



**HAL**  
open science

# MÉTHODOLOGIE D'EXPLOITATION QUANTITATIVE DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES D'INONDATION DE PLAINE

Damien Raclot

► **To cite this version:**

Damien Raclot. MÉTHODOLOGIE D'EXPLOITATION QUANTITATIVE DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES D'INONDATION DE PLAINE. Modélisation et simulation. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2003. Français. NNT: . tel-00003257

**HAL Id: tel-00003257**

**<https://theses.hal.science/tel-00003257>**

Submitted on 14 Aug 2003

**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.

UNIVERSITE MONTPELLIER II  
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ MONTPELLIER II

*Formation Doctorale : Sciences de la Terre et de l'Eau*

*École Doctorale : Sciences de l'eau dans l'environnement continental*

présentée et soutenue publiquement par

**Damien RACLOT**

le 24 juin 2003

**TITRE**

---

**MÉTHODOLOGIE D'EXPLOITATION QUANTITATIVE DES  
PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES D'INONDATION DE PLAINE**

---

**JURY**

<b>Jean-Michel Grésillon</b>	<b>Professeur, détaché au Cemagref de Lyon</b>	<b>Président du jury</b>
<b>Denis Dartus</b>	<b>Professeur à l'IMFT, Toulouse</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Guy Flouzat</b>	<b>Professeur à l'U.P.S., Toulouse III</b>	<b>Rapporteur</b>
<b>Michel Desbordes</b>	<b>Professeur à L'UM II, Montpellier</b>	<b>Directeur de thèse</b>
<b>Gérald Garry</b>	<b>Chargé de mission au Ministère de l'Équipement</b>	<b>Examineur</b>
<b>Odile Papini</b>	<b>Professeur à l'université de Toulon et du Var</b>	<b>Examinatrice</b>
-----		
<b>Claude Millier</b>	<b>Directeur scientifique de l'ENGREF</b>	<b>Membre invité</b>
<b>Christian Puech</b>	<b>Directeur de recherche, Cemagref de Montpellier</b>	<b>Membre invité et Encadrant de la thèse</b>

Thèse préparée au sein de l'Unité Mixte de Recherche "Structures et Systèmes Spatiaux"  
Cemagref / ENGREF, Montpellier



## **REMERCIEMENTS**

*En préambule, je tiens à mentionner que cette thèse n'aurait pas pu voir le jour sans un financement accordé par le CNRS et la région Languedoc-Roussillon. Que ces deux institutions reçoivent en retour toute ma reconnaissance.*

À l'issue de ces trois années de doctorat, nombreuses sont les personnes à qui je dois beaucoup. Je tiens donc à leur adresser mes plus sincères remerciements. En espérant ne pas trop en oublier, je citerai :

Christian Puech, pour m'avoir ouvert la voie, soutenu et accompagné tout au long de ce travail. Ses relectures et nos longues discussions ont fortement contribué aux résultats de ce travail ;

Michel Desbordes, pour avoir joué, pour une dernière fois peut-être, le rôle de directeur de thèse (à moins que le contexte actuel de réforme des retraites....) ;

l'ensemble des membres du jury, qui ont accepté de juger ce travail, et tout particulièrement Guy Flouzat et Denis Dartus qui ont eu la charge d'en être les rapporteurs ;

les membres de mes comités de pilotage pour le soutien et l'aide constructive qu'ils m'ont apportés : Claude Millier, Laurent Gazul, André Paquier, Philippe Lagacherie, Robert Jeansoulin et Gilles Lechapt ;

l'équipe hydrologie-hydraulique du Cemagref de Lyon, et tout particulièrement André Paquier, pour son assistance dans l'utilisation de Rubar20 ;

les personnes qui m'ont mis à disposition des jeux de données : Bernard Dartau du CG34, Jean-Michel Cornet du Cetmef, Olivier Braud de la Diren Languedoc-Roussillon, M. LAURIOL et ses prédécesseurs de la DDE 34, le personnel du Service de la navigation Nord-Est de Nancy ;

les membres du projet REVIGIS, seniors et junior, avec qui j'ai eu l'occasion de collaborer. Une mention particulière à Éric, Odile et Robert qui se sont frottés de très près à l'application Hérault, et à Nic Wilson qui a mis beaucoup d'énergie et d'enthousiasme dans le partage de ses idées ;

Gilles Lechapt, puis Sylvain Labbé, pour leur accueil au sein de l'Unité Mixte de Recherche "Structures et Systèmes Spatiaux" dans des conditions générales très favorables. Que les informaticiens maintes fois sollicités reçoivent également leur part de reconnaissance ;

l'ensemble des membres de l'unité : permanents, stagiaires et hôtesse d'accueil. Une attention particulière à Isa, François, Mouss pour leur bonne humeur ; Christophe, Pascal, Momonne et Anne qui ont participé, de près ou de loin, à l'élaboration de "l'approche-photo", enfin à Nicolas et Julien qui ont partagé mon bureau. Pour eux, le chemin qui mène à la soutenance est encore long, la pente rude, mais qu'ils se rassurent, la route est droite...

Enfin je finirai pas les personnes qui sortent du contexte immédiat de ce travail : ma famille proche et étendue (et notamment à Gabrielle pour l'amélioration de l'orthographe de la partie bibliographique), mes amis et bien sûr Christine...



## RÉSUMÉ

Le fort caractère distribué des problématiques environnementales, dont l'analyse de l'aléa inondation de plaine fait partie, fait de la télédétection une source inestimable de données d'observation. La contrepartie de la quantité d'informations fournies réside, en revanche, dans les fortes imperfections inhérentes à ces données. Pour cette raison, l'intégration de la télédétection dans les approches classiques, souvent déterministes (*e.g.*, la modélisation hydraulique), se retrouve fortement limitée dans la pratique.

Le cœur de ce travail réside dans la mise au point d'une méthodologie d'exploitation de photographies aériennes prises en période de crue pour en extraire, au moment de la prise de vue, la cote de l'eau en tout point de la plaine (après découpage de la plaine en compartiments, entité surfacique assimilable à des casiers, *i.e.* une seule cote de l'eau par compartiment).

La méthodologie proposée, appelée "approche-photo", comporte une phase de traitement de télédétection (extraction de données depuis les clichés aériens), une phase d'analyse spatiale et de structuration de l'information dans un SIG, et une phase novatrice et originale de fusion et mise en cohérence de l'ensemble des données extraites (développement d'un algorithme de mise en cohérence inspiré de l'hydraulique et de techniques empruntées au domaine de l'intelligence artificielle). La méthode a été mise en œuvre et testée sur trois sites d'étude, couvrant un panel très large de contextes, que ce soit en terme de données photographiques, de morphologie, de dynamique de crue ...

Un travail important de validation et d'analyse de sensibilité a permis de montrer que la précision des estimations de la cote de l'eau, produites pour chaque compartiment sous forme de fourchette [Min, Max], était de l'ordre décimétrique, résultat tout à fait compatible avec les exigences hydrauliques. "L'approche-photo" constitue donc une valorisation quantitative des archives photographiques concernant les crues historiques.

La première retombée de "l'approche-photo" provient de la structuration de ces résultats au sein d'un SIG, ce qui les rend facilement mobilisables pour toutes les étapes de la gestion du risque d'inondation.

La seconde retombée, bien plus importante, résulte des possibilités d'articulation de "l'approche-photo" avec les approches traditionnelles. L'étude de la complémentarité avec la modélisation hydraulique a été approfondie par la mise en œuvre d'un modèle 2D (rubar20, logiciel développé par le Cemagref de Lyon) sur la basse vallée de l'Hérault. Une confrontation des résultats a permis de mettre en avant les apports réciproques : "l'approche-photo" comme aide à la structuration, au calage et à la validation de la modélisation et, à l'inverse, la modélisation hydraulique comme aide à la validation de "l'approche-photo".

Ce travail de thèse se situe à l'intersection de différentes disciplines : l'hydraulique, le traitement de l'information spatiale (analyse spatiale, télédétection et SIG) et une branche de l'intelligence artificielle (représentation de la connaissance avec des problèmes de fusion de données, de mise en cohérence et des problèmes de satisfactions de contraintes). Dans un sens, il se veut une illustration de l'intérêt d'une démarche multidisciplinaire.

**Mots-clés :** Inondation – plaine d'inondation – photographie aérienne – télédétection – hydraulique – modélisation – analyse spatiale – qualité – fusion – mise en cohérence – problème de satisfaction de contraintes

## ***ABSTRACT***

Because of the distributed nature of environmental issues, as floodplain inundation, remote sensing appears as a powerful earth observation system providing a great quantity of spatial data. However, because of some data quality problems, remote sensing integration/ assimilation process in traditional methods, as deterministic hydraulics modelling, is strongly limited in practise.

The main aim of this work is to develop a methodology to get profits on aerial photographs taken during flooding. More precisely, it consists in extracting water level at any points of the floodplain when photographs were taken. For that, floodplain is first split into compartments in which water level is supposed to be uniform.

The suggested methodology, called "photo-approach", begins with a remote sensing step (*i.e.*, data extraction from aerial photograph), continues with a spatial analysis and a GIS structuration step, and ends with an innovative and original step consisting in fusion and consistency handling of the whole of the extracted data (algorithm linking hydraulics and artificial intelligence techniques). The method was tested on three sites of study, covering a very broad panel of contexts in term of photographic data, morphology, flood dynamics....

An important work of validation and sensitivity analysis proved that precision of water levels estimates, produced for each compartment in the form [Min, max ], were of decimeter order. This results appear to be completely compatible with hydraulic requirements. The "photo" approach thus constitutes a quantitative valorization of the photographic archives concerning the historical floods.

The first repercussion of the "photo" approach comes from the SIG databases structuring, which generates an easy access to results for all steps of the flood risk management. The second repercussion, much more important, results from possible linkage between the "photo-approach" and traditional approaches. The complementarity study with hydraulic modelling was made with a 2d model (rubar20, software developed by the CEMAGREF of Lyon) on the Hérault river valley. A confrontation of the results shows mutual contribution : 1) "photo" approach for an assistance with the structuring, the parametrization and the validation of hydraulic modelling; 2) on contrary, hydraulic modelling for an help with the "photo" approach validation.

This thesis is at the intersection of various disciplines: hydraulics, spatial data processing (spatial analysis, remote sensing and SIG) and a branch of the artificial intelligence (knowledge representation with of data fusion problems, consistency handling and constraints satisfaction problem). In a sense, it may appears as an illustration of the interest of a multidisciplinary approach.

