application.

## **3.2 Problèmes liés à la temporalité**

La représentation du temporel dans une modélisation est moins "innovante" que celle du spatial dans la mesure où une date pouvait être renseignée dans un SGBD. Cependant la gestion du temps ne porte pas seulement sur des dates mais sur un ensemble de dates, des périodes ou un ensemble de périodes. Par ailleurs le cycle de vie d'un objet du monde réel peut être intéressant à suivre, lorsqu'il est créé, suspendu, réactivé et finalement abandonné ou détruit. Il est alors important de pouvoir indiquer dans la modélisation le suivi de ce cycle de vie. Le temporel soulève également un autre problème dans les requêtes qui peuvent être soumises. En effet, il peut être plus intéressant, pour une application donnée, de spécifier une version plutôt qu'une date. Pour reprendre l'exemple du cadastre, il est possible de spécifier que la géométrie, le type d'occupation du sol, le propriétaire d'une parcelle change à un instant donné. Avec le résultat d'une requête donnée, il peut être intéressant de connaître la version précédente, suivante, première ou dernière de l'état de la parcelle. Il est même possible de compliquer encore la gestion des versions, en spécifiant sur quel attribut doit porter la version, le propriétaire ou la géométrie pour prendre l'exemple du cadastre.

## **4 Représentation du spatial et du temporel avec MADS**

### **4.1 Représentation du spatial**

#### **4.1.1 Spatialité des entités**

Dans le formalisme MADS, les représentations spatiales suivantes sont prises en compte, chacune étant affectée de son pictogramme :

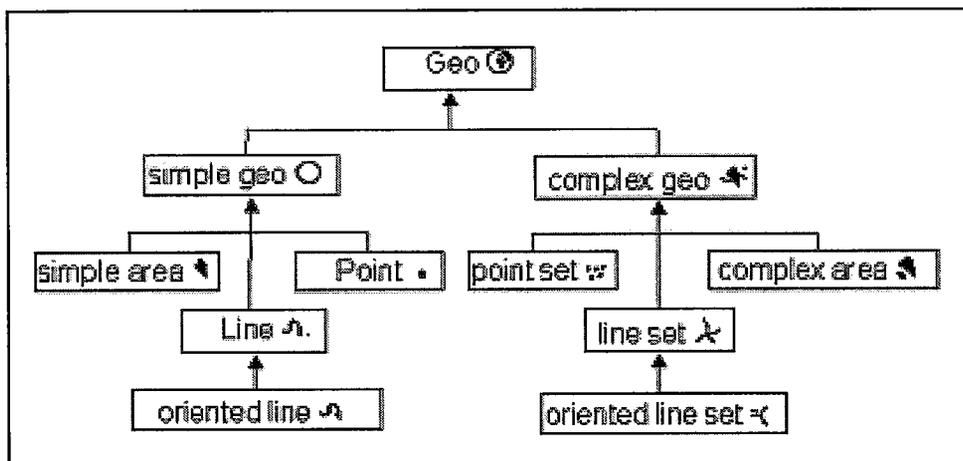


Figure 1 Les différents types de représentation spatiale de MADS.

Chaque type défini hérite des propriétés du type père par la relation de spécialisation. Dans le cas où une entité serait affectée d'un type donné, il est possible de définir une autre entité, sous type de la première, qui peut soit raffiner l'héritage de la géométrie, soit la redéfinir. Par exemple un site de phénomènes naturels peut être défini comme ayant une géométrie de type "simple geo", et un site d'avalanche avec un type surfacique, une rivière avec un type ligne orientée, et un effondrement avec un type ponctuel.

La spatialité peut avoir une caractéristique temporelle. Il est ainsi possible de définir une spatialité qui varie dans le temps.

#### 4.1.2 Spatialité des relations

Dans les relations, la spatialité peut être traitée comme une particularité de la relation au même titre qu'une entité ou comme existant en fonction des spatialités des deux entités reliées. Pour illustrer le cas de la spatialité affectée à une relation on peut imaginer une entité forêt qui est liée à une entité représentant une attaque de parasite. La relation peut alors, par sa spatialité pouvant varier dans le temps, définir la zone de la forêt touchée par cette attaque. Pour illustrer le cas de l'existence d'une relation en fonction de la spatialité des entités qu'elle relie, on prendra le même exemple mais en attribuant une spatialité à l'entité de l'attaque de parasite. Ainsi on pourra dire que la relation existe si les géométries des entités ont des parties communes. Il est ainsi possible d'avoir les relations suivantes :

**Table 1** Les différents types de spatialités propres aux relations.

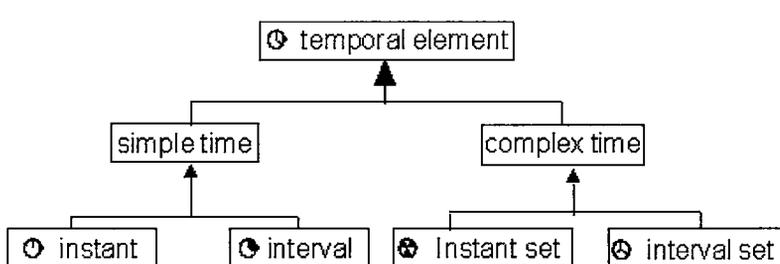
Type spatial	Pictogramme	Définition
disjunction	0°	Les entités liées ont des géométries disjointes
adjacency	∞	Les entités liées ont des géométries adjacentes (pas de surface commune)
crossing		Les entités liées ont une partie commune dont la dimension est inférieure à la plus grande dimension des deux entités
overlapping		Les entités liées ont une partie commune dont la dimension est égale à la dimension des deux entités
inclusion		La géométrie d'une entité est totalement incluse dans la géométrie de l'autre entité
equality		Les géométries des deux entités liées sont égales

### 4.1.3 Spatialité des attributs

Les attributs d'une entité ou d'une relation peuvent également avoir une spatialité. Par exemple une rivière peut être équipée de stations de jaugeage qui seront modélisées comme attribut (multivalué) de la rivière. L'attribut "station de jaugeage" aura donc une spatialité ponctuelle. MADS offre une autre possibilité de prendre en compte la spatialité, d'un lac par exemple, en acceptant les attributs qui varient dans l'espace, comme sa profondeur.

## 4.2 Représentation du temporel avec MADS

Comme pour le spatial, MADS prend diverses temporalités en compte, chacune étant affectée de son pictogramme



**Figure 2** Les différents types de représentation spatiale de MADS.

On retrouve le même principe de généralisation et d'héritage entre les différents types que pour les spatialités.

La gestion de la temporalité est traitée de la même façon que le spatial. Il est ainsi possible de trouver de la temporalité sur une entité, une relation et un attribut. Seule différence, la spatialité peut être temporalisée, la temporalité ne peut pas être spatialisée. Le cycle de vie d'une temporalité est intégré dans le formalisme MADS en générant un attribut "status" des temporalités qui peut prendre les valeurs "créé", "suspendu", "réactivé" et "détruit".

### **4.3 Gestion des représentations**

MurMur étant un projet dédié à la gestion de la multi-représentation et de la multi-résolution des données spatio-temporelles, MADS devait pour satisfaire à ces objectifs prendre en compte la résolution et les points de vue. Ces deux critères sont définissables au niveau de la modélisation d'une application, et des représentations sont alors déterminées en associant une résolution à un point de vue. En réalisant un "estampillage", il est alors possible d'affecter une représentation à une entité, une relation ou un attribut. Dans ce dernier cas, les caractéristiques spatiales ou temporelles d'une entité ou d'une relation sont considérées comme des attributs et peuvent donc être "estampillées".

## **5 Perspectives**

Le projet MurMur a permis, non seulement de mener une réflexion de fond sur la modélisation de données spatio-temporelles, mais aussi de développer des outils qui mettent en pratique les principes de modélisation choisis. L'architecture logicielle a été conçue pour que plusieurs bases de données cibles puissent être utilisées. Dans le cadre du projet, c'est le SGBD Oracle qui a été choisi car il offrait deux modules, l'un spatial (Oracle Spatial), l'autre temporel (Time Series) qui étaient censés faciliter l'implantation de la modélisation. Malheureusement, dans sa version 8 disponible en début de projet, Oracle n'était pas en mesure de faire coopérer ces deux modules. C'est alors le module spatial qui a été privilégié, la partie temporelle étant gérée avec des champs de type date. Ceci montre que la gestion de données spatio-temporelle est encore immature et qu'il sera nécessaire d'attendre plusieurs années avant que des solutions commerciales soient disponibles. Les outils développés dans le cadre de MurMur ne sont pas encore assez fiables pour être rendus opérationnels en l'état pour les applications qui ont servi de test au projet. Cependant, ils peuvent constituer de bons supports pour former des concepteurs de SIRS et les sensibiliser aux problèmes qui peuvent se présenter dans la gestion de telles données. Dans la phase de test et validation du projet, il a été dressé un inventaire assez complet des erreurs à corriger et des manques à compléter. Ceci devait être repris par des filiales (Spin-up) des partenaires universitaires du projet. A l'heure actuelle, rien n'est encore fait.

## 6 . Bibliographie

Y. Bédard ; « Visual Modeling of Spatial Databases : Towards Spatial PVL and UML. », *Geomatica*, Vol. 53, No. 2, (1999) pp 169-186.

G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson ; «The Unified Modeling Language user Guide», Reading : Addison-Wesley (1999) 482 p.

MurMur Consortium ; « Supporting Multiple Representations in Spatio-Temporal databases », 6th EC-GI & GIS Workshop, Lyon, France, (June 28-30, 2000).

L. Raynal, P. Dumolard et al ; «Gérer et générer des données spatiales hiérarchisées», *Revue Internationale de Géomatique*, Vol 6, n°4, (1996) pp 365-382.

C. Vangenot, C. Parent, S. Spaccapietra ; «Multi-representations and multiple resolutions in geographic databases », *Advanced Database Symposium'99 (ADBS 99)*, IPSJ Symposium Series Vol.99, NB019, Tokyo, Japan.



# Un AGL dédié à la géomatique

## *A case tool dedicated to GIS*

Ahmed Lbath

LIRIS : Université Claude Bernard Lyon 1 & INSA Lyon  
CIRIL Villeurbanne France  
Tél : + 33 (0)4 72 43 81 72- Fax : 04 78 17 47 79  
ahmed.lbath@liris.cnrs.fr

**Résumé :** Les Systèmes d'Information Géographiques concernent des domaines d'applications très variés et sont souvent difficilement personnalisables pour un utilisateur final non expert. De plus, les données gérées dans les SIG peuvent être de nature complexe (vecteur ou raster). La perception de l'utilisateur final n'est souvent pas prise en compte dans les méthodes de conception dans la littérature. Face à ces problèmes, les principaux SIG rencontrés offrent des environnements propriétaires et des solutions "clef en main". Aussi a-t-il été nécessaire de mettre en œuvre un atelier visuel, nommé AIGLE, dédié à la conception et la génération automatique d'applications géomatiques portables sur plusieurs SIG. La portabilité est garantie par la définition d'un langage intermédiaire qui a été implanté dans l'atelier. La prise en compte de la perception de l'utilisateur se concrétise par la définition d'une méthode de conception "visuelle" orientée objets, nommée OMEGA (extension géomatique d'UML), basée sur l'utilisation de métaphores visuelles et un modèle de validation avec l'utilisateur final dès les phases d'analyse et de conception. Plusieurs applications géomatiques ont été générées par l'AGL AIGLE qui est breveté et commercialisé par la société CIRIL.

**Abstract:** The Geographical Information Systems (GIS) applications domain is very large. Nowadays, marketed GIS are closed regarding applications. Each geographical application needs specific development which is time consuming and which is dedicated to a specific GIS. Moreover, in GIS, manipulated spatial data could be complex (raster or vector). Mental model of the end-user is not considered in the method design aspect. Regarding these problems no real solution exists and most of marketed GIS are still proprietary systems. Our aim is to develop a new visual CASE tool named AIGLE, capable of generating various applications on several GIS platforms. The problem of portability leads us to integrate an intermediate language into the CASE tool. This CASE tool supports a visual object oriented method named OMEGA which is dedicated to the design and development of geographical end-user applications. This method uses visual iconic metaphors for the representation of object classes and dynamic state diagrams. The iconic metaphors representing data should be defined in the design stage with OMEGA. The proposed visual language is translated into an intermediate language before being generated into a specific target GIS. In order to validate our approach a patented CASE tool has been developed and multiple geographical applications have been generated and marketed by the company CIRIL.

# 1 Introduction à la méthode de conception OMEGA

La conception dans les SIG constitue un nouveau domaine de recherche en pleine évolution, un domaine pluridisciplinaire nécessitant des composantes de génie logiciel, de modélisation spatiale et de techniques organisationnelles de conduite de projet. La mise en place d'une application géomatique requiert des outils logiciels adaptés et une méthode de conception spécifique. En effet, compte tenu de la multiplicité des domaines, de la nature complexe et du volume des données spatiales (type vecteur ou raster, volume de données très important...), il est nécessaire de simplifier cette complexité au niveau conceptuel tout en exploitant la richesse sémantique visuelle des données géographiques.

Les travaux rencontrés dans la littérature sont basés sur une adaptation des méthodes classiques de type Merise et des extensions vers des méthodes orientées objets commencent à émerger. De plus, ces travaux sont uniquement axés vers la modélisation du dictionnaire de données et ne prennent pas en compte l'aspect dynamique des applications géomatiques. La perception de l'utilisateur final n'est pas suffisamment mise en valeur dans les démarches rencontrées. Aucune approche visuelle n'est associée aux formalismes de conception rencontrés.

D'où la nécessité d'une nouvelle méthode spécifique aux SIG. L'utilisation d'une méthode de conception orientée objets semble être une solution adaptée pour réduire la complexité de modélisation. De plus, la démarche méthodologique incrémentale proposée par une méthode comme UML (basée sur le prototypage itératif) doit permettre de mieux couvrir les besoins de l'utilisateur par validations successives tout au long du processus de développement. Or l'utilisation d'une méthode de conception orientée objets classique se révèle insuffisante pour modéliser des données spatiales (information bi-dimensionnelle) en prenant en compte le monde des SIG. Une extension géomatique de ces méthodes paraît incontournable. Notre contribution a consisté à proposer la première extension géomatique d'UML [LBA97].

## 2 Problématique posée

Nous allons illustrer notre problématique à partir d'un exemple de diagramme UML. Considérons un exemple de gestion de lotissements dans une commune ; la représentation du diagramme de classe dans la méthode unifiée UML est donnée dans la figure 1 . Dans ce diagramme, sont représentées des classes et des associations relevant de la nature géométrique de la classe d'objet "*Maison*". Ces classes et associations sont liées à la gestion interne du SIG utilisé (elles sont encadrées par un rectangle en ligne discontinue) ; leur présence dans le diagramme augmente sa complexité. Elles peuvent être encapsulées par une extension des notations du formalisme MODUL-R [CAR93] de la description géométrique des entités à la description géométrique des classes d'objets à l'aide de pictogrammes. Dans le formalisme que nous proposons, le diagramme de classes est représenté sans faire référence aux classes d'objets qui sont gérées

par les SIG (polygone, ligne...) en utilisant des pictogrammes désignant la nature géométrique des classes d'objet et des métaphores visuelles représentant les différentes classes dans ce que nous dénommons les diagrammes utilisateur et technique (figure 7 et figure 3).

Compte tenu de l'insuffisance des méthodes de conception classiques à modéliser des applications géomatiques et partant de la richesse des méthodes OO à modéliser des objets complexes, nous avons proposé une méthode de conception d'applications géomatiques prenant en compte d'une part l'aspect bi-dimensionnel des données spatiales (données géoréférencées dans un espace) et d'autre part leur caractère visuel. Nous allons présenter dans ce qui suit, brièvement, le formalisme et la démarche de la méthode OMEGA.

### **3 Solution proposée : O.M.E.G.A.**

La méthode OMEGA (Object Modeling for End-user Geographical Applications) vise à apporter un formalisme de haut niveau permettant de mieux maîtriser la complexité des objets spatiaux tout en offrant un support de communication plus accessible à un utilisateur non spécialiste. Elle comporte aussi une démarche méthodologique basée sur la conception participative impliquant, très tôt dans le cycle de vie d'un logiciel géomatique la validation de l'utilisateur [LBA97] [LBA95].

#### **3.1 Présentation sommaire du formalisme d'OMEGA**

Dans le formalisme d'OMEGA nous définissons deux types de concepts : des concepts visuels et des concepts non visuels. Avant de donner les définitions nous considérons qu'une application est un schéma de base de données qui est vue comme un ensemble de schémas de classes. Un schéma de classes est composé d'un nom, d'un ensemble de méthodes et d'un ensemble d'attributs, chaque attribut étant associé à un domaine de valeurs. Les schémas de classes sont organisés en une hiérarchie d'héritage. Nous considérons qu'une application géomatique est définie par un schéma de base de données, notée **C**, qui est un ensemble de schémas de classes d'objets nommées  $C_i (i=1,n)$ .

Chacune des classes désigne une classe d'objets alphanumériques, géographiques, image ou multimédia.

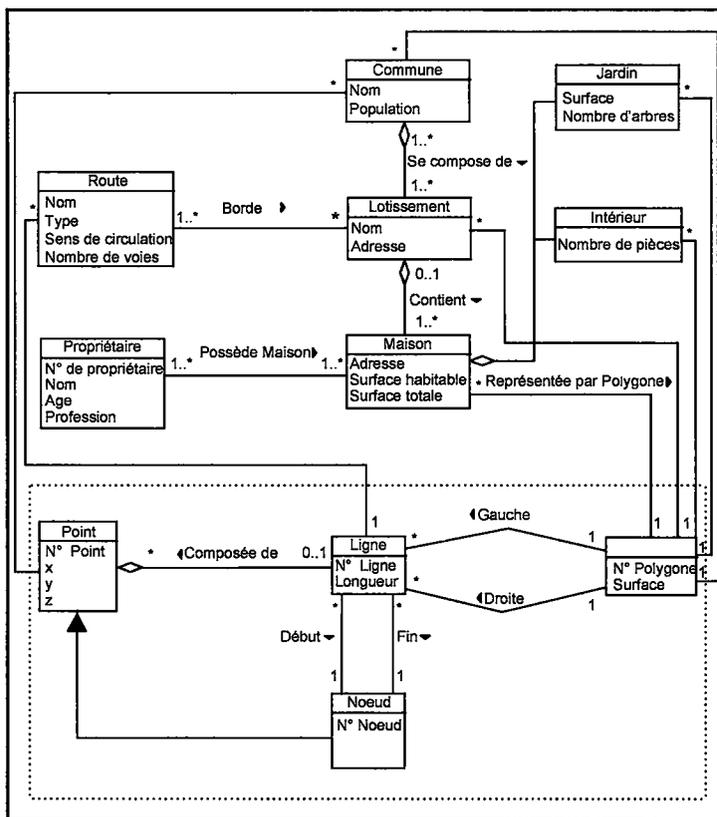


Figure 1 Un exemple de diagramme de classe selon les notations du formalisme UML de la méthode unifiée.

### 3.1.1 Les classes d'objets

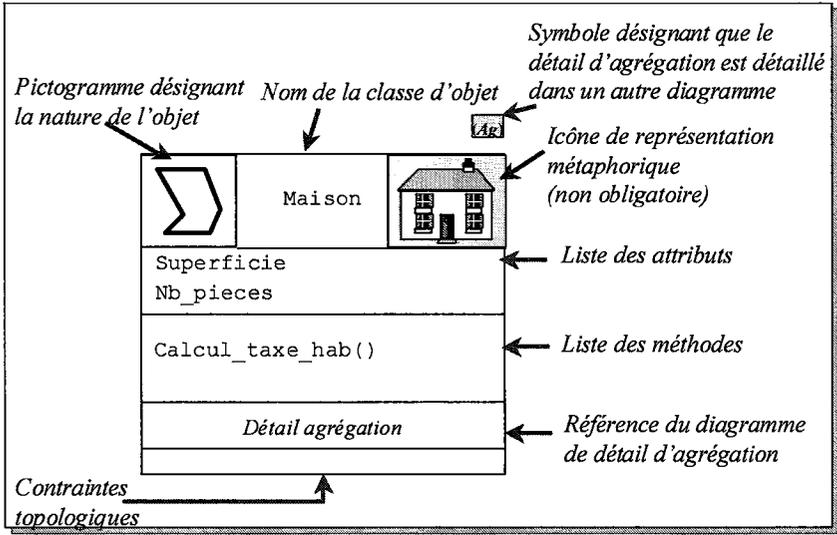
Nous distinguons deux types de classes : les classes d'objets géographiques et les autres classes d'objets non géographiques (alphanumérique, multimédia, ...). Les objets géographiques sont classés en trois types d'objets [CAR 93] [PAN 94] : (i) **les objets géographiques simples** (point (0D), ligne orientée ou non (1D), surface (2D), et volume (3D)), (ii) **les objets géographiques composés** (agrégation spatiale d'objets simples) **homogènes** (composés d'objets simples de même classe) et **hétérogènes** (composés d'objets simples de classes différentes), et (iii) **les objets géographiques complexes** (composés d'objets simples et/ou d'objets composés) **homogènes** lorsque leurs composants appartiennent à une même classe, et **hétérogènes** lorsque leurs composants appartiennent à des classes différentes [PAN 94].

Une **classe d'objets** est définie par un nom et une nature qui lui est propre (alphanumérique ou non alphanumérique). Elle est exactement définie par un tuple de huit éléments qui sont son nom, un pictogramme de représentation de sa nature spatiale, une icône de métaphore visuelle, un ensemble d'attributs, un ensemble de méthodes, un ensemble de détails d'agrégation, un ensemble de contraintes topologiques et un ensemble de sa ou ses super-classes.

En synthèse une classe d'objet se définit, dans OMEGA, de la manière suivante ( figure 2 ) :

*Définition d'une classe*

$C_i \in C, C_i = \langle P, Nc, Imv, A, M, Da, \theta, Sc \rangle$



```
Classe_Maison = <Pms, Maison, Imms, {<Superficie, string>, <Nb_pieces, integer>, <obj, polygone>, {Maison(), Calcul_taxe_hab()}}, ∅, ∅, Batiment>
```

**Figure 2** Exemple de représentation graphique d'une classe d'objets

Dans OMEGA, les diagrammes de classes sont constitués de classes d'objets et de relations entre ces classes. Les relations peuvent être hiérarchiques ou non. On distingue cinq types de relations : les relations de classe, les liens d'instances, les relations de spécialisation (héritage), les relations d'agrégation spatiale, et les relations topologiques. La définition détaillée de ces relations étant dans [LBA97].

## 3.2 Les différents modèles de la méthode OMEGA

Nous considérons une conception d'application géomatique basée sur cinq modèles: un **modèle utilisateur**, un **modèle de conception technique**, un **modèle dynamique**, un **modèle fonctionnel** et un **modèle de plateformes** ; nous allons présenter brièvement dans cet article les modèles de conception technique et les modèles utilisateur. La définition formelle de ces modèles étant donnée dans [LBA97] nous ne présenterons ici que les principes de base.

### 3.2.1 Le modèle utilisateur (MU)

#### 3.2.1.1 Définition du modèle utilisateur (MU)

Le Modèle Utilisateur (MU) a pour finalité de fournir un support de communication entre le concepteur et l'utilisateur final. Il est défini à partir de l'expression des besoins de ce dernier. Il est basé sur deux types de diagrammes principaux : le **diagramme de classe utilisateur** à plusieurs niveaux de détail et les **diagrammes de scénarios simplifiés** basés sur les diagrammes de cas d'utilisation.

La définition formelle de ce modèle est donnée dans [LBA97].

#### 3.2.1.2 Le diagramme de Classe Utilisateur (DCU)

Le diagramme de classe utilisateur consiste en un ensemble de diagrammes sous forme de couches superposées les unes sur les autres en fonction du niveau de détail requis. Ces différentes couches sont des diagrammes donnant une vision "simplifiée" du diagramme de classe technique ( figure 3 ).

#### 3.2.1.3 Les métaphores visuelles dans le modèle utilisateur

Nous pouvons dire qu'une métaphore visuelle est une représentation associée à un ensemble d'objets, de méthodes, d'outils, de tâches dans un contexte donné et dans une culture donnée. Le terme "culture" est à considérer au sens large du terme à savoir au sens de la culture propre à chaque ensemble d'individus, à chaque classe de métiers, etc.

Plusieurs travaux sur les métaphores visuelles ont été entrepris dans l'objectif d'améliorer l'interface Homme-Machine et ont contribué au succès que connaissent aujourd'hui les systèmes à interface graphique.

Il faut noter qu'une métaphore visuelle choisie par classe d'objets est associée à toutes les instances de la classe. Dans notre contexte, nous distinguons deux types de métaphores visuelles : les **métaphores visuelles de classe** (spécifique à la classe) et les **métaphores visuelles génériques** (surchargeables par les classes filles).

À ce niveau de modélisation, l'association d'une classe à une métaphore visuelle n'est pas obligatoire car il n'est pas forcément utile d'associer une métaphore visuelle à chaque classe d'objet. Le choix des classes potentiellement représentables par une métaphore visuelle devrait se faire en prenant en compte leur importance au niveau de l'environnement d'interrogation visuel ( § 3 ).

### 3.2.1.4 Choix d'une métaphore visuelle

La question importante qui se pose concerne les critères de choix d'une métaphore visuelle. Ce choix dépend de la sémiologie graphique du domaine du problème considéré. Plusieurs travaux ont été menés pour essayer de déterminer les moyens aidant à construire une "bonne" icône ou plus exactement comment trouver une "bonne" métaphore visuelle pour exprimer un concept. Il semble qu'il ne soit pas possible de définir une méthode constituée de règles et d'automatismes universels. Kuhn [KUH 94] estime que les métaphores utiles sont l'œuvre d'équipes de design qui ont étudié l'environnement de travail, le comportement, voire la culture des utilisateurs finaux pendant des mois ou des années. Cependant, Liu [LIU 89] énumère des principes généraux de construction d'une icône selon le genre de concept à représenter.

Nous pouvons citer des critères qualifiant la "qualité" d'une métaphore ; pour cela, nous nous appuyons sur des travaux de Kuhn [KUH 94] qui évoque deux critères principaux d'évaluation d'une métaphore : un **critère de lisibilité** et un **critère de proximité de la représentation mentale**. La **lisibilité** consiste à définir une "bonne" métaphore si elle est intuitive et compréhensible par un utilisateur. Le deuxième critère que nous qualifions de **critère de proximité de la représentation mentale** est basé sur trois sous-critères : (i) **familiarité** avec l'utilisateur dans ses tâches courantes (la métaphore de la *Corbeille* du bureau dans les systèmes de type Macintosh en est un bon exemple d'illustration), (ii) **cohérence** interne avec la tâche ou l'objet à implanter, (iii) et le support du **"raisonnement intuitif"** de l'utilisateur (exemple : dans la métaphore du bureau, la suppression d'un fichier en le mettant dans l'icône représentant la corbeille du bureau). Les SIG présentent une métaphore des données géographiques dans le sens où ils permettent de superposer plusieurs couches d'information (réseau hydraulique, réseau routier, frontières départementales...) dont les détails peuvent être visibles en fonction de l'échelle de représentation. Ils donnent une image métaphorique de la réalité des données spatiales.