**Key-words** : flood – floodplain – aerial photographs – remote sensing – hydraulics – modelling – spatial analysis – quality – fusion – consistency – constraints satisfaction problem

## **TABLE DES MATIÈRES**

<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>1</b>
<b>PARTIE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>7</b>
1. Du risque d'inondation à l'analyse de l'aléa.....	9
2. L'analyse de l'aléa par télédétection .....	31
3. Modélisation et données spatiales .....	63
<b>PARTIE II : SUJET DE THÈSE ET SITES D'ÉTUDE .....</b>	<b>87</b>
4. Sujet de thèse .....	89
5. Sites d'étude et données recueillies .....	93
<b>PARTIE III : MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE D'EXPLOITATION DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES PRISES EN CRUE.....</b>	<b>107</b>
Avant-propos .....	109
6. Extraction des informations de Télédétection .....	111
7. Le "flooding problem".....	123
8. Mise en cohérence hydraulique.....	133
<b>PARTIE IV : APPLICATIONS ET ILLUSTRATIONS DE "L'APPROCHE-PHOTO" SUR LES TROIS SITES D'ÉTUDE.....</b>	<b>151</b>
9. Phase de télédétection .....	153
10. Phase de mise en cohérence .....	171
<b>PARTIE V : DISCUSSIONS .....</b>	<b>179</b>
11. Validation.....	181
12. Analyse de sensibilité .....	197
13. Confrontation de "l'approche-photo" avec la modélisation hydraulique sur le site Hérault.....	205
14. Bilan et perspectives pour "l'approche-photo" .....	215
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>225</b>

Références bibliographiques	231
<b>ANNEXES .....</b>	<b>241</b>
<i>Index des figures</i>	279
<i>Index des tableaux</i>	283
<i>Sigles et abréviations</i>	284

# **Introduction générale**



## CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

### L'inondation de plaine

L'ampleur des dommages liés aux inondations récurrentes de ces dernières années (crue au Bangladesh et en Chine en 1998, crue du Grand Sud en novembre 1999 avec 31 morts, crue de la somme et de l'Ille-et-Vilaine au printemps 2001...) a mis à jour, de manière un peu brutale, les lacunes de gestion dans le domaine du risque d'inondation. Une voie d'amélioration de la gestion du risque lié à ces phénomènes naturels passe par une meilleure compréhension des processus<sup>1</sup> mis en jeu. Le développement de modèles appropriés (en terme de processus, de temporalité et de prise en compte du spatial) est alors nécessaire [Zerger, 2002].

Dans cet effort de gestion du risque d'inondation, la **plaine d'inondation** représente un enjeu fondamental puisqu'elle est le lieu d'une activité humaine très importante, qui n'a fait que croître au cours du dernier siècle. Dans ce milieu, l'inondation provient d'un débordement plus ou moins exceptionnel du cours d'eau qui sort de son lit mineur pour se répandre dans un lit majeur. La priorité, en terme de connaissance de l'aléa, réside dans la **caractérisation des écoulements hydrauliques (ou hydrodynamiques)**, *i.e.*, la façon dont l'excédent d'eau va se propager. Comme, en général, les plaines sont larges et supportent de nombreuses infrastructures humaines (digues, routes, maisons, ...), les écoulements naturels sont rendus extrêmement complexes. Dès lors toute caractérisation autre que spatialisée (ou distribuée) paraît inadéquate :

*The distributed nature of the inundation problem requires a distributed solution [Romanowicz et al., 1996].*

### Intérêt de la télédétection pour la modélisation distribuée de phénomènes difficilement observables

Pour de multiples raisons (problème de mobilité pendant l'événement, de coût, d'entretien, de défaillance d'appareils automatiques type limnigraphes ...), les données concernant l'observation de la crue pendant l'événement sont souvent limitées à des informations ponctuelles et très peu denses dans l'espace. Ainsi toutes les tentatives de caractérisation de l'aléa souffrent de ce manque de données :

*In the environmental sciences, where field measurement is critical for both boundary condition specification and model evaluation, obtaining a measurement relevant and accurate may be difficult [Lane, 1998].*

Les modélisations hydrauliques mathématiques 2D ou même 3D d'ores et déjà disponibles (*e.g.*, [Amighetti et al., 1994; Paquier et Sigrist, 1997; Bates et al., 1998b; Bates et al., 1998c; Hervouet, 2000; Connell et al., 2001; Horritt et Bates, 2002]) se heurtent alors à d'énormes et délicats problèmes de **validation** et de **calage de ses paramètres** :

*For all these tasks we require a model capable of accurately predicting spatially distributed estimates of hydraulics variables such as water depth and flow velocity. A fundamental constraint to the development of such a model is the lack of suitable calibration and validation data sets. Whilst it is now possible to develop high space/time resolution prediction schemes, current data capture techniques do not allow the utility of such developments to be fully assessed [Bates et al., 1997].*

---

<sup>1</sup> Au sens de "changement dans le temps de matière, d'énergie ou d'informations" (Miller J. A. *Living systems*. Behavioral science, 1965, vol. 10, n° n°3-4, p. 103-411).

La modélisation hydraulique des crues se trouve confrontée au problème d'**équifinalité** qui peut-être le résultat d'une sur-paramétrisation du modèle et d'un manque de données disponibles pour le calage [Beven, 1989]. Cette situation, correspondant à un système sous-contraint, conduit à l'existence d'une multitude de jeux de paramètres solutions et à un questionnement sur la validité des phénomènes physiques modélisés à l'intérieur de la plaine d'inondation.

Dès lors, la disponibilité de données de **télé-détection spatiale** pendant l'événement constitue une possibilité unique d'observer l'inondation dans toute sa dimension spatiale. De nombreux articles montrent l'intérêt pratique de la télé-détection pour caractériser l'inondation de la plaine au moment de la disponibilité de l'image [Doridot et Garry, 1987; Bates et al., 1997; Smith, 1997; Horritt, 2000]. Il ressort de ces études que la valorisation des images se restreint la plupart du temps à la détermination de la surface inondée alors que certaines des images contiennent une richesse d'informations sur l'état de la plaine qui va bien au-delà. Pour dépasser le simple traitement "local et statique" de l'image, il est nécessaire de coupler ces images avec d'autres données et d'impliquer fortement l'objectif thématique de l'application dans chaque phase du traitement des images [Puech, 2000]. Dans notre cas, pour dépasser la simple caractérisation "inondé ou non inondé", **il convient d'intégrer ces images avec d'autres sources de données dans un véritable processus d'analyse spatiale guidé par le fonctionnement hydraulique de la plaine.**

### Une difficile prise en compte du spatial

Le premier frein dans la prise en compte du spatial a incontestablement reposé sur des **limitations techniques d'acquisition et de gestion de données géographiques**. L'apparition de la **géomatique**, et notamment des **Systèmes d'Information Géographique (SIG)**, ainsi que le fort développement de la **télé-détection** au cours de ces quinze dernières années, ont fortement desserré ces contraintes. Les bases de données environnementales se sont multipliées, permettant l'accès à un ensemble disparate, mais très large, de données physiques (géographie, morphologie, hydrologie, topographie, occupation du sol) indispensables à la caractérisation des inondations de plaine. Les modélisations véritablement distribuées de l'aléa se sont alors multipliées, trouvant là une possibilité de représenter finement le milieu physique. Deux problématiques majeures se posent alors.

**La première**, récurrente dans tout processus de construction de la connaissance, provient de la volonté récente de prendre pleinement en compte la dimension spatiale. Une question nouvelle, liée à **la structuration de l'espace** pour construire des **modèles adéquats**, apparaît alors inévitablement :

- Quel **découpage de l'espace**, et quelles **relations fonctionnelles** entre les divers éléments, faut-il retenir pour la modélisation ?

Cette question est celle du choix, *a priori*, d'un **niveau d'abstraction de la réalité** adéquat avec un phénomène que l'on cherche à reproduire mais qui est mal connu. En effet, les capacités d'observations et de mesures spatialisées des phénomènes hydrologiques (*i.e.*, variables hydrologiques d'intérêt) n'ont pas évolué aussi rapidement que celles liées à la caractérisation physique du bassin versant et de la plaine d'inondation (*i.e.*, paramètres de description). Les dispositifs de mesure des variables sont, en effet, toujours concentrés en quelques points particuliers (*i.e.*, exutoire de bassin versant, station hydrographique...). Ce questionnement conduit inévitablement vers l'**analyse spatiale** qui s'attache à "*l'étude formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace produit et vécu par les sociétés humaines*"<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> <http://www.cybergegeo.presse.fr/hpt/tabhome.htm>

*La seconde* est liée aux nombreuses imperfections qui entachent les informations géographiques disponibles pour alimenter les modèles spatiaux de fonctionnement (*i.e.*, paramètres et/ou variables). Les données extraites des images de télédétection, en tant que résultat d'une transformation imparfaite de l'information radiométrique en variable d'intérêt, ne dérogent pas à cette règle. Il devient nécessaire de trouver un moyen efficace de prendre en compte la nature de ces données, très nombreuses, mais de source et de qualité<sup>3</sup> très variables [Würbel, 2000]. L'indispensable mélange de telles données géographiques, dans le but de répondre à un objectif précis, soulève les interrogations suivantes :

- quelle représentation commune de la **qualité des données spatiales** faut-il adopter alors que les sources d'imperfections sont multiples et difficilement quantifiables ?
- comment **fusionner** des données **hétérogènes** en terme d'origine et de qualité pour qu'elles puissent être utilisées dans un même schéma d'analyse ?
- comment, en cas de contradiction entre données, **réviser** la base de données pour la rendre **cohérente** ?

Si la voie "royale" est d'adapter la collecte des données spatiales jusqu'à ce qu'elles atteignent une qualité suffisante pour répondre aux attentes des schémas classiques de représentation des processus, une voie **complémentaire** consiste à essayer d'adapter la schématisation des processus aux données existantes [Maidment, 1996]. Cette démarche alternative revient à repenser le niveau de complexité des **relations fonctionnelles pour les rendre compatibles avec la nature des informations disponibles**.

Ces questionnements s'apparentent étroitement aux thématiques traitées dans les domaines de la **représentation de la connaissance** et du **raisonnement qualitatif** (techniques de fusion et révision, raisonnement dans l'incertain, ordres de grandeur, graphes causaux, problèmes de satisfaction de contraintes...), souvent classés dans une nouvelle discipline appelée **intelligence artificielle**.