Il faut mentionner que le choix des métaphores visuelles nécessite plusieurs retours entre le concepteur et l'utilisateur final voire plusieurs utilisateurs. L'appel à des expérimentations cognitives pourrait certainement aider à la réalisation de cette étape.

Dans notre contexte, nous allons considérer qu'une métaphore visuelle est une **représentation imagée** associée à **une classe d'objets** pour **une classe d'utilisateurs** donnée.

### 3.2.1.5 Avantages et inconvénients de l'utilisation des métaphores

Il nous semble important d'attirer l'attention du lecteur sur le fait qu'un "bon" diagramme de classes utilisateur est un diagramme comportant le "maximum" de métaphores visuelles (leur nombre devant rester "raisonnable"). Cependant, il ne faut pas négliger le **coût de l'intégration** (recherche d'images adaptée ou élaboration de nouvelles images) des icônes métaphoriques.

Il est également important de mentionner que de plus en plus des bibliothèques d'images sont disponibles sur le marché et que leur utilisation devrait passer par une phase de validation avec l'utilisateur final. Il est alors certain que notre

démarche présente un surcoût par rapport aux démarches traditionnelles mais il ne faut pas oublier **deux avantages principaux** qui, à notre avis, devront minimiser ce surcoût : (i) **la lisibilité des diagrammes** permet un meilleur dialogue avec l'utilisateur final et donc une validation plus fiable et plus rapide pour la définition des diagrammes de classes, (ii) dans le cas où il s'agit de la mise en place d'application géomatique exploitable à l'aide d'un **langage d'interrogation visuel** [LBA 97], il est indispensable de prendre en compte cette approche visuelle dès les phases d'analyse et conception.

### ***3.2.1.6 Les diagrammes de Classes Utilisateurs***

Le Diagramme de Classe Utilisateur (DCU) est une image simplifiée du Diagramme de Classe Technique (DCT). De la même manière que le DCT, le DCU est composé de plusieurs niveaux de détail.

### ***3.2.1.7 Exemple de diagrammes utilisateurs***

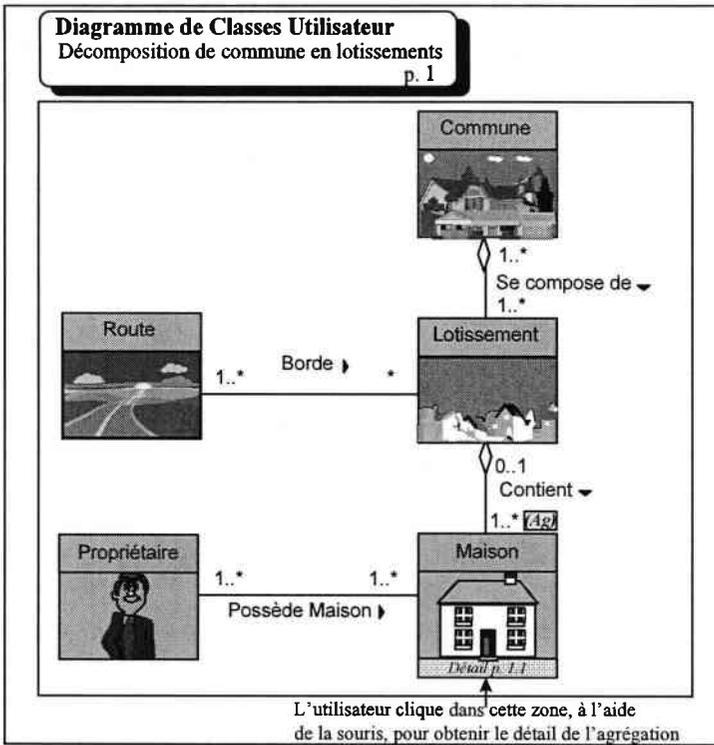
Dans le diagramme de classe utilisateur, les classes d'objets sont représentées avec une visibilité de type métaphorique (i.e. par des icônes contenant des métaphores visuelles qui auront été définies avec l'utilisateur final).

Des règles de structuration du diagramme de classe utilisateur ainsi que des règles de "qualité" sont données dans [LBA97].

A la fin de cette phase un document comportant une liste des classes d'objets avec leur description et les métaphores associées est fourni.

Dans le modèle utilisateur, la mise en place de toutes les classes "pertinentes" au regard de l'application géomatique et de l'utilisateur nécessite une interprétation fidèle de représentation mentale de ce dernier. Il est alors important de discerner les frontières du problème considéré en essayant de représenter une image des principaux scénarii ou des classes de scenarii (appelés cas d'utilisation) de l'application et de les valider avec l'utilisateur.

Il faut noter que les règles ainsi introduites sont des règles de construction ; elles devront être validées par expérimentation.



**Figure 3** Un exemple de diagramme de classes utilisateur de découpage d'une commune en lotissements (correspondant à la figure 1).

### 3.2.1.8 Le diagramme de scénarios simplifiés (basé sur les cas d'utilisation)

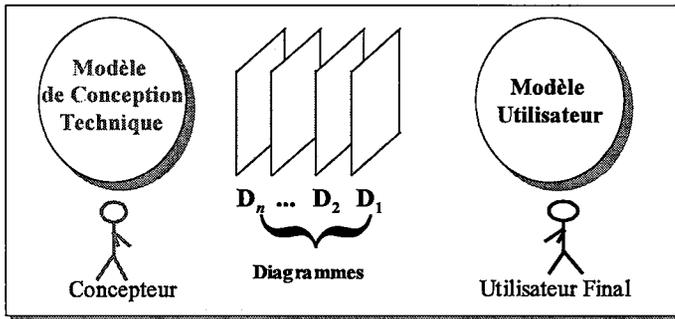
Parallèlement au modèle de classe utilisateur, nous préconisons la mise en œuvre des diagrammes de "scénarios simplifiés" basés sur les cas d'utilisation (du terme "use-case" en anglais) de la méthode OOSE [JAC 92] et la méthode unifiée BOOCH-OMT, pré version d'UML, [KET 96]. Le terme "diagramme de scénarios simplifiés" est introduit par référence aux diagrammes de scénarios fonctionnels qui sont supposés être complets pour décrire le comportement d'une application. L'objectif ici est de décrire de manière "simplifiée" ce comportement afin de valider cette description avec l'utilisateur final. Nous aurions pu appeler ce type de diagrammes : *diagrammes d'esquisse de scénarios*.

Les diagrammes de scénarios simplifiés permettent d'énumérer les scénarios fonctionnels qui composent le système étudié. L'objectif de leur mise en œuvre est de caractériser le comportement global de l'application en mettant en jeu un ou plusieurs acteurs externes. Leur utilité réside principalement dans deux points : la possibilité de fournir à l'utilisateur des vues sur le fonctionnement du système et la définition des frontières du problème en validant les différents scénarios. Les éléments de base sont les acteurs, les événements et les cas d'utilisation.



Les principaux apports qu'il faut retenir par rapport au modèle de conception technique sont :

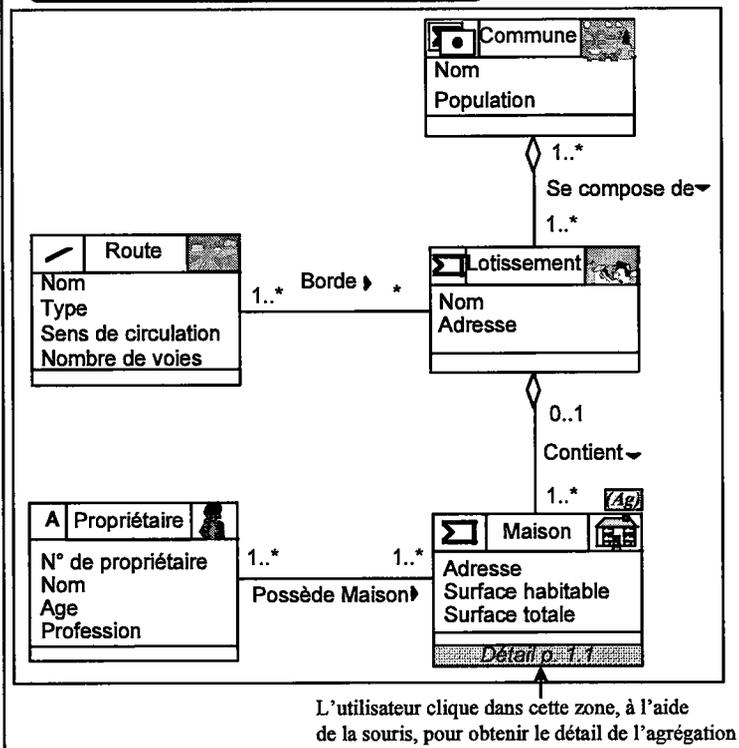
- les diagrammes de classes techniques à plusieurs niveaux de détails,
- une extension géomatique d'UML avec un formalisme propre aux classes d'objets (Icône de pictogramme par rapport à la nature de la classe et l'icône de métaphore visuelle par rapport à la perception de l'utilisateur),
- une extension géomatique des relations entre les classes en introduisant les relations d'agrégation spatiale et les relations topologiques.



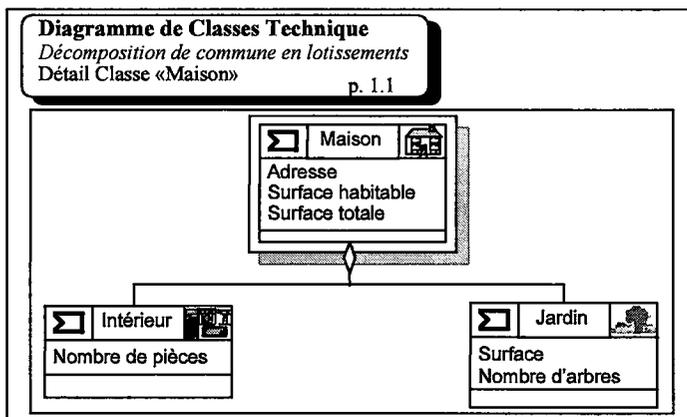
**Figure 5** Interaction entre le modèle de conception technique et le modèle utilisateur à travers des diagrammes à plusieurs étages.

Un exemple de *Diagramme de Classe Technique* (DCT) détaillé sans relation topologique est donné dans la figure 6 . Cet exemple reprend la même réalité qui est modélisée en UML dans la figure 1 . Nous constatons que le diagramme de classe UML dans la figure 1 comporte **11 classes d'objets** et **20 relations** et que ce même diagramme exprimé dans le formalisme d'OMEGA ne comporte plus que 7 classes d'objets et 6 relations voire **5 classes d'objets** et **4 relations** ( figure 6 ) si nous simplifions les informations relatives au détail d'agrégation spatiale de la classe *maison*.

**Diagramme de Classes Technique**  
 Décomposition de commune en lotissements  
 p. 1



**Figure 6** Exemple de Diagramme de Classe Technique Détaillé dans le formalisme proposé dans OMEGA. Les relations d'agrégations sont détaillées dans un diagramme annexe ( figure 7 ). Il s'agit de l'expression du diagramme UML de la figure 1 dans OMEGA.



**Figure 7** Un sous-diagramme de classe technique représentant le détail d'agrégation de la classe "Maison".

Nous avons pu constater auprès de plusieurs utilisateurs potentiels, que la lisibilité du diagramme est plus importante en intégrant des icônes métaphoriques pour représenter les classes et des icônes graphiques pour représenter leur nature spatiale. Cependant, il ne faut pas négliger le coût (en temps d'élaboration d'images ou de recherche de librairie d'images adaptée) de la mise en œuvre d'icônes de métaphores visuelles. De plus, pour accroître la lisibilité des diagrammes, nous proposons plusieurs niveaux de détails dans le diagramme de classes.

Des règles de structuration du modèle de classe technique ainsi que des règles de qualités ont été proposées dans [LBA97].

### 3.2.3 Les autres modèles

Les modèles dynamiques, fonctionnels ainsi que le modèle de plate-forme sont présentés dans [LBA97]. Concernant la démarche méthodologique, elle sera donnée de manière résumée dans la section suivante où nous allons présenter l'AGL AIGLE.

## 4 Introduction de l'AGL AIGLE

Dans le but de supporter le formalisme de la méthode OMEGA et afin de répondre à une problématique industrielle de production de logiciels géomatiques nous avons conçu et réalisé un Atelier de Génie Logiciel dédié à la géomatique, nommé AIGLE. Cet atelier et ses produits dérivés sont commercialisés par la société CIRIL depuis 1996. AIGLE et ses produits dérivés sont aujourd'hui utilisés par plusieurs dizaines de références.

Les AGL sont, en général, des outils qui doivent faciliter la formalisation et la conduite de projet de mise en œuvre d'un logiciel tout au long de son cycle de vie. Ce sont aussi de précieux outils de génération automatique de code et de

documentation. Certains AGL vont jusqu'à l'automatisation des tests unitaires et tests d'intégrité afin de mesurer la qualité logicielle des produits.

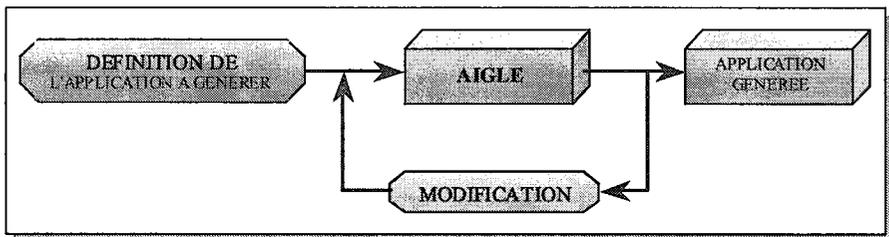
La nécessité d'un AGL en géomatique s'est fait ressentir depuis quelques années. Pourtant nous constatons qu'il n'existe toujours pas d'outil de prototypage couplé avec les SIG et les seuls produits rencontrés se limitent à la modélisation du dictionnaire de données spatiales.

Pour cela, notre contribution se matérialise, dans ce domaine, par l'apport de nouveaux concepts en adéquation avec la problématique de la géomatique comme par exemple la notion d'AGL à "plusieurs étages" pouvant générer automatiquement de véritables applications géomatiques opérationnelles ou alors plusieurs prototypes, de manière incrémentale, facilitant ainsi la conception participative des utilisateurs. La portabilité "applicative" vis à vis des SIG du marché, en plus de la portabilité des "données" fait partie aussi de nos contributions.

En effet, AIGLE supporte la méthode OMEGA et génère automatiquement du code portable dans plusieurs SIG cibles du marché.

## 5 Démarche méthodologique dans AIGLE

AIGLE est un AGL supportant la méthode OMEGA. Sa démarche méthodologique, que nous proposons pour la conception et la réalisation d'applications géomatiques est celle d'OMEGA qui est basée sur un processus incrémental par prototypage itératif. En effet, le concepteur peut spécifier une application et lancer la génération automatique de code à chaque phase du cycle de développement. Il n'y a pas un cheminement prédéfini pour la conception et la réalisation d'applications géomatiques ; on peut par exemple mettre en oeuvre parallèlement des modèles de scénario et des modèles fonctionnels. Cependant, la démarche proposée consiste à générer dès les premières phases une maquette voire un prototype afin de valider les spécifications et construire ainsi une application géomatique de manière incrémentale ( figure 8 ). Dans ce but, l'atelier AIGLE offre un outil de simulation (par SIG cible) permettant de tester la dynamique de l'application.



**Figure 8** Le processus de conception et de génération à l'aide de l'atelier AIGLE est un processus incrémental.

La démarche méthodologique n'impose pas un parcours linéaire où le passage d'une phase à l'autre dans le cycle de vie est unidirectionnel ; elle autorise au concepteur de prendre en compte les différentes remarques et retours observés dans la phase de conception, par exemple, et de revenir à la phase d'analyse pour les intégrer. Elle offre un environnement où selon le contexte, on va traiter un des aspects de gestion de la conception et du développement d'une application géomatique. En revanche, cette démarche couvre tout le cycle de développement de l'application ; le formalisme implémenté veille à la cohérence de l'application modélisée (par exemple, il n'est pas permis de décrire une méthode qui n'est attachée à aucun objet dans le référentiel). Ce cycle est basé principalement sur cinq phases : l'**analyse**, la **conception**, le **maquettage/prototypage**, la **réalisation** et les **tests**.

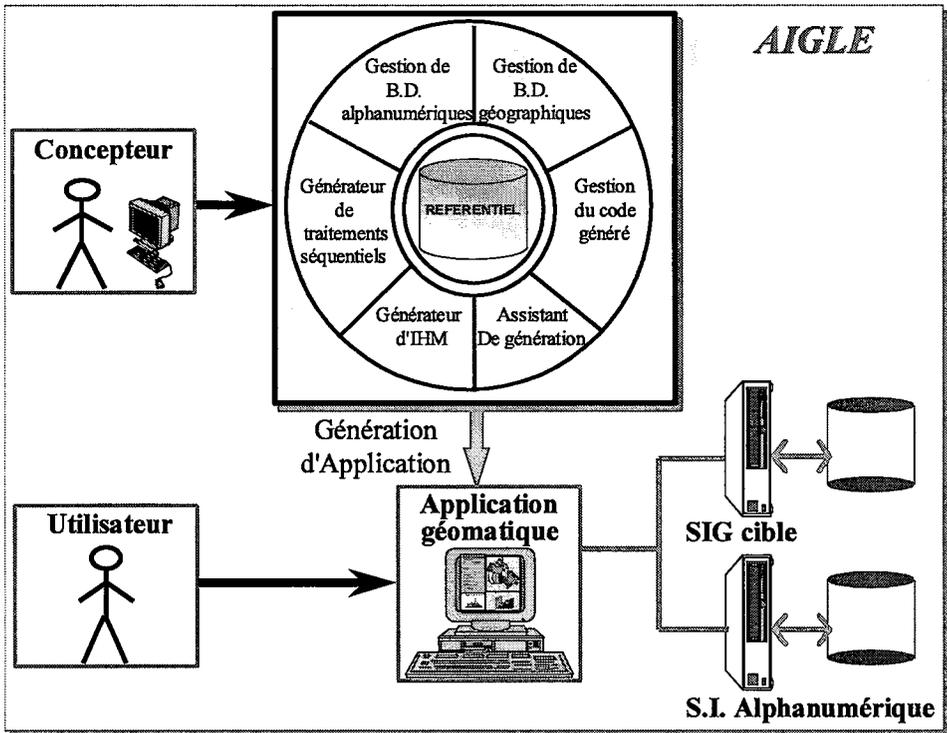
## 6 Description fonctionnelle

L'atelier AIGLE, que nous avons conçu et réalisé, est un AGL qui a pour mission principale d'aider les concepteurs à créer des applications géomatiques "autonomes" ou à créer un module géomatique au-dessus d'une application de gestion alphanumérique. Le concepteur décrit l'architecture de son application en spécifiant le modèle des objets qui la composent, leurs méthodes, leur cycle de vie, les différents scénarii qui ont une signification pour l'utilisateur final. Il choisit un SIG cible sur lequel l'application devra être opérationnelle et exploitable par l'utilisateur final. Ensuite AIGLE génère automatiquement le code source ainsi que les programmes exécutables ( figure 9 ).

L'application géomatique est vue dans ce contexte comme composée d'objets alphanumériques, géographiques ou multimédias pouvant être utilisés par plusieurs applications de l'entreprise. Une bibliothèque d'objets "élémentaires" par SIG cible est proposée au concepteur à la création d'une nouvelle application. Les objets manipulés peuvent être des objets du monde réel ayant une sémantique pour l'utilisateur final ou des objets "techniques" qui sont utilisés en interne au niveau du moteur de l'application.

La description des méthodes se fait en fonction de leur nature. En effet, nous distinguons deux types de traitements : les traitements séquentiels en ce qui concerne les projets de gestion et les traitements interactifs. Les traitements séquentiels se prêtent bien à une modélisation algorithmique. Les traitements interactifs ne présentent pas d'algorithme séquentiel ; ce sont des traitements basés sur la programmation événementielle orientée définition de l'Interface Homme Machine.

La contrainte de portabilité, que nous nous sommes fixée, nous a conduit à définir un langage intermédiaire dont la partie réservée à l'interrogation des données spatiales est basée sur les fonctionnalités offertes par SQL3 [ISO96]. A partir de ce "langage pivot", un traducteur spécifique par SIG transcrit le code généré dans le langage hôte du SIG cible ( figure 10 ).



**Figure 9** Architecture de l'atelier AIGLE. Le concepteur décrit l'architecture d'une application géomatique en choisissant un SIG cible, l'atelier AIGLE génère le code d'implémentation de cette application qui est orientée utilisateur final.

L'atelier AIGLE génère du code dans un Langage Intermédiaire (L.I.) puis, au travers d'un traducteur  $i$ , transcrit le code généré dans le langage du SIG-cible  $i$ . L'application géomatique générée peut fonctionner en inter-opérant avec une application alphanumérique existante. Nous devons noter que le langage intermédiaire (LI) comprend un langage d'interrogation intermédiaire (LI<sub>I</sub>), un langage intermédiaire de définition d'IHM et un langage intermédiaire de description algorithmique des méthodes séquentielles.

Pour résumer, l'atelier AIGLE permet aux concepteurs et aux développeurs de gérer la conception et le développement d'applications géomatiques et de générer ces applications de manière incrémentale en tenant compte des éventuelles remarques de l'utilisateur final.

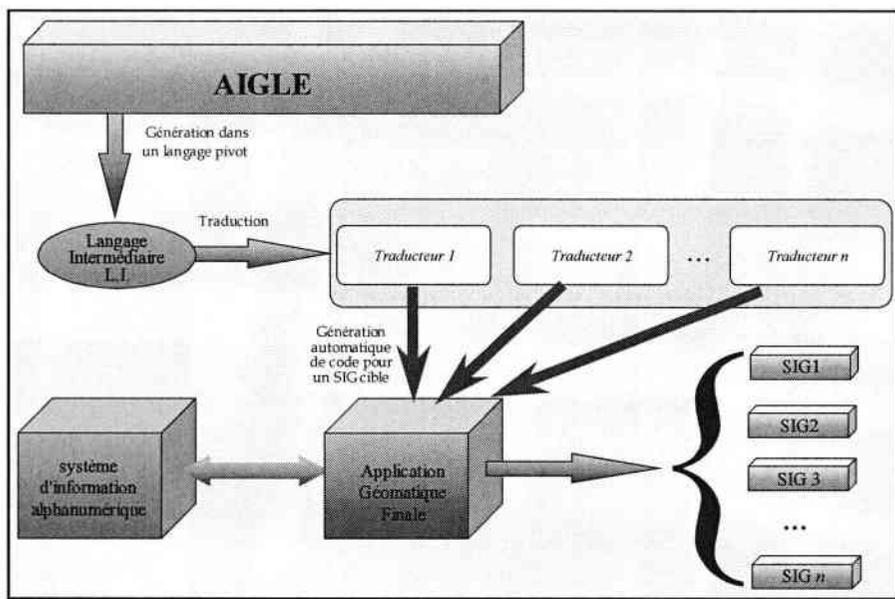


Figure 10 Schéma de génération de code portable sur plusieurs SIG-cibles.

## 7 Un module de vulgarisation : assistant de génération

AIGLE est un AGL qui s'adresse à des concepteurs d'applications géomatiques. Après quelques retours d'expérience nous avons constaté que cet outil intéresse aussi des utilisateurs finaux qui ne sont pas forcément géomaticiens ni informaticiens et qui sont soit des décideurs soit des acteurs d'organisations publiques ou privées ayant à administrer ou gérer un territoire. Ces utilisateurs ont besoin de générer leurs propres prototypes pour mieux identifier leurs besoins avant de rédiger un cahier des charges leur permettant de lancer leur appel d'offre ou demande de prestation externe ; ils ont besoin de générer de véritables applications géomatiques qui sont des applications "thématiques simples" sur le plan fonctionnel mais dont le développement manuel reste fastidieux voire inaccessible pour certaines structures et d'un coût très élevé. Notons que les dites "applications simples" représentent environ 65% des besoins dans les collectivités locales en France.

Nous avons alors introduit un nouveau concept : l'AGL à plusieurs étages pouvant être utilisé par des spécialistes ou bien des utilisateurs non informaticiens. Nous avons matérialisé ce concept par la conception et réalisation d'un assistant de génération automatique d'applications géomatiques. Ce module représente la version haute de AIGLE (orientée utilisateur pour les applications) en opposition avec la version basse de AIGLE (orienté concepteur)

Cet assistant génère des applications géomatiques portables sur le plan applicatif sur les principaux SIG du marché. Cet assistant ainsi que l'AGL AIGLE ont été validés expérimentalement sur les SIG MapInfo®, ArcInfo® et un moteur

géomatique propriétaire en JAVA. Nous avons conçu et réalisé ce moteur Java, avec François Pinet [PIN02] au sein de la société CIRIL.

Les détails concernant le module de vulgarisation de l'AGL AIGLE, qui est défini par un ensemble de sous-modules et qui est la matérialisation d'un procédé, sont donnés dans le texte de dépôt de brevet international (N° du brevet : 0115773).

## **8 Validation expérimentale**

Les modules de l'atelier AIGLE ont été implémentés en C++, Ms VB et s'articulent autour d'un référentiel développé sous le SGBDR Oracle. AIGLE est un produit commercialisé et installé chez des clients tels que le ministère de l'équipement, pour gérer les zones de bruits aux abords des routes, le ministère de l'environnement pour gérer les zones humides, plusieurs communes pour gérer les panneaux publicitaires, la société BSN Glasspack pour gérer sa gestion de flux et de logistique, la société Interface Transports pour gérer les Plans de Déplacement Urbains, etc.

Plusieurs produits dérivés d'AIGLE (gestion des activités scolaires, du découpage électoral, du patrimoine communal, ...) sont également commercialisés et installés chez des clients. Nous comptons plusieurs dizaines de sites utilisant AIGLE ou ses produits dérivés.

## **9 Conclusion**

Nous avons proposé un Atelier de Génie Logiciel dédié à la conception et développement d'applications géomatiques. Nous avons conçu et réalisé cet atelier dans le but d'implémenter le formalisme d'OMEGA d'une part et pour répondre aux enjeux industriels de productivité et de maintenance d'autre part.