Cette première analyse fait apparaître un besoin de rapprochement entre des domaines aussi variés que l'hydraulique, la télédétection, l'analyse spatiale (SIG inclus), et certaines nouvelles techniques mathématiques (souvent issues de l'intelligence artificielle). La recherche d'une unification entre ces différentes "disciplines" constitue, très certainement, un intérêt majeur de ce travail.

### **OBJECTIF DE LA THÈSE**

Alors que les approches classiques d'analyse de l'aléa souffrent d'un déficit très prononcé en données d'observations de crues, le constat de la richesse des photographies aériennes prises pendant les inondations, et de leur faible valorisation, est à l'origine de ce travail. Dans ce contexte général, l'objectif principal de la thèse est le **développement d'une méthodologie originale d'exploitation des photographies aériennes prises en période de crue afin de fournir des données quantifiées facilement accessibles pour la gestion du risque d'inondation et les approches traditionnelles (*i.e.*, approche hydrogéomorphologique et modélisation hydraulique numérique)**.

Plus précisément, l'approche retenue vise à appréhender l'état hydrodynamique de la plaine inondée au moment de la prise des clichés. Son propos est de transformer la vision 2D de la crue, offerte par les photographies aériennes, en une caractérisation des niveaux d'eau en tout point de la plaine (*i.e.*, description 3D de l'état de remplissage de la plaine).

---

<sup>3</sup> Une définition de la qualité est donnée au § 3.2.1.1, p 67.

En favorisant clairement la dimension spatiale de l'inondation au détriment de sa dimension temporelle, elle vise à produire une connaissance distribuée et quantifiée des niveaux d'eau à un instant unique de la crue. Sa vocation n'est donc pas de se substituer aux approches existantes (*i.e.*, principalement modélisation mathématique hydraulique et approche hydrogéomorphologique), mais plutôt d'offrir une voie complémentaire. À l'issue du développement méthodologique, ce travail s'attache alors à l'étude de cette complémentarité afin d'évaluer l'apport de l'intégration/assimilation des photographies aériennes prises en période d'inondation.

### ***PLAN DU MÉMOIRE***

Le survol rapide du contexte et des problématiques soulevées par les inondations de plaine a été trop rapide et général pour s'en contenter.

Aussi, l'objectif de **la première partie** de ce document est de reprendre cette analyse afin de l'approfondir. Le **chapitre 1** revient sur les besoins en terme d'analyse de l'aléa "inondation de plaine" en favorisant le contexte réglementaire français. Il inclut également une présentation et une critique des méthodes existantes en la matière. Le **chapitre 2** s'attache, quant à lui, à présenter une synthèse des utilisations de la télédétection aérienne et satellitaire dans le domaine des inondations de plaine. Il aborde le potentiel des images prises en dehors des crues pour accéder aux caractéristiques physiques de la plaine, puis celui des images prises pendant la crue pour caractériser directement l'événement inondant. Les possibilités, mais également les difficultés, du couplage et de l'assimilation de telles données dans les modèles classiques sont ensuite répertoriées. Le **chapitre 3** met l'accent sur la prise en compte de la dimension spatiale dans la modélisation finement distribuée. Après une présentation rapide des Systèmes d'Information Géographique, il revient sur la représentation des imperfections des données spatialisées et sur les problèmes posés par le traitement conjoint d'informations de qualité disparate. Il expose ensuite quelques éléments de réflexion sur le choix du niveau de représentation de l'espace dans la modélisation, pour finir sur les problèmes de raisonnement qualitatif et de résolution de problèmes de satisfaction de contraintes.

Dans une très courte **seconde partie**, nous revenons sur le sujet de cette thèse pour en donner des précisions et pour définir la démarche méthodologique (*cf.*, **chapitre 4**). Le **chapitre 5** présente ensuite les différents sites d'étude.

La **troisième partie** expose la méthodologie proposée, appelée "**approche photo**". Cœur de cette thèse, elle est divisée en trois chapitres pour bien distinguer l'extraction des données de télédétection (*cf.*, **chapitre 6**), la philosophie de traitement conjoint des données extraites (*cf.*, **chapitre 7**), puis la méthode développée pour leur mise en cohérence (*cf.*, **chapitre 8**).

La **quatrième partie** traite l'application de "l'approche-photo", sur les trois sites d'étude retenus. L'objectif est à la fois d'illustrer la démarche, mais également de tester son champ d'application. Pour plus de clarté, les démarches d'extraction des données de télédétection (*cf.*, **chapitre 9**) et de mise en cohérence (*cf.*, **chapitre 10**) sont bien séparées.

La **cinquième et dernière partie** est entièrement consacrée à la discussion. Les délicats problèmes de **validation** et d'analyse de **sensibilité** y sont abordés dans un premier temps (*cf.*, **chapitre 11** et **chapitre 12**). Le **chapitre 13** s'intéresse à la **complémentarité** de "l'approche-photo" avec la **modélisation hydraulique** à travers la mise en œuvre d'un modèle bidimensionnel (logiciel rubar20 développé par le Cemagref de Lyon) sur la basse vallée de l'Hérault. Pour finir, le **chapitre 14** tire un bilan des intérêts, limites et perspectives de "l'approche-photo" proposée.

# **PARTIE I :**

## **Synthèse bibliographique**

**Chapitre 1 : Du risque d'inondation à l'analyse de l'aléa**

**Chapitre 2 : L'analyse de l'aléa par télédétection**

**Chapitre 3 : Modélisation et données spatiales**

## Sommaire de la PARTIE I

<b>1. DU RISQUE D'INONDATION À L'ANALYSE DE L'ALÉA .....</b>	<b>9</b>
1.1. Le risque d'inondation .....	9
1.2. Différentes approches de l'aléa de plaine .....	14
1.3. Conclusion .....	29
<b>2. L'ANALYSE DE L'ALÉA PAR TÉLÉDÉTECTION .....</b>	<b>31</b>
2.1. La télédétection spatiale et aérienne .....	31
2.2. Informations accessibles à partir des données de télédétection prises hors contexte de crue.....	35
2.3. Informations accessibles à partir des données de télédétection prises en contexte de crue .....	42
2.4. Couplage télédétection / analyse de l'aléa.....	50
2.5. Conclusions.....	59
<b>3. MODÉLISATION ET DONNÉES SPATIALES .....</b>	<b>63</b>
3.1. Systèmes d'Information Géographique (SIG) et aléa inondation .....	63
3.2. Quelques problèmes posés par le traitement de l'information géographique.....	66
3.3. Réflexion sur la modélisation spatiale.....	75
3.4. Pistes d'inspiration pour la valorisation des images de télédétection en crue.....	81

# 1. Du risque d'inondation à l'analyse de l'aléa

Ce premier chapitre a deux objectifs principaux. Le premier est de replacer les attentes en terme de caractérisation de l'inondation de plaine (phénomène physique naturel appelé aléa) dans le contexte plus général de gestion du risque d'inondation (*cf.*, § 1.1). Le second est de présenter les approches traditionnelles d'analyse de l'aléa afin d'en faire émerger : 1) les intérêts et limites (*cf.*, § 1.2) ; 2) les priorités en terme de recherche (*cf.*, § 1.3).

## 1.1. Le risque d'inondation

### 1.1.1. Ampleur

*Au niveau mondial*, le risque d'inondation reste aujourd'hui le risque naturel le plus répandu, faisant le plus de victimes et de dégâts [Pottier, 1998]. Il contribue pour 58% dans le nombre de victimes et pour 31% dans le montant des pertes économiques [Berz, 2000]. Tous les pays ou presque sont touchés, même si les pays en voie de développement le sont plus gravement du fait de la conjonction fréquente d'une situation climatique et socio-économique très défavorable. Les exemples observés en 1997 et 1998 (tiré de [Hingray, 1999]) aux quatre coins du globe en témoignent : en juillet 1997, 600 000 hectares sont inondés en Europe Centrale par les crues du Danube et de l'Oder (Le monde du 25/07/97) et tuent plus de 100 personnes ; en août 1998, 70% du territoire de Bangladesh sont submergés par le Gange (Le Monde 24/09/98) et en Chine, 21 millions d'hectares sont noyés par les crues du fleuve Bleu et du fleuve Jaune, ce qui affecte 240 millions d'habitants (Le Courrier International du 27/08 au 2/09/98) ; en Octobre 1998 enfin, sept pays d'Amérique Centrale sont touchés consécutivement au passage du cyclone Mitch. Une présentation plus complète de ces événements est consultable dans [Berz, 2000]. En août 2002, de nouvelles crues ont touché tout le centre de l'Europe.

*Au Niveau français (métropole)*, les inondations représentent le risque naturel le plus coûteux (2 milliards de francs de dommages moyens annuels) [MATE, 2001], même si moins de 10 % de son territoire est concerné. Par exemple sur la période 1982-1995, 66% des indemnités de catastrophes naturelles ont été versées au titre des dégâts directs causés par les inondations (soit 18.31 milliards de francs sur 27.8 milliards de francs selon la Fédération Française des sociétés d'assurances) [Gendreau et al., 1998b], somme qui ne prend pas en compte les conséquences des impacts indirects tels que les atteintes à la santé, les ruptures de services... Au cours de cette période, se sont succédées des crues rapides et mortelles (Grand-Bornand en juillet 1987 avec 23 morts ; Nîmes en octobre 1988 avec 11 morts ; Vaison-la-Romaine en septembre 1992 avec 34 morts) et des crues de plaine plus lentes et donc moins mortelles mais tout aussi dommageables sur le nord de la France (bassin de la Somme, de la Marne et de la Meuse pendant les hivers 1981-82, 1982-83, 1993-94, 1994-95). Plus récemment, on peut énumérer les crues du Grand Sud (novembre 1999 avec 31 morts), de la Somme (hiver 2000), en Bretagne (printemps 2001) et dans le Gard (septembre 2002 avec 24 morts).

### 1.1.2. Définition

Chez les spécialistes de l'étude des risques, il est désormais courant de définir le **risque** comme la résultante du croisement entre aléa et vulnérabilité [Desbordes, 1997]. Pour le risque d'inondation (cf., Figure 1-1), l'**aléa** représente le phénomène naturel aléatoire traduit par le débordement du cours d'eau et l'extension de l'eau dans le champ d'inondation. La **vulnérabilité** transcrit quant à elle la sensibilité de l'occupation du sol et de la société au phénomène d'inondation [Pottier, 1998]. Elle comprend intrinsèquement une notion d'acceptabilité, au sens socio-économique, des dommages potentiels encourus [Gendreau et al., 1998b].