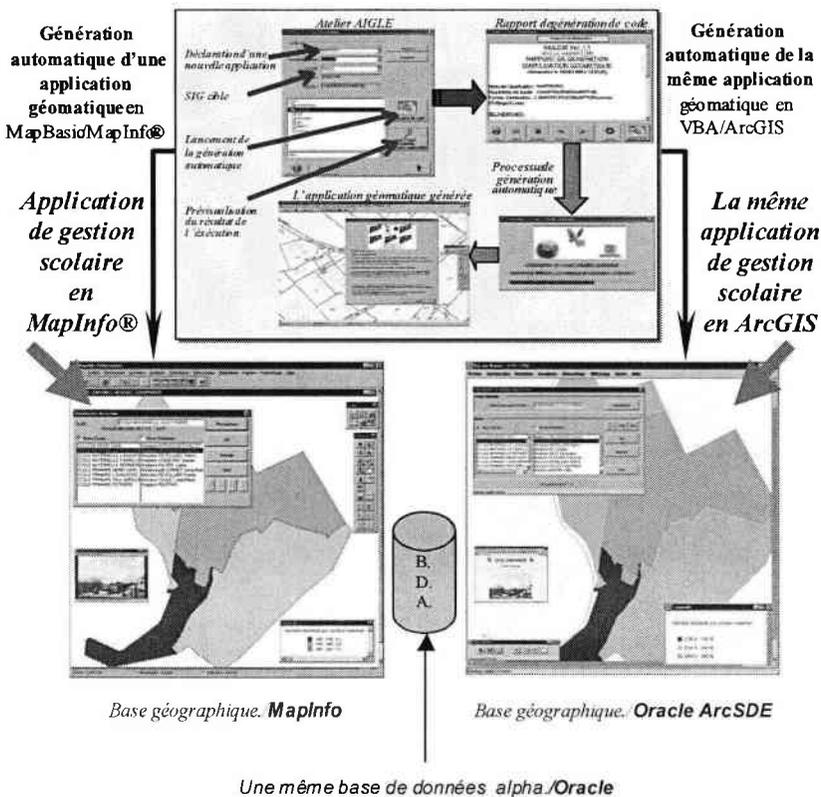
Il faut rappeler que le développement d'applications géomatiques nécessite un investissement lourd et que face à la multiplicité des domaines d'applications des SIG les logiciels du marché restent des outils propriétaires et difficilement personnalisables. La portabilité des données spatiales a fait l'objet de quelques études de normalisation, cependant la portabilité des traitements n'a jamais été prise en compte dans l'art antérieur. Et même si on considère le langage d'interrogation SQL3 qui, par construction ne couvre pas tous les types de traitements, il n'a pas encore été adopté par les constructeurs.

Notre action de recherche a consisté à proposer, concevoir et réaliser un nouvel AGL pour la géomatique qui valide notre méthode de conception OMEGA.

L'originalité de notre contribution réside dans les principaux points suivants :

- i) Proposition d'outils intégrés permettant de réaliser des applications géomatiques par prototypage itératif Indépendance du SIG cible. La portabilité est garantie grâce à la définition d'un langage intermédiaire et de plusieurs traducteurs
- ii) Introduction du concept de l'AGL "orienté utilisateur"
- iii) Proposition d'un outil de développement rapide (RAD) pour la géomatique

Notons également que le procédé mis en œuvre dans le module d'assistant AIGLE, de notre atelier, a fait l'objet d'un dépôt de brevet international. AIGLE a été installé et vendu chez de nombreux utilisateurs de la société CIRIL dans le secteur des collectivités locales et des entreprises privées. Les travaux de recherche que nous avons développés nous ont montré la nécessité d'étendre AIGLE au même titre que nous avons étendu la méthode OMEGA vers la télégéomatique et plus particulièrement il nous a paru important de prendre en compte dans la génération de code l'indépendance des protocoles de communication (GSM-SMS, RMI, Java...) au niveau des applications télégéomatiques. Nous avons proposé avec François Pinet [PIN02] une méthode de conception nommée T-OMEGA qui répond à toutes ces extensions et qui apporte des contributions tant sur le plan de la géomatique en caractérisant au niveau conceptuel, par exemple les modes de stockage/affichage des données spatio-temporelles que sur le plan de la distribution de l'information. La méthode T-OMEGA est supportée par l'AGL T-AIGLE.



**Figure 11** Exemple de génération d'une même application géomatique portable sur MapInfo (à gauche) et en Intranet (Applet Java) (à droite) à l'aide d'AIGLE.

## Bibliographie

- [CAR93] CARON C., BEDARD Y., GAGNON P. MODUL-R : un formalisme individuel adapté pour les SIRS. *Revue internationale de géomatique*. 1993, Vol. 3, n°3, p. 283-306.
- [ISO96] ISO/IEC JTC SC21 N10441, *SQL Multimedia and Application Packages, Part 3: Spatial*, Novembre 1996. 172 p.
- [JAC92] JACOBSON I. *Object-Oriented Software Engineering*. Workingham (UK) : Addison-Wesley, 1992. 236 p.
- [KET 96] KETTANI, N. Le point sur l'unification des méthodes objets BOOCH, OMT, Jacobson,... *AFCET, Journées de synthèse sur points fondamentaux et expériences d'analyse et de conception objet*, Paris, 24 au 26 janvier 1996, p. 169-230.
- [KUH94] KUHN H. 7±2 Questions and Answers about Metaphors for GIS User Interfaces. *Proc. of the NATO Advanced Research Workshop on Cognitive Aspects of Human-Computer Interaction for Geographic Information Systems*, Palma de Mallorca, Spain, March 20-25 1994,p. 113-122.
- [LBA95] LBATH, A. AUFAURE, M.A. Un AGL pour la personnalisation des SIG selon les applications géomatiques. *Revue Internationale de Géomatique*, 1995, Vol. 5, n° 2, p.179-195.
- [LBA97] LBATH A. AIGLE : Un Environnement Visuel pour la Conception et la Génération Automatique d'Applications Géomatiques. Thèse : INSA Lyon, 4 novembre 1997. 282 p.
- [LIU89] LIU, F.S., TAI, J.W. Some Principles of Icon Construction. *Proc. of the IFIPTC 2/WG 2.6 Working Conf. on Visual Databases Systems*, Tokyo, Japan, April 3-7 1989, p. 89-104.
- [PAN94] PANTAZIS D. Analyse Méthodologique des Phases de Conception et de Développement d'un SIG. Thèse : Université de Liège, 1994. 556 p.
- [PIN02] PINET F., 2002 – Vers une méthode de conception pour la télégéomatique : intégration et validation au sein d'un atelier de développement, Thèse de doctorat, spécialité informatique, INSA de Lyon, 243 p.

# Un formalisme adapté aux géomaticiens pour décrire la distribution et les échanges de données au sein des systèmes télégéomatiques

## *A Formalism Suitable for Geomaticians and Dedicated to the Description of the Data Distribution and Exchanges in Telegeoprocessing Systems*

François Pinet<sup>1</sup>, Frédéric Vigier<sup>1</sup>, Ahmed Lbath<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cemagref Clermont Ferrand, campus des Cézeaux, 63172 AUBIERE

Tél. : 04.73.44.06.00 - Fax : 04.73.44.06.96

{francois.pinet, frederic.vigier}@cemagref.fr

<sup>2</sup> LIRIS Lyon, Campus de la Doua, 69627 VILLEURBANNE

<sup>2</sup> CIRIL SA, 20 rue Louis Guérin, 69100 Villeurbanne

Tél. : 04.72.43.26.10 - Fax : 04.72.43.15.36

**Résumé :** La conception des applications télégéomatiques implique l'intervention de géomaticiens, entre autres, dans la phase d'analyse. Son rôle est de spécifier les données géographiques et leurs distributions/échanges entre applications. Les formalismes dédiés à la spécification de systèmes communicants sont souvent trop complexes d'utilisation pour les géomaticiens. Nous proposons donc dans cet article un formalisme qui est destiné à ce type d'acteurs du projet, et qui offre la possibilité de décrire simplement la distribution et les échanges inter-applications.

**Abstract:** The conceptual modeling of telegeoprocessing applications involves the participation of GIS specialists. Their goal consists in specifying geographic data and associated distribution/exchanges between applications. Unfortunately, the use of formalisms for communicating systems is very complex for GIS specialists. Thus, we propose in this paper a formalism dedicated to this type of actors; this language gives the capability to describe easily the distribution and the exchanges between applications.

## 1 Introduction

La conception des systèmes télégéomatiques demande un cadre méthodologique formel et structuré. En effet, les méthodes informelles simplement basées sur l'intuition ont « conduit à l'informatisation des problèmes plutôt qu'à l'informatisation des solutions ! » (Lbath, 1997).

La principale spécificité des projets liés aux applications télégéomatiques réside dans le fait que la conception de ce type d'applications implique des acteurs ayant des profils différents. La première grande catégorie d'acteurs est composée des **concepteurs "spécialistes de la géomatique (les géomaticiens)"** : ils sont spécialistes de l'acquisition, de la mise en place, de la présentation et du traitement des informations géographiques. Nous prenons le terme géomaticien au sens large en y incluant les spécialistes des Systèmes d'Information Géographiques (SIG), les géomètres, les géographes... Le rôle de définir les besoins en terme d'information géographique revient principalement aux géomaticiens.

Ils doivent impérativement mener une collaboration étroite avec une deuxième catégorie d'acteurs que nous appellerons les **concepteurs "spécialistes des systèmes communicants (ou bien des télécommunications)"**. Il s'agit d'informaticiens, de spécialistes des réseaux, d'ingénieurs en télécommunication... Les spécialistes de systèmes communicants sont capables de proposer des modules de communications adaptés aux besoins des applications télégéomatiques en choisissant les architectures logicielles et le matériel adéquats. En effet, les problèmes liés aux communications entre les applications télégéomatiques sont souvent très pointus (utilisation de cache, architecture embarquée, mobile...) et nécessitent donc des descriptions détaillées réalisées par des spécialistes.

Ces deux types d'acteurs coexistent naturellement dans les projets de mise en place d'applications télégéomatiques.

Nous pensons donc qu'une méthode de conception dédiée à la télégéomatique doit incorporer deux types de formalismes, un pour chaque typologie d'acteurs.

Un premier formalisme permettra aux géomaticiens de décrire au mieux les applications télégéomatiques en modélisant plus particulièrement les aspects liés à la géomatique, au niveau conceptuel. Ce formalisme doit aussi permettre aux géomaticiens d'exprimer les principaux besoins en matière de communication entre applications. Ils peuvent par exemple décrire la distribution des informations géographiques. Ce formalisme utilisera des abstractions facilement compréhensibles par les géomaticiens.

A partir de ces premières spécifications, les spécialistes des systèmes communicants pourront alors proposer une description détaillée des communications en utilisant un second formalisme réellement adapté à la modélisation des modules de communication.

Il est préférable d'utiliser deux formalismes reposant sur le même paradigme (par exemple orienté-objets) ou/et ayant des notations communes (par exemple UML) afin de faciliter l'interfaçage des spécifications.

S'il existe de nombreux formalismes adaptés aux spécialistes des communications (SDL, UML/RT, ROOM, LOTOS...), il n'en est pas de même des formalismes destinés aux géomaticiens. Il existe des propositions pour décrire plus facilement les données géographiques et ces dernières peuvent être utilisées. Mais aucune

proposition n'existe pour permettre aux géomaticiens, non-spécialistes des systèmes communicants, de décrire la distribution des données, avec des abstractions qui leur soient compréhensibles. Or cette description est essentielle à la phase de description globale du système.

Dans cet article nous ne traitons pas des formalismes destinés aux spécialistes des systèmes communicants, mais nous proposons, un formalisme :

- adapté aux géomaticiens,
- permettant de décrire la distribution et l'échange des données, au niveau de détail qui intéresse le géomaticien (représentation simplifiée par rapport aux spécification des spécialistes des systèmes communicants),
- intégrant en même temps, une extension d'UML pour la géomatique appelé OMEGA (Lbath, 1997).

Ce formalisme fait partie d'une méthode de conception appelée T-OMEGA et destiné à la télégéomatique (Pinet, 2002).

## 2 Formalisme pour la télégéomatique

L'extension d'UML que nous proposons doit permettre aux géomaticiens chargés de la mise en place d'un système de décrire au mieux leurs applications télégéomatiques. A partir des besoins qu'ils ont collecté des utilisateurs, les géomaticiens doivent pouvoir modéliser :

- les aspects liés à la géomatique,
- les principaux besoins en matière de communications entre applications.

Pour permettre la modélisation des besoins en terme de distribution, nous allons maintenant proposer une extension d'UML spécifique.

Les diagrammes de classes peuvent permettre de définir la distribution des objets dans les systèmes. Avec notre extension pour la télégéomatique, le concepteur va aussi pouvoir définir simplement quels types d'objets sont visibles par telle ou telle application. Le mécanisme proposé peut être vu comme une extension des visibilité UML ; dans notre approche, il est possible de définir simplement pour une classe autant de visibilité différentes que d'applications ayant accès aux objets de la classe. Nous allons donc intégrer à l'extension du diagramme de classes définie dans la partie précédente, les concepts suivants :

- les **classes applications** permettant de regrouper les diagrammes de classes par application ; le concepteur pourra ainsi décrire la distribution des informations,
- les **associations de connexion** permettant de décrire les relations entre les applications communicantes,

- les **classes importées** permettant de décrire les objets accédés par des applications distantes ; le concepteur pourra ainsi définir les attributs et opérations des objets, accessibles entre les applications. Nous allons montrer sur un exemple que l'utilisation de classes importées permet au concepteur de visualiser simplement pour chaque application les informations manipulées (en incluant les informations accédées sur des sites distants). Il s'agit, selon nous, de l'atout majeur du type de modélisation que nous proposons.