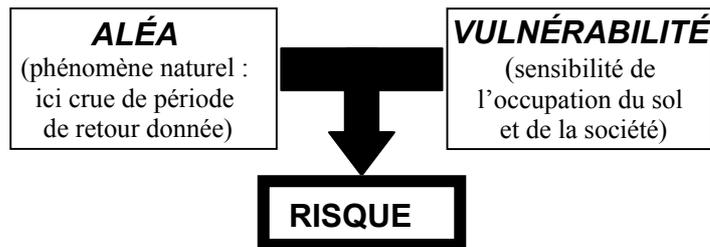


Figure 1-1 : décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité

Il n'est pas envisageable, pour une société, de se protéger pour tous les niveaux de risque. Elle doit donc définir un niveau de risque acceptable où les *événements* naturels extrêmes et leurs conséquences devront être tolérés [Gilard, 1995] : le "risque zéro n'existe pas". Cette notion de risque dit "naturel" est quelque peu trompeuse puisqu'elle englobe une importante composante humaine.

*Remarque : cette définition du risque d'inondation englobe uniquement les impacts négatifs de la crue sans prendre en compte les nombreux effets bénéfiques qu'elles génèrent (cf., [Pottier, 1998] p38-39 pour une énumération partielle de ces effets).*

### 1.1.3. Typologie des risques d'inondation

A l'exception de phénomènes rares de rupture de digue ou de barrage, l'inondation est toujours le résultat de précipitations intenses (et/ou de fonte de neige). Selon la nature du processus aboutissant à l'inondation (origine, dynamique temporelle et spatiale), il est classique de distinguer trois grands types de risques d'inondation, qui, dans la réalité, se retrouvent souvent combinés.

**Le risque d'origine pluvial** est le résultat d'un processus de ruissellement suite à des précipitations violentes sur des surfaces de faible taille. Il est généré par des phénomènes localisés dans l'espace (quelques km<sup>2</sup> à quelques dizaines de km<sup>2</sup> au maximum) et le temps (quelques heures). Si les zones exposées sont de faible extension, elles peuvent être malheureusement très peuplées. De plus, le temps de réaction à l'événement est faible. L'exemple type est l'inondation produite par dépassement de capacité des réseaux d'assainissement pluvial en milieu urbain (e.g., Puisserguier en 1996).

**Le risque fluvial** est le résultat de débordement exceptionnel de cours d'eau en plaine, généralement caractérisé par des montées lentes des eaux et des vitesses d'écoulement modérées sur des surfaces de faibles pentes (e.g., région rhénane fin 1993 et début 1995, Somme printemps 2001). Les zones exposées constituent généralement des secteurs de forte extension sur lesquels l'homme s'est implanté depuis longtemps.

**Le risque torrentiel** est le résultat de débordement exceptionnel de cours d'eau de montagne, généralement caractérisé par des montées rapides des eaux et des vitesses d'écoulement élevées sur

des surfaces de fortes pentes (*e.g.*, crue de l'Ouvèze à Vaison-la-Romaine en septembre 1992). Les zones exposées sont souvent limitées mais la violence et la rapidité du phénomène le rend particulièrement dangereux.

#### 1.1.4. Évaluation

L'évaluation du risque d'inondation passe par la caractérisation séparée de l'aléa et de la vulnérabilité que l'on croise par la suite.

L'**aléa hydraulique** est souvent défini à l'aide de la seule variable de hauteur de submersion, les autres variables étant considérées comme ayant des effets négligeables sur le milieu ou strictement liées à la hauteur maximale [Torterotot, 1993]. Cependant, en fonction du contexte et de la nature de la vulnérabilité, d'autres variables peuvent lui être combinées ; les principales sont la vitesse d'écoulement pour des questions de mobilité humaine [Garry et Grassin, 1994b; Pacaud, 1996] ou le couple (durée - fréquence de submersion) pour des questions d'atteinte aux cultures et bâtiments [Desbos, 1995].

L'évaluation de la **vulnérabilité** est très délicate car une partie des dommages d'une inondation n'est pas quantifiable (perte en vies humaines, angoisse face à l'événement, stress, inquiétude, perte de souvenirs, ...) : ce sont les dommages intangibles, qui sont opposés aux dommages tangibles. D'après le Flood Hazard Research Center, la contribution des dommages intangibles, si l'on se réfère à la perception des pertes par les sinistrés, est d'une valeur au moins égale à celles des dommages tangibles directs, à savoir les dommages matériels ([Torterotot, 1993]). Pour contourner le problème, on suppose bien souvent de façon très grossière la proportionnalité entre dommages intangibles et dommages tangibles directs, ce qui rend suffisante la seule évaluation de ces derniers.

Pour croiser les deux résultats précédents, deux solutions ont été développées. La plus fréquente est une approche socio-économique des crues par l'établissement (éventuellement à la parcelle) de courbes *coût des dommages / fréquence de l'aléa*. L'analyse fréquentielle de l'aléa repose souvent sur la seule hauteur de submersion [Torterotot, 1993; De Jonge et al., 1996] considérée, d'après [Hubert et Ledoux, 1999], comme "le paramètre le plus significatif pour expliquer le montant des dommages". A l'inverse, la méthode "Inondabilité" [Gilard, 1998] propose de transcrire la vulnérabilité à travers des variables de caractérisation de l'aléa (hauteur, durée et fréquence). Plus précisément, la comparaison est effectuée sur une période de retour : celle de l'occurrence de la première crue débordante (notée TAL) et celle liée à l'objectif de protection de la parcelle (notée TOP, obtenue par transformation du risque maximal acceptable négocié pour la parcelle).

#### 1.1.5. Mesures de gestion du risque d'inondation

L'ampleur du risque d'inondation en France et dans le monde nous éclaire sur les fortes motivations de tous les acteurs impliqués dans la mise au point de mesures de réduction de ce risque. Cependant n'oublions pas que le cours d'eau est le lieu de nombreux usages socio-économiques qu'il faut satisfaire. Ainsi, les mesures de gestion devront également prendre en compte les contraintes imposées par le maintien d'une richesse écologique et d'une ressource en eau suffisante (eau potable, activité de baignade, activité sportive aquatique ...).

Une première typologie possible des modes de gestion du risque d'inondation découle directement de la dichotomie du risque en aléa et vulnérabilité. Elle conduit à différencier :

- *les mesures structurelles* visant à modifier l'aléa par des mesures techniques (construction d'un barrage, la rectification de la section d'un cours d'eau, édification de digues ... ) ;
- *les mesures non structurelles* qui agissent sur la vulnérabilité en cherchant à réduire les dommages potentiels soit de façon pérenne hors contexte de crise (contrôle de l'occupation du sol et de son usage), soit en réaction directe à l'événement (prévision, annonce de crue, organisation des secours...).

Une deuxième typologie, qui semble plus intéressante, redistribue les précédentes mesures selon trois champs d'intervention (*cf.*, Figure 1-2) : culture du risque (volet communication), prédétermination et prévention du risque (volet aménagement et réglementation), prévision et alerte (volet gestion de crise) [Gilard, 1998].

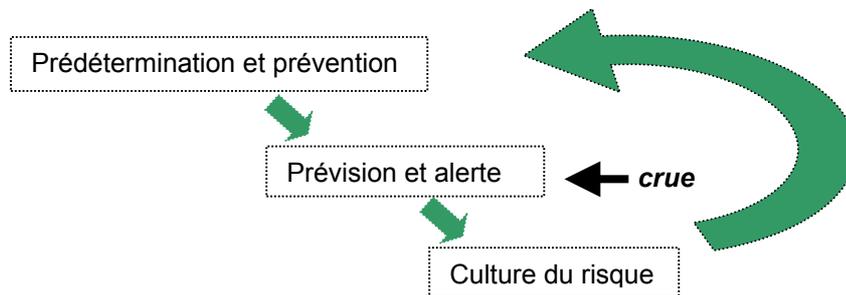


Figure 1-2 : les trois modes de gestion du risque d'inondation

Une politique efficace de gestion du risque d'inondation utilise une combinaison, très tributaire du contexte local, de mesures appartenant à ces trois domaines d'intervention.

### 1.1.6. Attentes réglementaires et échelle de travail : cas de la France

En France, les attentes sont de plus en plus fortes depuis que la loi française prévoit que les documents réglementant l'occupation du sol (POS : Plan d'Occupation des Sols, schéma d'aménagement, ...) doivent prendre en compte les risques naturels (article L 121-10 du code de l'urbanisme). Par ce fait les PPR (Plan de Prévention des Risques, résultat de la politique française de prévention des risques naturels, loi du 2 février 1995) deviennent des servitudes d'utilité publique et doivent être annexés au POS. Pour éviter les conflits lors de la négociation de ces plans, il semble difficile de s'affranchir d'une caractérisation de l'aléa et de la vulnérabilité à une échelle plus grossière que celle du POS (*i.e.*, au 1/5000, échelle de la parcelle cadastrale) surtout en présence d'enjeux dits "importants" [MATE/METL, 1997].

### 1.1.7. Intérêt d'une gestion multi-échelles spatiales cohérente

"La notion de risque est spatialisée" [Gilard, 1995]. L'analyse des différents modes de gestion le montre bien puisque les procédures correspondantes intègrent une multiplicité d'échelles spatiales ainsi que d'acteurs [Decrop, 1995]. Or selon les échelles auxquelles sont prises les solutions, des conflits peuvent apparaître [Deutsch, 1997]. Compte tenu des fortes interactions spatiales émanant du processus physique de transfert de l'eau de l'amont vers l'aval, le problème lié aux inondations doit être considéré à l'échelle adaptée à ces transferts : le bassin versant [Gilard, 1998].

*Selon les lois de l'hydrologie, l'eau qui passe dans la rivière est la conséquence des pluies tombées sur l'ensemble du bassin versant : c'est littéralement un volume tombé*

*du ciel qui est imposé au système. Les lois de l'hydraulique montrent ensuite que l'on ne fait que transférer dans le temps et l'espace le volume en question [Gilard, 1995].*

L'échelle pertinente pour la planification de la politique de gestion du risque d'inondation est donc le bassin versant, mais une **vision multi-échelles** des problèmes [Consuegra et Vez, 1997] est nécessaire si l'on veut coordonner de façon cohérente les diverses actions qui ont lieu à l'échelle locale, échelle de l'aménagement et de la réglementation.

Cette vision multi-échelles permet également d'étager le niveau d'analyse de l'aléa et de la vulnérabilité en terme de moyens et précision [MATE/METL, 1997; Dagorne et al., 1999]. Le niveau global à l'échelle du bassin versant permet d'identifier les secteurs à risque qui exigent une analyse localement approfondie. Cet étagement se base avant tout sur une analyse historique des situations [Desbordes, 1997]. Si cet approfondissement technique (hors contexte décisionnel) à un niveau local pose apparemment peu de problèmes pour l'analyse de la vulnérabilité, la continuité spatiale amont-aval impose, pour l'analyse de l'aléa, une réflexion sur l'extension de la zone d'étude du fait des interactions entre le local et le global (e.g., étude globale des impacts d'un aménagement local).

### 1.1.8. Intérêt de la carte dans la gestion du risque d'inondation

Étant donné la forte composante spatiale du risque, **le rôle de la carte** devient central. Ainsi selon [Givone, 1998], "le document cartographique est celui qui met le mieux en évidence la situation de risque naturel d'une portion de territoire". Il contribue à l'ensemble des modes de gestion du risque d'inondation. Selon [Ledoux, 1994], les trois objectifs majeurs de l'utilisation de cartes dans l'étude des risques naturels sont d'informer pour sensibiliser et constituer une mémoire ; d'éclairer les choix de prévention et de protection ; et de réglementer pour maîtriser l'urbanisme et la construction.

### 1.1.9. Conclusion

Le choix d'une politique de gestion du risque d'inondation est complexe car, outre le fait qu'elle doit satisfaire les contraintes imposées par d'autres usages du cours d'eau (essentiellement ressource en eau et écologie), elle fait appel à une problématique multi-acteurs, à un emboîtement d'échelles spatiales, à des notions sociales de perception du risque. Ce choix passe inévitablement par une évaluation préalable du risque dont l'objet est d'améliorer la connaissance des phénomènes le régissant en réduisant l'incertitude globale inhérente à leur caractérisation [Zerger, 2002]. En effet, notre connaissance du risque est très imparfaite dans la mesure où "les incertitudes restent grandes, tant pour la connaissance des aléas que pour celle de la vulnérabilité" [Deutsch, 1997] et de fortes attentes apparaissent à l'échelle fine de la réglementation et de l'aménagement.

*La suite de ce travail portera uniquement sur l'analyse de l'aléa inondation de plaine, et ne se rapportera donc qu'au seul risque fluvial. Il se focalisera sur la composante prévention (e.g., réglementation) et prédétermination (e.g., scénarios d'aménagement), c'est à dire sur une vision à long terme (hors contexte de crise) qui satisfait les attentes à l'échelle locale.*

## 1.2. Différentes approches de l'aléa de plaine

Bien que certains concepts généraux énoncés ici restent valides pour les inondations torrentielles et pluviales, le discours est axé volontairement sur les inondations de plaine, c'est à dire sur les processus à dynamique temporelle plutôt lente et à dynamique spatiale plutôt complexe du fait d'une forte présence anthropique. Ce volet relève des disciplines de la géographie physique et de l'hydraulique.

### 1.2.1. La plaine d'inondation

#### 1.2.1.1. Description physique

La plaine d'inondation (ou plaine alluviale), objet central de notre étude, se situe au sein du bassin versant (*cf.*, Figure 1-3). Elle peut être définie comme "la terre bordant un cours d'eau, faite des sédiments déposés lors de débordements du cours d'eau et sujette à l'inondation au moment de la crue" (<http://www.granddictionnaire.com/>). Elle est traditionnellement divisée en trois éléments morphologiques différents : le lit mineur (ou permanent) occupé en permanence par les eaux ; le lit majeur saisonnier (ou périodique ou moyen), inondé à peu près tous les ans ; le lit majeur exceptionnel (ou épisodique), où l'écoulement ne s'effectue que lors de grandes crues (*cf.*, Figure 1-4). Le terme "lit majeur" seul ou "champ d'inondation" sera employé dans la suite pour le lit majeur exceptionnel.

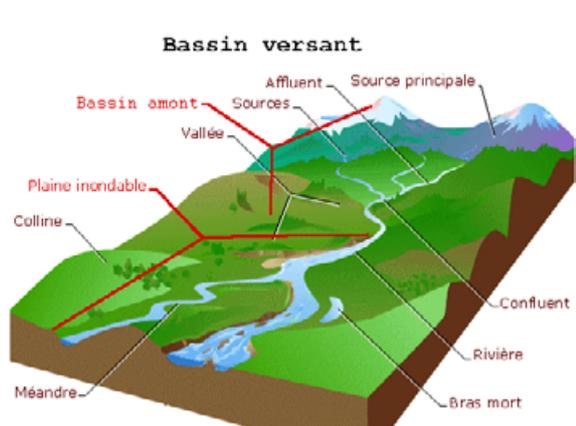


Figure 1-3 : la plaine d'inondation au sein du bassin versant  
(tiré et adapté de l'Encyclopédie Encarta)

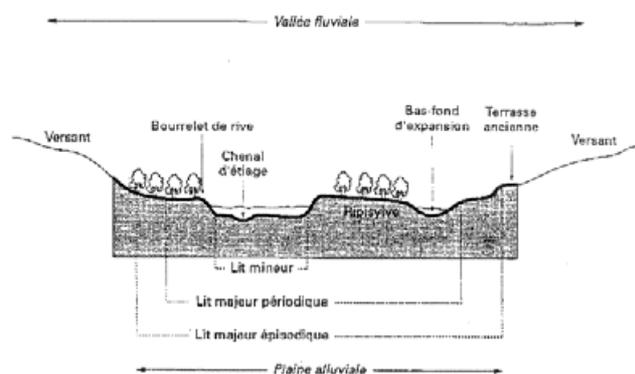


Figure 1-4 : coupe transversale de la plaine d'inondation  
(d'après [Amoros et Petts, 1993])

#### 1.2.1.2. Processus mis en jeu

Dans cette plaine alluviale, l'inondation dite de plaine est le résultat d'un excédent d'eau qui aboutit au débordement du lit mineur et à la submersion du lit majeur. Sauf cas exceptionnel (*e.g.*, rupture de barrage) l'origine de cet excédent d'eau provient de précipitations. Les processus mis en jeu lors de la transformation de la pluie en débit dans le cours d'eau sont très nombreux et complexes. **Seul le processus de transfert (appelé propagation ou hydrodynamique) dans le lit majeur de la plaine alluviale, qui relève du domaine de l'hydraulique à surface libre en régime très majoritairement fluvial, sera abordé dans ce travail.** Le domaine de l'hydrologie, regroupant entre autres l'étude des processus de production et de transfert dans la partie amont du bassin versant, ne sera abordé qu'indirectement pour définir les conditions aux limites amont du système "plaine d'inondation".

### 1.2.1.3. *Le risque d'inondation : un enjeu de taille*

La plaine d'inondation représente de toute évidence un enjeu majeur en terme de gestion du risque d'inondation car elle est le siège d'une activité anthropique très intense. Sous l'impulsion de multiples facteurs (croissance démographique et industrielle, méconnaissance des risques, attractivité des plaines d'inondation en terme d'accessibilité, richesse des sols ...), la vulnérabilité y a explosé au cours du dernier siècle. On estime par exemple que 80% des constructions dans les zones soumises aux inondations ont été réalisées après les années 1950 [Garry, 1994a]. La plupart de celles-ci se trouvent sans aucun doute dans ces plaines alluviales.

Pour faire face à cette croissance non maîtrisée de la vulnérabilité, les mesures structurelles (*e.g.*, édifications de digues) se sont multipliées. Cependant, des analyses erronées, lorsque celles-ci n'étaient pas totalement absentes, sur leurs incidences au niveau du bassin versant (amplification des crues trop souvent constatée à l'aval) ont conduit à les discréditer. Si bien que la politique française de prévention des risques tend aujourd'hui à limiter ces mesures structurelles aux conséquences mal maîtrisées au profit d'une approche basée sur les mesures non structurelles [Pottier, 1998]. La **prévention** est ainsi devenue un des objectifs prioritaires aujourd'hui en France, marquant le passage obligé par le zonage réglementaire, c'est-à-dire la cartographie de "*la plus forte crue connue et, dans le cas où celle-ci serait plus faible qu'une crue centennale, cette dernière*" [MATE/METL, 1999].

### 1.2.1.4. *Une propagation souvent complexe*

La présence d'éléments d'origine anthropique (habitations, ouvrages de protection ou encore de voies de communication) n'a fait que modifier et compliquer les processus de propagation des eaux dans le lit majeur. En terme de gestion du risque, "*il est clair que, tant dans le domaine des inondations que dans le domaine des pollutions, la connaissance des phénomènes est largement insuffisante*" [Deutsch, 1997]. Il est donc important d'apporter des améliorations concernant une meilleure compréhension des processus mis en jeu et le développement de modèles appropriés (en terme de processus, de temporalité et de prise en compte du spatial) [Zerger, 2002].

### 1.2.1.5. *Une nécessaire prise en compte des incertitudes*

Cela est particulièrement vrai dans l'évaluation de l'aléa, puisque, selon [Desbordes, 1997], "*il est clair qu'au stade actuel de nos connaissances, l'estimation des aléas est entachée d'incertitudes significatives qui devraient inciter à la prudence en matière d'aménagement de cours d'eau ou d'urbanisation dans leurs lits majeurs*". Dans un inévitable contexte de prise de décision de la part du gestionnaire, l'hydrologue ou l'hydraulicien se doit de communiquer au gestionnaire un résultat incluant les incertitudes et limitations associées [Hervouet et Van Haren, 1996] qui soit compréhensible par le gestionnaire. Cette nécessaire prise en compte des incertitudes rejoint la vague de critiques à l'encontre des modélisations purement déterministes<sup>4</sup> dans le domaine de l'hydrologie [Beven et Binley, 1992; Ambroise, 1999]. Cependant la multiplicité des sources d'imperfections (données, hypothèses des modèles, schéma de résolution numérique ...) conduisant aux incertitudes fait émerger une problématique de recherche majeure.

---

<sup>4</sup> les modèles purement déterministes supposent que toutes les variables d'entrée et tous les paramètres du système sont connus exactement. Cette notion est parfois opposée à la notion de modèle stochastique qui tient compte des imperfections sur la connaissance des variables d'entrée et des paramètres en les représentant comme des variables aléatoires.