## 2.1 Classe application

Les classes applications permettent de définir les différentes applications du système télégéomatique à modéliser, selon un découpage choisi par le géomaticien. Chaque classe application est associée à un diagramme de classes. Une relation de composition existe entre une classe application et les classes du diagramme qui lui est associé. Un objet d'une classe application représente une application en cours d'exécution. Cet objet est une composition de tous les objets des classes du diagramme de l'application. Lorsque l'exécution d'une application s'arrête, l'objet application associé meurt avec tous les objets le composant. La figure 1 décrit la représentation d'une classe application ; le diagramme de classes associé est défini à l'intérieur de la classe. La relation de composition entre une classe application et les classes du diagramme associé existe mais n'est pas visuellement représentée par une association. Le nombre maximal d'instances de l'application pouvant exister "en parallèle" durant le fonctionnement normal du système est aussi modélisé. Ce nombre correspond au nombre d'objets de la classe application pouvant coexister en même temps. Les applications peuvent fonctionner de façon concurrentes (sur des "threads" ou des processus distincts) mais elles ne sont pas forcément distantes (deux applications peuvent fonctionner sur le même poste informatique). Le découpage en applications est laissé au choix du géomaticien.

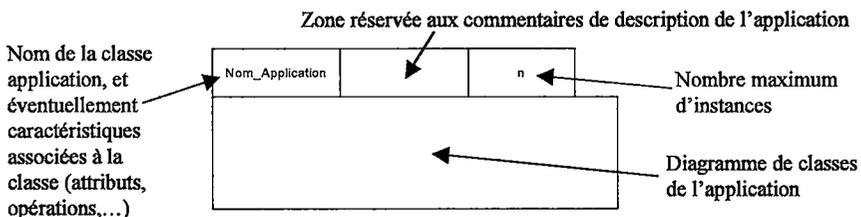


Figure 1 Représentation graphique d'une classe application.

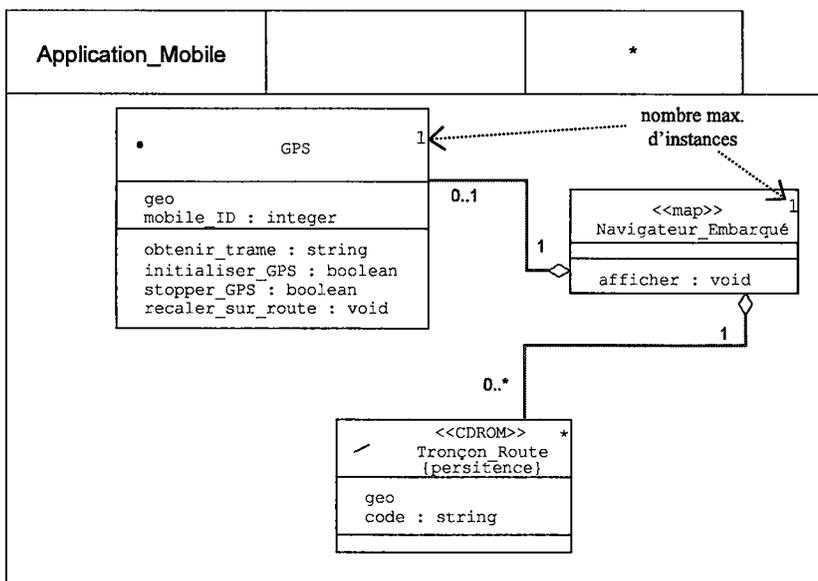


Figure 2 Exemple de classe application.

La figure 2 présente un exemple de spécification d'application embarquée. Chaque application mobile est composée d'un objet logiciel GPS donnant la position du véhicule. Un objet de la classe de regroupement Navigateur\_Embarqué permet l'affichage de la position du véhicule ainsi que des tronçons de routes. Les informations sur les tronçons de routes sont stockées dans chaque application mobile. Une opération recalcr\_sur\_route est présente dans la classe GPS pour recalcr la position du GPS sur la route la plus adaptée. Plusieurs applications mobiles peuvent exister simultanément pendant le fonctionnement du système. Dans le contexte de l'exemple ci-dessus, la valeur taguée {persistance} indique que les instances d'une classe sont stockées sur disque. Des pictogrammes indiquent aussi le type géographique associé aux classes ; il s'agit d'une notation reprise de la méthode OMEGA.

## 2.2 Association de connexion

Les applications sont reliées entre elles par des associations de connexion. Ces associations indiquent qu'une communication est possible entre plusieurs applications ; les objets d'une classe appartenant à une application peuvent accéder aux objets d'une classe appartenant à une autre application. Une classe d'association de connexion est obligatoirement rattachée à chaque association de connexion. Un objet d'une classe d'association de connexion existe si et seulement si les applications, participant à la relation, sont dans un état leur permettant de communiquer entre elles. Donc, si aucun objet d'une classe

d'association de connexion n'existe entre deux applications, les deux applications ne peuvent pas communiquer. Une classe d'association de connexion possède un stéréotype <<connexion>>. Des caractéristiques spécifiques peuvent être attachées aux classes d'association de connexion (des attributs, des opérations...).

La figure 3 présente un exemple utilisant les associations de connexion modélisant un système de repérage de véhicules. Chaque classe d'applications correspond à un type d'application différent. On distingue :

- Les applications mobiles. Plusieurs applications mobiles embarquées dans des véhicules récupèrent leur position par GPS. Dans le système global de repérage, il y a de 0 à  $n$  véhicules à repérer (information fournie par le "nombre maximal d'instances" déclaré dans la classe `Application_Mobile`).
- Les sites de repérage. Chaque véhicule peut être repéré par un site de repérage. Une zone de surveillance est associée à chaque site de repérage. Nous considérons que chacun de ces sites ne repère que les véhicules se trouvant dans sa zone de surveillance. Dans chaque site, les véhicules repérés sont affichés à l'écran sur une carte.
- Le Système de Gestion de Base de Données (SGBD) Géographiques. Chaque site récupère dans une base de données centrale, les coordonnées de sa zone de surveillance, ainsi que les informations géographiques présentées sur la carte qu'il affiche. Dans le système décrit, il n'y a qu'un seul SGBD.



Des classes d'associations de connexion sont donc définies entre les applications :

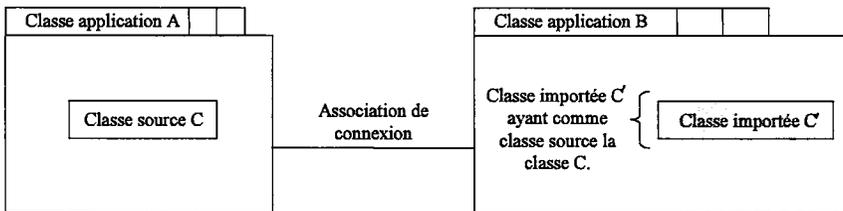
- La classe d'association Connexion\_GSM. Les multiplicités de l'association indiquent qu'à un instant donné, une application mobile peut communiquer avec 0 ou 1 site central ; il s'agit du site central qui repère le véhicule. Aucun site ne repère un véhicule s'il se trouve en dehors de toute zone de repérage. Les sites peuvent repérer de 0 à  $n$  mobiles.
- La classe d'association Connexion\_SGBD. Les multiplicités indiquent que dès le début de leur exécution, chaque site de repérage devra être capable de communiquer avec le SGBD géographique. Il existe donc constamment un objet de la classe d'association de connexion entre l'application SGBD\_Géographique et chaque site de repérage. En ce qui concerne le SGBD géographique, il peut avoir de 1 à  $n$  clients (clientBD).

Nous avons donc abstrait au maximum la description des communications afin de permettre au géomaticien de modéliser plus facilement son système. En résumé, un canal de communication utilisable entre deux applications est décrit par l'instance d'une association de connexion (c'est-à-dire un objet de la classe d'association de connexion). Cette description rend possible la spécification des canaux de communication entre applications indépendamment des détails d'implémentation.

### **2.3. Classe importée**

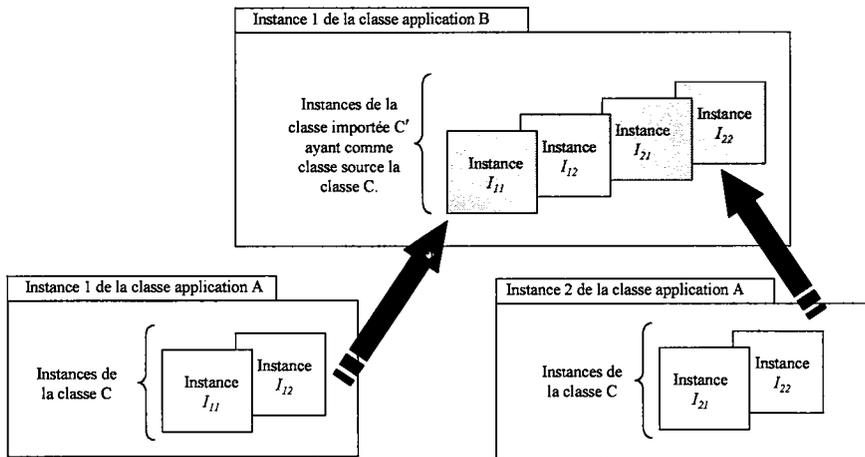
Nous allons donner la possibilité au concepteur d'enrichir la modélisation, toujours en restant à un niveau conceptuel élevé. Dans l'exemple de la figure 3, les regroupements en applications sont décrits ainsi que les connexions entre les applications. Néanmoins, aucune information ne concerne les droits d'accès aux objets distants. Par exemple, la figure 3 ne détaille pas précisément quels objets de l'application mobile peuvent être accédés par des objets d'autres applications. De plus, il peut être intéressant de spécifier quels attributs et quelles opérations seront visibles par les autres applications. Pour répondre à ces besoins, nous allons, dans cette section, introduire un concept fondé sur la notion de classe virtuelle projetée définie dans (Bapat, 1994). Une classe virtuelle projetée permet de définir la visibilité des attributs et des opérations d'une classe appelée classe de base. Chaque objet de la classe virtuelle projetée est (ou correspond à) un objet de la classe de base. Par exemple, les objets des applications distantes souhaitant référencer les objets de la classe de base ne peuvent le faire que par les objets de la classe virtuelle projetée. Les objets de la classe virtuelle projetée vont interdire les accès à certains attributs ou certaines opérations. Dans T-OMEGA, nous proposons de définir le concept de classe importée. Cette notion peut être considérée comme l'adaptation du concept de classes virtuelles projetées à notre formalisme. Les classes importées vont permettre de définir les accès aux objets d'une application à un très haut niveau conceptuel. Dans notre formalisme, les classes de base définies par (Bapat, 1994) seront appelées des classes sources.

**Définition.** Une classe que nous appellerons classe source peut avoir plusieurs classes importées. Chaque classe importée n'est rattachée qu'à une seule classe source. Les classes importées se trouvent généralement dans une application différente de celle de leur classe source. Il faut que l'application de la classe source et l'application des classes importées associées soient connectées (voir figure 4). La déclaration d'une classe importée dans le diagramme d'une application indique que les instances de la classe source associée sont accessibles dans cette application. Référencer, modifier, créer ou détruire un objet d'une classe importée revient à référencer, modifier, créer ou détruire l'objet correspondant de la classe source. En fait, les instances d'une classe importée sont celles de classe source rattachée, hormis le fait que certains attributs et opérations sont devenus privés dans l'application de la classe importée. Les attributs et opérations devenus privés correspondent aux caractéristiques ayant un accès "non autorisées" dans l'application de la classe importée.



**Figure 4** Classe importée et classe source.

Dans un diagramme de classes de T-OMEGA, seuls les attributs et les opérations qui ne sont pas privés apparaissent dans la déclaration d'une classe importée. Les attributs, respectivement les opérations, des classes importées sont appelés attributs importés, respectivement les opérations importées. Durant le fonctionnement du système modélisé, le code d'une opération importée est exécuté par l'application sur laquelle réside la classe source déclarant l'opération. Supposons deux instances d'une classe application A (par exemple deux applications client identiques s'exécutant sur deux postes différents). Une classe C a été définie dans le diagramme de classes décrivant l'application A. Au cours de l'exécution simultanée des deux applications, supposons qu'il existe deux instances (I11 et I12) de la classe C dans la première application, et deux instances (I21 et I22) de la classe C dans la seconde application (voir figure 5). Considérons une instance d'une autre classe application B (par exemple une application serveur). Une classe importée C' a été définie dans le diagramme de classes décrivant l'application B. La classe source de C' est la classe C (C est définie dans le diagramme décrivant l'application A). Ainsi, si les deux instances de l'application A sont en communication avec l'instance de l'application B, alors les instances de la classe importée C' sont les instances I11, I12, I21 et I22 (voir figure 5). Certains attributs et opérations de I11, I12, I21 et I22 peuvent être devenus privés dans l'instance de l'application B. Le concepteur a en effet la possibilité de restreindre les visibilités des attributs ou des opérations d'une classe importée.