### 1.2.2. Caractérisation de l'aléa de plaine

Le choix d'une stratégie d'étude de l'aléa dépend directement des moyens (temps, données, capacité de calcul, budget ...) à disposition mais aussi et surtout de l'objectif recherché. Au sein même de la gestion du risque d'inondation, ces objectifs sont très variés (cartographies informatives pour développer la culture du risque, cartographie réglementaire, prévision des zones et voies de communication submergées, choix de scénarios d'aménagement...). Ils conditionnent les variables recherchées (hauteur, durée, vitesse, fréquences...); la forme (qualitatif à quantitatif) et la précision requises pour ces variables; l'emprise et la finesse de discrétisation spatiale (objet élémentaire de caractérisation); la dynamique temporelle (inter événement ou intra-événement); la nécessité ou non de caractériser des événements non observés (prévision / prédétermination); ...

Dans ce contexte, il n'est pas étonnant d'être confronté à une multitude d'approches de l'aléa. Toutes complémentaires et s'imbriquant les unes dans les autres, leur présentation s'appuie sur le découpage suivant :

- Approche historique (analyse d'observations d'événements passés);
- Approche hydrogéomorphologique;
- Approche modélisation hydraulique (et hydrologique).

### 1.2.3. L'approche historique

Le terme "approche historique" sera employé pour désigner toute valorisation **d'observations** de crues récentes ou anciennes. Cela comprend aussi bien la reconstitution d'une chronologie des crues sur un secteur géographique afin d'allonger les chroniques la concernant (*e.g.*, [Lang et al., 1998]) que l'étude approfondie d'une crue historique particulière.

Si l'on exclut les données issues de télédétection spatiale (partie développée § 2.3), les observations mobilisables (ce qui nécessite leur archivage) proviennent soit de limnigrammes, soit de repères de crues, soit de témoignages.

#### 1.2.3.1. Les limnigrammes :

C'est l'information la plus fréquente car elle est le produit du seul dispositif pérenne d'observations du cours d'eau : les stations limnimétriques qui mesurent, de manière **ponctuelle** mais **continue** (stations automatisées), la hauteur d'eau en fonction du temps. Une loi de tarage, qui définit la relation entre le débit et la hauteur d'eau mesurée au droit de la station, permet d'accéder au débit en fonction du temps.

Placés uniquement dans le lit mineur du cours d'eau, le coût et l'entretien de tels dispositifs limitent leur emplacement. Ainsi la distance qui les sépare est rarement inférieure à une dizaine de kilomètres. En dehors des quelques défaillances, survenant malheureusement souvent pendant les événements extrêmes qui nous intéressent, la précision<sup>5</sup> de la mesure est de 1 à 10 cm pour la hauteur et de 10 à 20 % pour le débit (sauf, pour certaines sections où la loi de tarage perd toute validité au dessus d'un certain seuil de hauteur). Le principal intérêt de cette mesure, ponctuelle et en faible nombre, réside donc dans sa continuité temporelle et non dans sa distribution spatiale.

---

<sup>5</sup> sauf mention contraire, les chiffres communiqués dans cette synthèse bibliographique sur les incertitudes et la précision des données proviennent de (Cetmef et Cete, 2001) et sont récapitulés en Annexe 1; la précision y est vue comme l'erreur quadratique moyenne (écart-type).

### 1.2.3.2. *Les "laisses" de crues*

Sous ce vocable sont regroupées toutes les indications de **hauteurs maximales** atteintes par une crue, observées à des endroits quelconque de la plaine d'inondation. Elles proviennent de traces (herbes, branches, boues, humidité) laissées par les eaux et sont souvent référencées dans le temps de manière imprécise (rarement en deçà de la journée). Pour être exploitables, ces traces doivent être nivelées, transformées en un triplet (X,Y,Z) et archivées (*cf.*, Annexe 2). Pour les phénomènes extrêmes, elles sont parfois matérialisées (marque de peinture, plaque, ...) pour entretenir la culture du risque. Ces marques sont d'autant plus visibles que la crue est récente. Leur fiabilité est très variable. De manière très globale, l'ordre de grandeur moyen de leur précision est de 20 à 30 cm en altimétrie (*cf.*, Annexe 1). Parmi ces laisses de crue, seul un petit nombre présente une très bonne fiabilité et une précision inférieure au décimètre (*e.g.*, laisses nettes sur certaines maisons, sous certains ponts). Ce sous-ensemble sera appelé "repères" de crue.

### 1.2.3.3. *Les témoignages*

Les témoignages de personnes présentes sur le site au moment de l'inondation (habitants, secouristes, ...) peuvent fournir des témoignages très intéressants sur le fonctionnement de la crue, permettant ainsi d'accéder à des variables qualitatives ou quantitatives. Le problème de ces données se pose en terme de recueil (enquête de terrain lourde) et surtout de fiabilité. Ainsi est-il important de recouper les divers témoignages, mais aussi de récupérer, stocker et archiver tout document susceptible de les conforter (*e.g.*, photographies ou vidéographies). Malheureusement, le travail de recueil pour ce type de données n'est pas systématique, et celui d'archivage et de mise en cohérence quasiment toujours inexistant. Dans ce domaine, rappelons toutefois les travaux de [Lang et al., 1998].

## 1.2.4. **L'approche hydrogéomorphologique**

### 1.2.4.1. *Philosophie*

L'approche hydrogéomorphologique correspond à "une première phase d'analyse des milieux naturels et anthropisés des vallées. Elle est basée sur une approche naturaliste, qui vise à mettre en évidence les différents lits des cours d'eau, les diverses implantations susceptibles de perturber les écoulements, en les accélérant ou en les ralentissant, et à en déduire les zones inondables ainsi que des valeurs approchées des paramètres physiques de l'inondation" [METL/MATE, 1996].

L'identification des différents lits des cours d'eau repose sur une approche très géographique, mêlant morphologie, sédimentologie et occupation traditionnelle du sol afin de délimiter, au sein des plaines alluviales, les unités hydrogéomorphologiques, c'est-à-dire les zones qui sont exposées à des crues fréquentes, rares, ou exceptionnelles et celles qui ne sont jamais submergées comme les terrasses anciennes (*cf.*, Figure 1-5). Cette méthode relève d'une **approche inter-événementielle** puisque l'hypothèse qui la sous-tend repose sur le fait que les crues historiques successives ont suffisamment façonné le paysage des vallées (de manière directe ou indirecte) pour que les traces laissées permettent de décrire des unités hydrogéomorphologiques pouvant être mises en adéquation avec des paramètres hydrologiques et hydrauliques.

Sa philosophie est d'accéder à une représentation conceptuelle du fonctionnement de la plaine en inondation pour en déduire, in fine, un zonage du risque d'inondation par un schéma non quantitatif (qui s'apparente à une démarche d'indicateurs), rapide et peu cher (valorisant les données existantes).

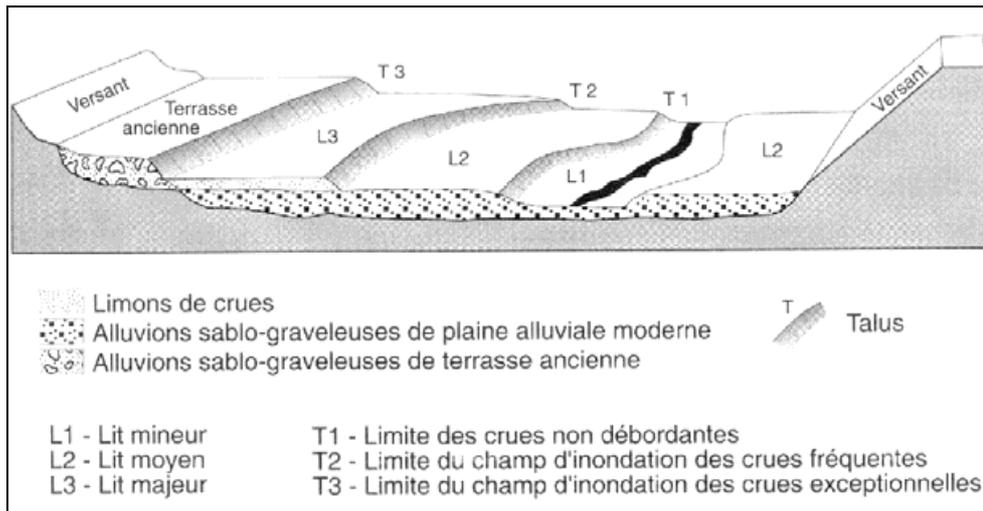


Figure 1-5 : unités hydrogéomorphologiques et niveaux d'exposition à l'aléa associés (d'après [METL/MATE, 1996])

#### 1.2.4.2. Informations requises

Les informations requises par cette approche sont principalement la morphologie, l'occupation / utilisation du sol et des informations de sédimentologie. Puisque la philosophie de l'approche est privilégier les données existantes, les niveaux de précision utilisés sont très variables (*i.e.*, du qualitatif au quantitatif).

Pour accéder à ces informations, toute une panoplie de données spatialisées est consultée :

- les cartes topographiques type IGN au 1/25 000, géomorphologiques, pédologiques, géologiques, d'occupation du sol, ... utilisées pour leur référentiel géométrique et leur contenu thématique ;
- les données topographiques issues de levés de terrain ou de photo-restitution, utilisées pour compléter les informations altimétriques trop imprécises des cartes topographiques au 1/25 000 ;
- les images de télédétection aérienne : images satellitaires et surtout photographies aériennes (hors inondation), utilisées pour leur contenu sémantique et morphologique extrait le plus souvent par photo-interprétation et stéréo-interprétation ;
- des compléments par observations sur le terrain sur des secteurs complexes.

Cette démarche est souvent réalisée à la fois sur des données récentes pour caractériser le milieu actuel et des données anciennes pour analyser les évolutions et effectuer des analyses diachroniques.

#### 1.2.4.3. Résultats

Appliquée au niveau du bassin versant mais aussi de la plaine alluviale, le résultat de la caractérisation hydrogéomorphologique est (*cf.*, Figure 1-6) :

- une description du milieu "naturel" : unités hydrogéomorphologiques (lit mineur, moyen, majeur), limites séparant ces unités (talus, avec leur hauteurs et déclivités) et manifestations de l'hydrodynamique (zone d'érosion, de sédimentation, affleurement rocheux, axes d'écoulements préférentiels...)
- une description des modifications apportées par l'homme : occupation des sols et ouvrages (remblais, digues, seuils...) modifiant les écoulements

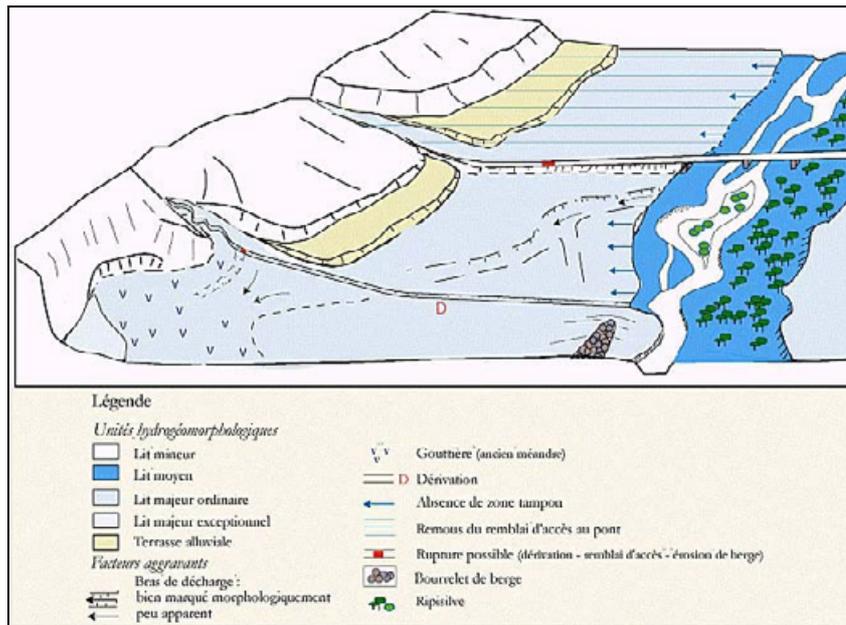


Figure 1-6 : exemple de caractérisation hydrogéomorphologique (d'après <http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-Roussillon/risques/zi/aude/methodologie.htm>).

L'interprétation de cette carte hydrogéomorphologique permet de fournir une **description spatialisée** de l'aléa avec **un niveau de précision et une finesse de caractérisation spatiale très variables** :

- **qualitatif** si l'affectation aux différentes unités hydrogéomorphologiques d'un niveau d'exposition à l'aléa n'est pas complétée par des données hydrologiques ou hydrauliques ;
- **semi-quantitatif** si des données quantitatives relatives à la connaissance hydrologiques (pluviométrie, ruissellement, débits spécifiques, fréquences et débits de crues rares, observations de crues historiques) sont intégrées par un hydrologue expérimenté ;
- **quantitatif de l'aléa** si des résultats issus de modélisation hydraulique sont introduits.

### 1.2.5. Les modèles hydrauliques (mathématiques)

Dans ce document, la modélisation hydraulique se réfère uniquement à la modélisation hydraulique mathématique (numérique) des inondations de plaine, et se limite au mieux à une prise en compte de la dynamique suivant les deux dimensions planimétriques X et Y. De même, la modélisation dite physique ou analogique (modèles réduits) ne sera pas abordée car son utilisation est limitée à des problèmes locaux tridimensionnels du fait de son coût, de la lourdeur de sa mise en place et de ses limites en terme de linéaire de rivière pouvant être traité (le facteur de réduction ne peut guère dépasser le 100<sup>ème</sup>, ce qui impose un modèle de 100 m de long pour un linéaire de 10 km).

#### 1.2.5.1. Caractéristiques générales

Un modèle n'est qu'une représentation schématique, et donc simplifiée, du système "réel" afin de répondre aux objectifs du modélisateur. Sa raison d'être n'est rien d'autre que de répondre aux problèmes posés ([Bachelard, 1979] cité par [Kauark Leite, 1990]), qui vont de la prédiction/prévision de grandeurs intéressant l'ingénieur, jusqu'à l'analyse, la compréhension et l'explication du fonctionnement de systèmes complexes par le chercheur [Gineste, 1998; Ambroise, 1999].

La première phase effective de la mise en oeuvre d'un modèle consiste à rassembler les processus considérés comme essentiels, et dont il est démontré que la combinaison est la cause des phénomènes observés. Cette phase nécessite de choisir le niveau d'analyse pertinent au problème posé en identifiant les variables significatives pour décrire le système physique (*i.e.*, variables d'état et paramètres<sup>6</sup>), son environnement (*i.e.*, variables d'entrée, encore appelées variables de forçage), le problème (*i.e.*, variables de sortie) et l'ensemble des interactions entre elles [Kauark Leite, 1990].

Dès lors il est possible de définir :

- des modèles **distribués** si les variables et paramètres sont variables dans l'espace, sinon ils sont dits **globaux**.
- des modèles **permanents** (ou stationnaires) dans le cas particulier où toutes les variables sont constantes au cours du temps. Dans le cas contraire, le modèle est dit **transitoire** (ou non-stationnaire).
- des modèles **empiriques** (boîte noire) qui ne font aucune référence, sinon sémantique, aux processus internes du système étudié mais se contentent d'établir des relations directes entre les variables d'entrée et de sortie (souvent par corrélation statistique). A l'opposé on trouve les modèles **mécanistes** (ou physiques) qui décrivent (ou essaient de décrire) les mécanismes internes du système en se basant sur des lois physiques (*e.g.*, conservation de la masse, de l'énergie, de la quantité de mouvement). Ce dernier type de modèle nécessite une connaissance parfaite des mécanismes internes, mais aussi de la structure physique du système. Lorsque cette connaissance est imparfaite ou trop compliquée à mettre en oeuvre, la représentation de la réalité est simplifiée. Si l'empirisme introduit par cette simplification garde une référence au sens physique, le modèle devient d'une nature intermédiaire et est alors qualifié de **conceptuel**.
- des modèles **déterministes** ou **stochastiques** (*cf.*, 1.2.1.5)

Une autre distinction est parfois réalisée entre les modèles de **prévision** pour des applications "temps réel", et les modèles de **prédétermination** (appelés aussi modèles de **simulation**) qui cherchent à reproduire et à prédire le comportement du système à des sollicitations données [Kauark Leite, 1990].

Dans le sens très large du terme "modèle", la modélisation hydraulique peut prendre des significations très variées selon le point de vue du modélisateur. Cependant un sens plus précis est donné habituellement au terme de modélisation hydraulique mathématique, impliquant l'intervention d'équations aux dérivées partielles, résolues grâce à l'utilisation d'un ordinateur ([EDF, 1993]). Pour les problèmes d'inondation de plaine, ces équations, qui décrivent le processus de propagation des eaux à surface libre, sont basées sur les concepts physiques de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Les équations tridimensionnelles de Navier-Stokes, intégrées au moins sur la verticale (car on exclut les représentations tridimensionnelles) et simplifiées dans diverses versions des équations de Barré de Saint-Venant, traduisent ces concepts. Dans cette acception qui sera retenue dans la suite, les modèles hydrauliques sont des modèles **déterministes**, **distribués** et **mécanistes**, même si certains paramètres comme le coefficient de frottement (intervenant dans les équations de Barré de Saint-Venant) ne sont pas directement mesurables sur le terrain [Kauark Leite, 1990]. Ils s'inscrivent clairement dans une approche de dynamique temporelle **intra-événement**, et offrent des potentialités fortes de **prévision** / **prédétermination**. Ils peuvent cependant être étendus à des

---

<sup>6</sup> Les notions de variables d'état et de paramètres sont ambiguës. On considérera que le paramètre est (ou est supposé) constant au cours du temps (coefficients intervenant dans les équations d'un modèle) alors que la variables d'état est supposée évoluée au cours du temps.

approches inter-événementielles pour simuler un "régime" hydrologique ; *i.e.*, un événement statistique reconstitué (*e.g.*, crue centennale), et non un événement historique précis.

#### 1.2.5.1.1 Éléments constitutifs d'un modèle hydraulique mathématique

Ce sont [EDF, 1993] :

- un domaine d'étude où l'on va calculer les caractéristiques des écoulements ;
- une représentation de la topographie du domaine, considérée comme un paramètre (hypothèse d'un fond fixe, *i.e.*, évolution négligeable de la topographie au cours d'une crue) ;
- des variables d'entrée au domaine, appelées conditions aux limites en hydraulique (le plus souvent en amont, en aval) ;
- un système d'équations à résoudre sur ce domaine, ici les équations de Barré de Saint-Venant plus ou moins simplifiées, qui font apparaître les variables de sortie qui nous intéressent : la cote de la surface libre (ou la profondeur d'eau) et la vitesse exprimées en fonction du temps dans le cas de modèle transitoire ;
- pour une modélisation en transitoire, il faut préciser l'intervalle de temps de calcul et ajouter des conditions initiales (*i.e.*, la valeur des inconnues au début de l'intervalle de temps) ;
- une discrétisation spatiale du domaine en éléments jointifs appelés mailles ;
- une méthode de résolution ;

auxquels il me semble opportun d'ajouter

- une méthode d'estimation des paramètres non observables (calage).

#### 1.2.5.1.2 Performance d'un modèle hydraulique

La performance d'un modèle hydraulique, c'est-à-dire la qualité de la réponse apportée par le modèle aux questions posées (*i.e.*, prévision/prédiction et/ou analyse du fonctionnement), est directement liée aux hypothèses simplificatrices de représentation du processus (exprimées au travers des équations et de la discrétisation spatio-temporelle) ; à la disponibilité et à la qualité des données d'entrée (conditions aux limites, conditions initiales et topographie de la plaine alluviale) ; aux approximations induites par la méthode de résolution des équations ; et enfin à la précision du calage (pour le paramètre de rugosité et les lois d'ouvrages).

Ces questions de performance de modèle hydraulique renvoient à un ensemble de concepts qui seront discutés ultérieurement (*i.e.*, validation, estimation des paramètres, estimation et gestion des incertitudes, analyse de sensibilité, qualité des méthodes de résolutions numériques...).

#### 1.2.5.2. ***Typologie des modèles utilisés en hydraulique fluviale***

La représentation du processus modélisé, base de l'approche mécaniste, comporte différents niveaux de simplifications qui se traduisent par l'utilisation, dans les sections courantes, d'équations plus ou moins dégradées de l'équation bidimensionnelle régissant les écoulements transitoires établies par Barré de Saint-Venant en 1871 (*cf.*, [Lane, 1998] pour plus de détails). Dans les sections singulières (*e.g.*, ouvrages), des équations particulières sont souvent utilisées pour représenter l'écoulement [METL/CETMEF, 1999].

Dès lors, la principale simplification provient du choix délicat de la discrétisation spatiale du domaine d'étude, c'est-à-dire de la définition de la structure de la modélisation distribuée au regard de la seule

connaissance *a priori* de la dynamique spatiale du phénomène étudié. En hydraulique fluviale, trois grandes classes de modèles existent : les modèles bidimensionnels (2D), les modèles unidimensionnels (1D), et des modèles hybrides (1D et ½).