**Figure 5** Instances d'une classe importée et instances d'une classe source.

Le concept de classe importée est indépendant du mode d'implémentation choisi. Une classe importée ne correspondra pas forcément à une classe de l'implémentation. Il s'agit d'un concept utilisé par le géomaticien au niveau conceptuel (au cours de l'élaboration des spécifications) pour la modélisation des applications et de leurs communications. Les classes importées permettent, en effet, au géomaticien d'indiquer quelles ressources doivent être accessibles dans telle ou telle application. Elles vont permettre de personnaliser pour chaque application, les caractéristiques des objets distants qui seront ou non visibles.

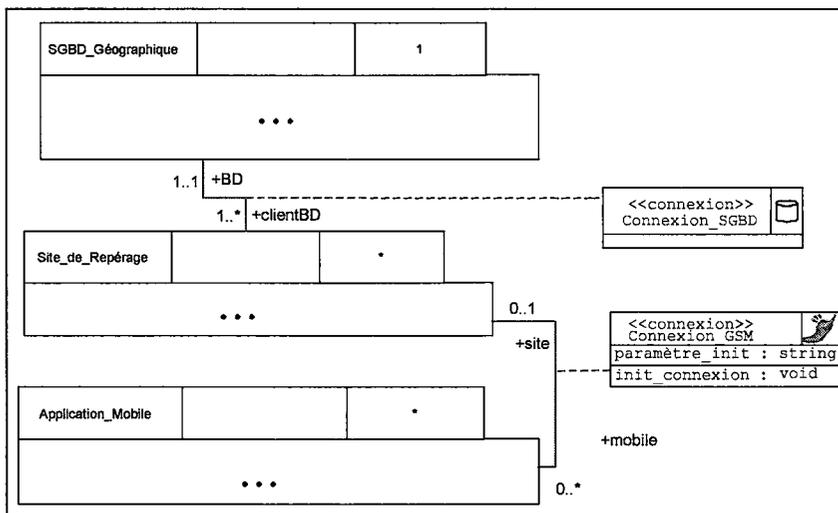
**Exemples d'utilisation.** Considérons une nouvelle version du système de repérage de la figure 3 à laquelle des icônes ont été rajoutées aux classes d'association de connexion, la composition des applications reste identique (cf. figure 6). Les icônes sont utilisées comme références visuelles des classes d'association. La figure 7 ajoute de l'information à la figure 3 en introduisant des classes importées dans les applications des sites de repérage. Les classes importées, en grisées, sont :

Zone\_de\_Repérage\_Site, Ilot\_Site, Tronçon\_Route\_Site et GPS\_Repéré.

Ces classes sont associées à :

- Un stéréotype typant les classes importées par la connexion dont elles proviennent ; par exemple, les instances de la classe GPS\_Repéré proviennent de la connexion GSM. Sur cet exemple, les icônes des classes d'association de connexion de la figure 6 servent de stéréotypes dans les classes importées. Il est bien sûr possible d'utiliser d'autres types de références que des icônes (il est possible d'utiliser des références textuelles, des couleurs...).

- Une valeur taguée {source=...} pour indiquer la classe source des classes importées. Par exemple, la classe importée GPS\_Repéré a comme classe source, la classe GPS. Ce nom peut être précédé du nom de l'application à laquelle la classe appartient (par exemple, {source = Application\_Mobile.GPS}).



**Figure 6** Icônes des associations de connexion.

Sur la figure 7, les attributs de la classe Tronçon\_Route\_Site (application Site\_de\_Repérage) proviennent des attributs de classe Tronçon\_Route (application SGBD\_Géographique). Dans les diagrammes, le concepteur a le choix entre ne pas faire figurer les attributs et les opérations privés dans les classes importées (c'est les cas sur la figure 7), ou utiliser les notations "+" et "-" d'UML pour distinguer ce qui est privé de ce qui est publique.

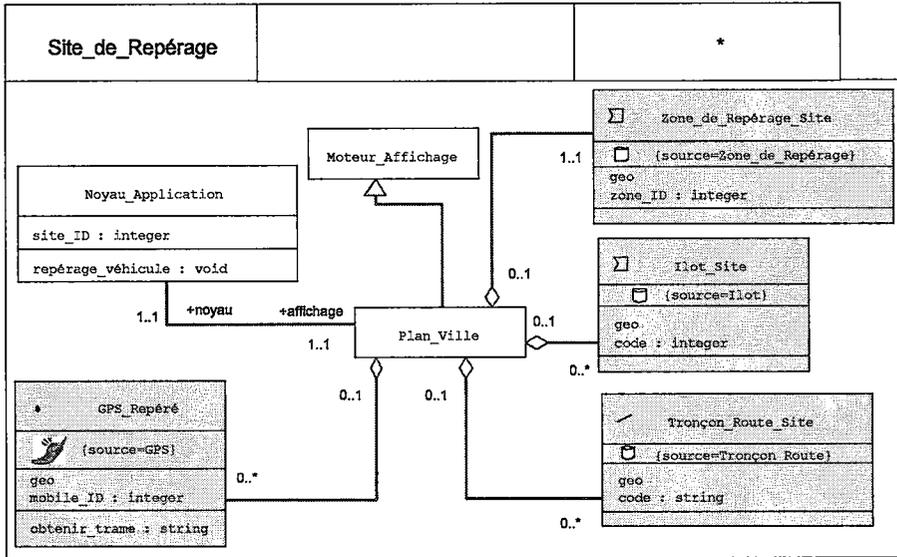


Figure 7 Exemple de la définition de classes importées dans l'application "Site de Repérage".

### 3 Conclusion et perspectives

Nous avons proposé dans cet article, un formalisme destiné aux géomaticiens permettant de spécifier la distribution des données. Ce formalisme fait partie d'une méthode de conception appelée T-OMEGA et destinée à la télégéomatique. En plus du formalisme présenté ici, T-OMEGA intègre une démarche méthodologique de gestion de projet faisant intervenir les deux types d'acteurs considérés (le géomaticien et le spécialiste des systèmes communicants).

Le formalisme de T-OMEGA a été expérimenté sur différents projets et un outil T-AIGLE le supporte (Pinet, 2002 ; Pinet et Lbath, 2003). Ce formalisme vient compléter celui de l'atelier de génie logiciel AIGLE développé par la société CIRIL SA.

Dans les exploitations agricoles, les agro-équipements (mobiles de fait) destinés à la collecte d'informations géoréférencées sur les pratiques impliquent et impliqueront de plus en plus d'applications communicantes. Elles font et feront appels aux concepts présentés dans cet article. Dans l'étude menée au Cemagref, d'une méthodologie pour concevoir la partie communicante des applications informatiques embarquées des agro-équipements, le formalisme T-OMEGA offre

une bonne première piste de réflexion. Des travaux doivent être entrepris pour évaluer et adapter ce type de formalisme pour la conception d'applications informatiques mobiles pour l'agriculture.

## 4 Bibliographie

BAPAT, 1994 – Object-Oriented Networks, Prentice-Hall, New Jersey, 1994, 757 p.

LBATH A., 1997 – AIGLE : Un environnement visuel pour la conception et la génération automatique d'applications géomatiques, Thèse de doctorat, spécialité informatique, INSA de Lyon, 282 p.

PINET F., 2002 – Vers une méthode de conception pour la télégéomatique : intégration et validation au sein d'un atelier de développement, Thèse de doctorat, spécialité informatique, INSA de Lyon, 243 p.

PINET F., LBATH A., 2003 – Object-Oriented Modelling of Communicating GIS-Based Applications, *in: the 6<sup>th</sup> Conference on Geographic Information Science*, Lyon, France.



# Diffusion cartographique via Internet/Intranet avec SVG

## *Cartographic diffusion via Internet/Intranet with SVG*

Pierre MENU

SIMALIS - 43 Avenue Mouliero - 13770 VENELLES  
Tél. : 04 42 54 34 24 - Fax : 04 42 54 83 25  
pierre.menu@simalis.net

**Résumé :** Cet article illustre, par des exemples concrets, la mise en oeuvre de la technologie SVG dans le cadre d'applications de diffusion cartographique via les réseaux Internet et Intranet, en tentant de répondre aux questions qui se posent dès que l'on travaille avec des données vectorielles (sécurité, volume, fonds scannés...).

**Abstract:** This article illustrates, for concrete examples, SVG technology implementation for applications of cartographic diffusion via Internet networks and Intranet, while trying to answer to the questions that arise as soon as we work with vectorial data (security, quantity, digital backgrounds...).

## 1 Présentation

SVG (Scalable Vector Graphics) est une norme issue du W3C dédiée à la représentation d'éléments vectoriels 2D sur Internet.

Basée sur le méta-langage XML, SVG se place en concurrent « normalisé » de Macromédia Flash pour la réalisation de contenus dynamiques sur Internet.

Porté par des éditeurs tels que IBM, Sun, Corel (Corel Draw) et Adobe (Illustrator, Photoshop...) le standard SVG, validé en 2001, intègre la gestion des animations, des rendus graphiques de haute qualité (dégradés, filtres, transparences, lissage...), l'intégration de contenus tiers XML (données ou méta-données) ainsi que des capacités de scripting (Javascript) autorisant la mise en oeuvre d'applications dynamiques complexes.

SIMALIS, par sa double compétence SIG & Internet, a été l'une des premières sociétés à s'intéresser à l'application de cette norme au domaine des SIG.

Par opposition aux outils traditionnels de mise en ligne de données cartographiques, SVG apporte une forte interactivité et une alternative « économique » à la publication de données cartographiques sur Internet, Intranet. Les traitements de zoom et de déplacement sont traités sur le poste client et non

sur le serveur, ce qui réduit le rôle du serveur à celui d'un serveur Web classique et permet ainsi de ne pas avoir une configuration serveur différente de celle nécessaire pour la diffusion de sites Internet.

Bien entendu cette technologie, a priori peu destinée à la géomatique, oblige à s'interroger sur certains points typiquement SIG : la gestion des couches Raster, l'optimisation des échanges entre le client et le serveur (les données vectorielles ont un poids variable selon la densité d'information présente sur une zone), la protection des données...

A travers différents exemples, nous présenterons cette technologie et les solutions mises en œuvre par SIMALIS pour contourner les obstacles :

- Gestion Communale sur Intranet : cadastre et POS,
- Consultation sur Internet des POS généralisés à l'échelle régionale,
- Atlas touristique.

## **2 Introduction : Qu'est ce que SVG ?**

Le standard SVG (Scalable Vector Graphic) a été validé en 2001 par les grands acteurs de l'Internet sous l'égide du World Wide Web Consortium (<http://w3.org>) afin de fournir une solution normalisée de représentation de graphiques vectoriels 2D sur Internet.

Pour les utilisateurs de SIG, SVG représente une formidable opportunité d'utiliser Internet comme moyen de diffusion et de collecte de données.

Il offre les avantages du format propriétaire Macromédia Flash (l'actuel standard de fait), en y ajoutant une forte compatibilité vis-à-vis des autres formats Internet : XML, CSS, DOM.

La norme SVG est soutenue par de grands acteurs informatiques : Adobe, Microsoft, Corel, Bit-Flash, HP, IBM, ILOG, Inso, Kodak, Sun, Apple.

## **3 SVG BUILDER : Publication de cartes SVG**

SVG BUILDER<sup>®</sup> est un logiciel, édité par SIMALIS, conçu pour aider à la publication de cartes SVG à partir de données SIG (Tables MapInfo, Fichiers SHAPE Esri).

Dans le cas de cartes simples, composées de moins de 15000 objets vectoriels, SVG BUILDER permet de publier directement une carte SVG (et son support HTML).

Dans le cas « d'applications cartographiques » dotées de fonctionnalités « métier », interagissant avec des bases de données, SVG BUILDER est utilisé à 2 titres :

- SVG Builder génère les données soit SVG/HTML ou SVG/SQL,
- Le logiciel automatise les mises à jour cartographiques (traitement BATCH).

Les applications présentées ont utilisé comme point de départ des cartes au format du SIG MapInfo et le logiciel SVG BUILDER.

#### 4 SVG : forces et faiblesses

SVG offre de formidables possibilités graphiques : Zoom, Pan, Affichage Vecteur/Raster, atténuation de contours, transparence, dégradés et filtres complexes, interactivité javascript/DOM, animation SMIL, gestion de la souris... Toutes ces possibilités contribuent à rendre les cartes réalisées avec SVG très dynamiques (roll-over) et d'une excellente qualité graphique.

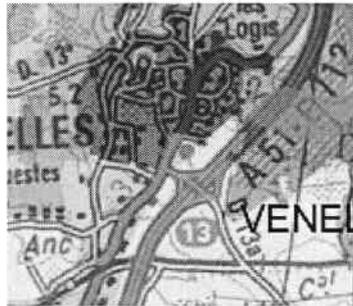


Figure 1 Transparence Raster/Vecteur.

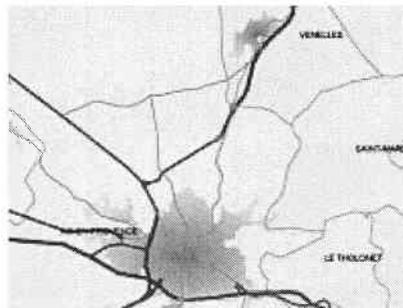


Figure 2 Gestion des dégradés.

#### 5 Gestion des gros volumes

Le chargement préalable des données vectorielles sur le navigateur autorise une navigation fluide dans les données mais contraint le visiteur à télécharger l'ensemble de la carte au préalable, ce qui peut devenir une contrainte rédhibitoire dès que le volume d'information augmente.

La difficulté réside alors dans la gestion de gros volumes d'information. Il est impensable de demander à l'internaute de télécharger une carte de plus de 500Ko avant de la visualiser.

Les deux applications présentées ici ont résolu ce problème de façon différente, l'une par ajout « à la demande » d'éléments SVG dans une carte existante, l'autre en « préparant » à l'avance les 1000 cartes des communes de la région PACA pouvant être demandées.

## **6 Analyse spatiale**

SVG n'est pas un format spécifiquement étudié pour le SIG. Il ne dispose pas de fonctions d'analyse spatiale (zones tampon, croisement de couches, sélection multi couches), obligeant le concepteur à réaliser au préalable ces traitements dans son SIG ou à développer les algorithmes d'analyse spatiale dont il a besoin.

Une solution SVG doit être envisagée lorsque l'on souhaite diffuser des données SIG ou permettre à des utilisateurs distants de mettre à jour la base de données.

Lorsque le SIG sur Internet est développé dans le but de fournir des outils d'analyse spatiale aux visiteurs, il est conseillé d'opter pour une solution basée sur la mise en place d'un réel serveur SIG (MapInfo MapXtreme, ESRI ArcIMS...).

Ces besoins d'analyse sont encore peu utilisés et ne représenteront de toute manière jamais plus de 10% des besoins car ils nécessitent de s'adresser à des utilisateurs SIG confirmés, ceux-ci préférant utiliser un logiciel SIG « classique » pour effectuer leurs études.

## **7 Gestion de couches matricielles (photos aériennes, scans...)**

SVG autorise le calage et l'affichage d'images (GIF,PNG,JPEG : avec gestion de filtres et de transparences) mais n'étant qu'un format de fichier et non un logiciel, il ne peut découper et extraire, en fonction de l'échelle, une image différente.

Une solution consiste à définir une pyramide d'images aux formats WEB, à les caler dans la carte et à rendre visible ou non chaque image en fonction de l'échelle de consultation. Le plug-in de consultation Adobe SVG Viewer 3 charge et affiche dans un premier temps, les données vecteurs sans attendre le chargement des images liées, permettant d'avoir rapidement une visualisation à faible échelle, en attendant le chargement des images.

Il est aussi possible de mettre en oeuvre une application externe, installée sur le serveur, chargée d'effectuer les traitements nécessaires sur les images. Plusieurs solutions sont disponibles sur le marché : IWS par exemple pour traiter les images ECW, MapServer ou toute solution basée sur l'utilisation d'une bibliothèque de traitement d'image. Il est alors possible d'associer l'image ainsi générée aux données SVG vectorielles.

## 8 Protection des données

SVG respecte la norme XML du W3C, le contenu du fichier est donc lisible. Un visiteur est théoriquement capable de récupérer les coordonnées géographiques des objets. Ces réflexions ne s'appliquent bien entendu qu'à la diffusion publique de données sur Internet et non aux systèmes Intranet et Extranet.

Dans la pratique, il est très difficile d'exploiter des coordonnées vectorielles SVG car celle-ci sont souvent modifiées pour s'adapter à l'utilisation Internet et aux contraintes SVG :

SVG utilise un système de coordonnées où l'origine se situe en haut à gauche, les Y doivent donc être transformés en fonction de la hauteur DY des informations affichées dans la carte :  $Y_{svg} = Y - (Y_{max} - Y_{min})$ . Ceci fait perdre le calage en Y des informations, nécessitant de retraiter toutes les informations lues.

Il est aussi courant de rapporter à 0 les coordonnées d'origine des données exportées afin de perdre ainsi tout référentiel dans l'espace. Le système de projection n'est pas connu et la précision des coordonnées est très souvent dégradée pour optimiser la taille du fichier SVG.

Voici par exemple le début de la définitions SVG des coordonnées d'un département français : `d="M735 179011 112 01-1 110 111 21-1 110 11-1 110 11-1 01...`

Le premier couple de coordonnées est exprimé dans un système cartésien déduit de l'emprise de la carte exportée, exprimé en km, les autres sommets sont déclarés en relatif, toujours en km.

Dans le cas de l'application Cadastre/POS, le chargement dynamique des informations à partir de la base de données rend encore plus difficile la capture d'informations, le fichier SVG d'origine ne contenant que les routines de chargement et étant vide de toute information géographique.

SVG BUILDER implémente bien entendu les options de choix de la précision et de l'origine des données exportées et ajoute la possibilité de rastériser les couches vectorielles utilisées uniquement comme fond de plan.

Cette possibilité de rastérisation est intéressante à deux niveaux : elle protège les données de fond de plan vis-à-vis des éditeurs et réduit considérablement la taille du fichier SVG : toutes les informations de fond de plan (route, réseau hydro...) étant fusionnées au sein d'une image de fond calée dans le fichier SVG.

## 9 Présentation de l'application Intranet de consultation de cadastre/POS en SVG

La prestation de SIMALIS intègre les deux utilisations possibles de SVG :

- La fourniture et la formation sur le logiciel SVG BUILDER<sup>®</sup> afin de générer rapidement des cartes thématiques « légères » en SVG.
- Le développement « spécifique » de l'application Cadastre/POS et son installation en Intranet (Apache, PHP, MySQL, SVG, Javascript) permettent alors d'utiliser SVG dans le cadre d'une réelle application SIG sur Internet (Accès SGBDR, Outils cartographiques spécifiques : mesure, sélection multiple..)

## 10 Étude et choix techniques

Après quelques tests sur les données de Saint Martin d'Hères devant être mises en œuvre dans l'application POS/CADASTRE, le volume des données à traiter s'est avéré être supérieur à ce qui pouvait être traité dans un fichier SVG, même compressé.

Le nombre d'éléments SVG à traiter était de l'ordre de 30000 entités, tous thèmes confondus.

Non seulement le fichier résultant, en SVG compressé, dépassait 2 Mo mais l'exploitation de ces données SVG nécessitait des PC puissants dont ne disposaient pas les services de l'urbanisme (zoom, déplacement...).



Figure 3 Chargement des parcelles et des bâtis sur la zone choisie.

Nous avons opté pour une solution utilisant un SGBDR pour stocker les éléments SVG.

Le logiciel SVG BUILDER a été utilisé pour générer la base de données à partir des tables MapInfo.

SIMALIS a ensuite développé un fichier SVG « vide », capable d'appeler un script serveur en lui demandant de lui retourner les éléments SVG correspondant à une région déterminée, sur les thèmes sélectionnés.

Un moteur de calcul d'emprise empêche le renvoi d'information déjà envoyées au navigateur, limitant ainsi les flux de données et filtre les thèmes visibles en fonction de l'échelle.

D'autres fonctionnalités spécifiques ont été développées, tels que le zoom sur la zone et la sélection de toutes les parcelles d'un propriétaire, l'affichage de l'échelle ou un outil de mesure de distance.

Un clic sur une parcelle affiche une fenêtre reprenant les informations issues du fichier MAJIC2 de la DGI ou un clic sur une zone POS permet d'afficher le règlement associé.

## **11 Présentation de l'application Internet de consultation de la carte de vocation des sols**

Cette application, réalisée pour la DRE PACA et le CETE Méditerranée, utilise des cartes SVG statiques, générées par SVG BUILDER et une base de donnée « traditionnelle » afin de suivre les procédures liées aux Plan d'Occupation des Sols.

Une section « Mise à jour », sécurisée, permet aux ayant droit de modifier en ligne les informations communales relatives aux POS : date d'élaboration, date d'opposabilité, procédure en cours... Lors de la modification de ces caractéristiques, les cartes ne sont pas re-générées mais les analyses thématiques disponibles sont automatiquement actualisées.

Une des forces de SVG est de permettre de gérer et de modifier totalement l'apparence des éléments de la carte, en fonction de données externes présentes dans la page HTML. La mise en œuvre d'analyses thématiques multiples ne nécessite alors pas de recharger la carte depuis le serveur.

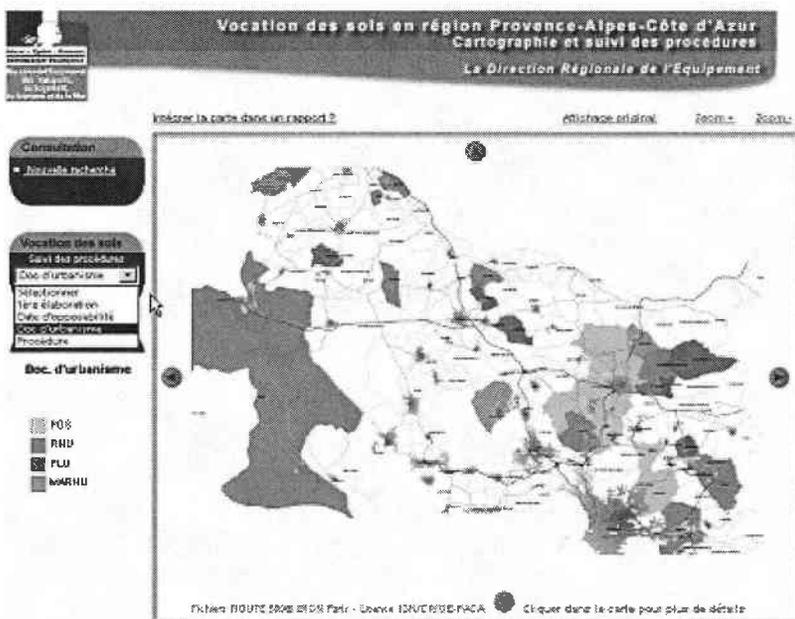


Figure 4 Carte thématique des documents d'urbanisme communaux.

Un clic sur une commune remplace la carte départementale de suivi des POS par la carte de la commune cliquée.

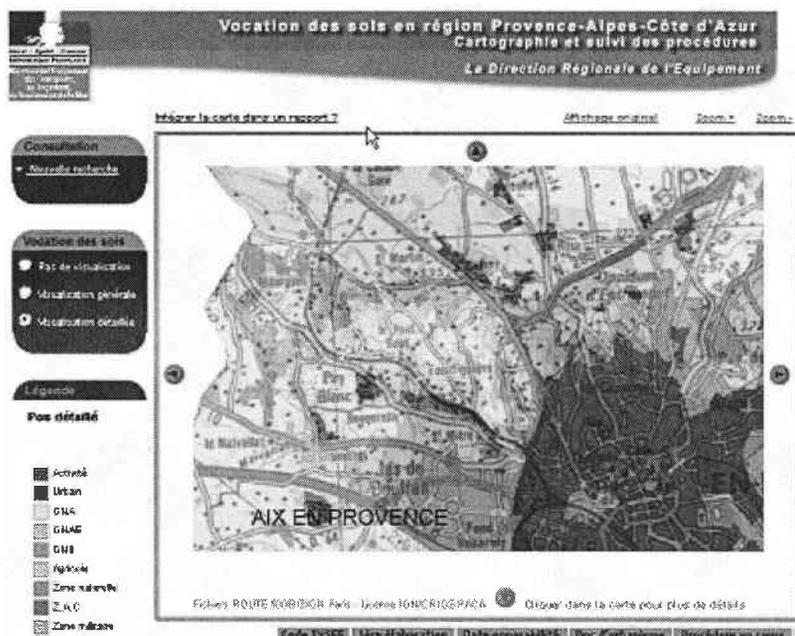


Figure 5 POS généralisé sur fond raster SCAN100® IGN©.

Chaque carte communale à été découpée automatiquement par SVG BUILDER à partir de deux tables MapInfo : les POS généralisés (Vecteur) et le SCAN100© ©IGN (Raster). En une seule opération : 1000 cartes communales ont ainsi été découpées en une nuit.

Les données utilisées pour afficher la coloration dépendante du niveau de généralisation souhaité sont stockées au sein même du fichier SVG, sous forme de balises XML propres à SIMALIS (namespace XML propre à Simalis : smls).

Cette capacité de XML à embarquer des informations propriétaire au sein de fichiers SVG est très intéressante et nous permet dans l'exemple ci-dessous de transporter des données littérales sur chaque polygone SVG afin de les utiliser pour les colorations thématiques ou l'affichage d'information au survol.

Exemple :

```
<path .id="20511" smls: mnf="Gnconst|gNA" class="x3" d="M851606 1842538I-64 87I-
```

## 12 Conclusion

SVG est une technologie très intéressante pour la cartographie on-line, sans pour autant remplacer un serveur d'application géographique dès que l'utilisateur souhaite effectuer de l'analyse spatiale ou gérer de lourds fonds raster.

L'utilisation mixte d'un SGBDR et du format SVG permet d'élaborer de réelles applications SIG Internet : le premier autorise le stockage et l'indexation de grandes quantités d'information, le second permet un affichage de grande qualité et une interactivité importante entre la carte et l'internaute.



Cet ouvrage propose la restitution  
des communications des journées scientifiques  
du réseau RÉGLIS du Cemagref ayant eu lieu  
les 13 et 14 novembre 2003 à Montpellier.

Ces journées ont eu pour objectif de faire un bilan  
des avancées scientifiques sur la mise en place  
de systèmes d'information à références spatiales (SIRS)  
au sein des équipes du Cemagref, tant au niveau  
des méthodes d'analyse et de conception,  
qu'au niveau des outils permettant d'assister  
les concepteurs et les thématiciens.

ISBN 2-85362-641-5

Prix : 19 euros TTC



9 782853 626415