#### 1.2.5.2.1 Les modèles bidimensionnels (2D)

##### Hypothèses

En hydraulique fluviale, les hypothèses essentielles des modèles bidimensionnels sont [EDF, 1993; Lane, 1998; METL/CETMEF, 1999] :

- l'homogénéité des vitesses sur la verticale ;
- la répartition hydrostatique de la pression, qui découle de la faiblesse de l'accélération verticale vis-à-vis de la gravité (faible courbure des lignes de courant, écoulement dit graduellement varié) ;
- la faiblesse de la pente moyenne de l'écoulement.

##### Équations

Au point M de coordonnées (x,y), les équations prennent la forme suivante<sup>7</sup> :

<b>équation de continuité :</b>	$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla(h \cdot \mathbf{V}) = q$	<b>Eq. 1-1</b>
<b>équation de la quantité de mouvement :</b>	$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -g(\mathbf{J} + \nabla Z)$	<b>Eq. 1-2</b>

où  $h$  est la hauteur d'eau,  $Z$  la cote de la surface libre,  $q$  les éventuels apports ou pertes au m<sup>2</sup>,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $\mathbf{V}$  le vecteur vitesse de composantes  $V_x$  et  $V_y$  (vitesse moyenne sur la verticale dans les directions  $x$  et  $y$ ), et  $\mathbf{J}$  le gradient de charge hydraulique de composantes  $J_x$  et  $J_y$ .

Des termes peuvent être ajoutés dans l'équation **Eq. 1-2** afin de tenir compte des effets du vent, de la force de Coriolis, des contraintes de cisaillement ou de turbulence. Par ailleurs, le gradient de charge  $\mathbf{J}$  est fréquemment approché par la relation suivante qui met en jeu le coefficient  $K$  dit de Strickler (ou de Manning-Strickler) :

$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{V} \ \mathbf{V}\ }{K^2 h^{4/3}}$	<b>Eq. 1-3</b>
--------------------------------------------------------------	----------------

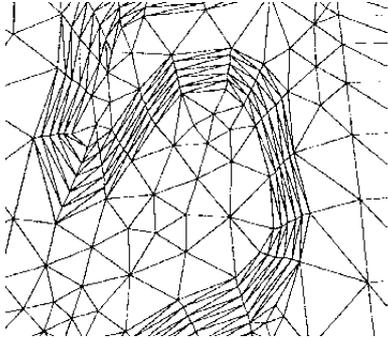
##### Discretisation spatiale et schémas de résolution

Les premiers modèles développés, et donc les plus fréquents, s'appuient sur un maillage régulier du domaine et un schéma de résolution basé sur la méthode des différences finies. Plus récents et plus efficaces en terme de précision des calculs, mais plus compliqués à implémenter, des modèles basés sur des schémas aux éléments finis (*e.g.*, méthode de Galerkin [Hervouet et Van Haren, 1996], de McCormack [Alcrudo et Garcia-Navarro, 1994]) se sont développés. Ils permettent de découper avec beaucoup plus de souplesse le domaine en un maillage irrégulier formé le plus souvent de triangles

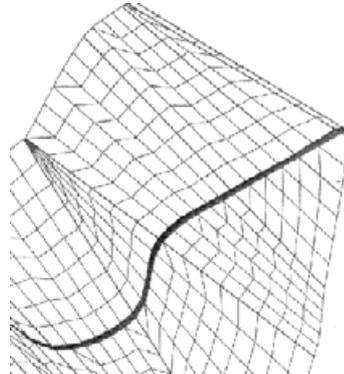
##### <sup>7</sup> Notations :

- les caractères gras et droits correspondent à des variables définissant un champ vectoriel
- $\nabla$  est l'opérateur différentiel, qui appliqué à un champ scalaire  $\varphi(x,y,z)$  donne le gradient du champ soit  $(\partial\varphi/\partial x, \partial\varphi/\partial y, \partial\varphi/\partial z)$ , et appliqué à un champ vectoriel  $\mathbf{U}$  de composante  $(U_x(x,y,z), U_y(x,y,z), U_z(x,y,z))$  donne la divergence de ce champ soit le scalaire  $(\partial U_x/\partial x + \partial U_y/\partial y + \partial U_z/\partial z)$ .

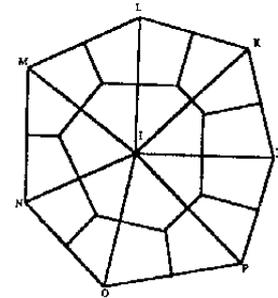
(issus d'une triangulation de Delaunay illustrée Figure 1-7), d'un mélange de triangles et de quadrilatères (*e.g.*, méthode développée dans [Farissier, 1992] et illustrée Figure 1-8); et plus rarement de polygones d'ordre supérieur (*e.g.*, tessellation de Dirichlet illustrée Figure 1-9).



*Figure 1-7 : exemple de discrétisation basée sur une triangulation de Delaunay (d'après [Hervouet et Moulin, 1994])*



*Figure 1-8 : exemple de discrétisation en triangles et quadrilatères (d'après [Farissier, 1992])*



*Figure 1-9 : exemple de discrétisation basée sur une tessellation de Dirichlet (d'après [Di Giammarco et Todini, 1994])*

Excepté dans quelques rares modèles capables de modéliser des passages de torrentiel (régime supercritique) en fluvial (régime subcritique) et inversement (*e.g.*, modèle Rubar20 du Cemagref), les discontinuités spatiales verticales (seuils) ne peuvent être traitées que par des lois d'ouvrages spécifiques.

Les conditions aux limites sont généralement décrites par un hydrogramme et un profil transversal de vitesse à l'amont, et un limnigramme à l'aval.

Quels que soient le découpage et le schéma de résolution retenus, chaque maille doit être paramétrée en son centre en terme de topographie et de coefficient de rugosité. Le modèle calcule alors, à chaque pas de temps et pour chaque maille (une maille = un nœud de calcul au centre de la maille) un tirant d'eau et un vecteur vitesse.

#### 1.2.5.2.2 Les modèles monodimensionnels (1D ou filaires)

##### Hypothèses

Dans le cas monodimensionnel, l'écoulement est supposé bien "canalisé", c'est-à-dire organisé par rapport à une direction préférentielle bien identifiée, appelée "axe d'écoulement" [EDF, 1993], dont l'emplacement est supposé constant au cours de la crue. Les principales hypothèses simplificatrices sont [Lane, 1998; METL/CETMEF, 1999] :

- La surface libre est horizontale dans une section en travers : la vitesse et le tirant d'eau sont uniformes dans toute section perpendiculaire à l'axe d'écoulement (appelée section en travers).
- L'écoulement est graduellement varié (comme en bidimensionnel)
- La pente moyenne (longitudinale) de l'écoulement est faible.

Équations

équation de continuité :	$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q$	Eq. 1-4
équation de la quantité de mouvement :	$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \beta \frac{Q^2}{S} \right) = -g S \left( J + \frac{\partial Z}{\partial x} \right)$	Eq. 1-5

où  $S$  est la section mouillée,  $Z$  la cote de la surface libre,  $q$  les éventuels apports ou pertes au  $m^2$ ,  $g$  l'accélération de la pesanteur,  $Q$  le débit moyen dans la section,  $\beta$  le coefficient de quantité de mouvement (ou coefficient de Boussinesq) et  $J$  le gradient de charge hydraulique de composantes dont la valeur fréquemment utilisée est celle du régime permanent :

$J = \frac{Q^2}{K^2 S R_H^{4/3}}$	Eq. 1-6
-----------------------------------	---------

avec  $R_H$  le rayon hydraulique, rapport entre la section mouillée et le périmètre mouillé.

Discrétisation spatiale et schémas de résolution

La géométrie du lit majeur est constituée par une série de profils transversaux et les nœuds ou sections de calcul s'appuient sur ces profils (cf., Figure 1-10). Des sections supplémentaires de calcul peuvent éventuellement être ajoutées par interpolation des profils.

Les ouvrages (seuils, ponts...) présents le long de la rivière provoquent une discontinuité spatiale où les hypothèses du modèle ne sont plus valables. Leur comportement hydraulique est décrit alors par une loi spécifique.

Les conditions aux limites sont généralement décrites par un hydrogramme à l'amont et un limnigramme à l'aval.

Un coefficient de frottement est défini par section de calcul, éventuellement différenciée entre sa partie lit mineur et sa partie lit majeur. Le modèle calcule alors, à chaque pas de temps et pour chaque section de calcul, un tirant d'eau unique et un débit (i.e., une vitesse moyenne). Contrairement aux modèles bidimensionnels, la cartographie des résultats impose un processus de post-traitement spatial plus ou moins complexe et efficace (e.g., [Werner, 2001]).

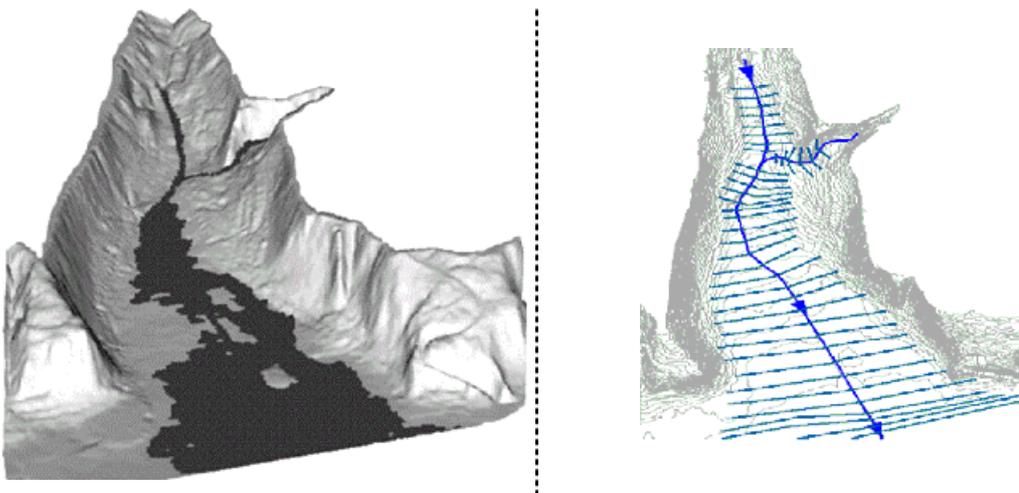


Figure 1-10 : exemple de discrétisation spatiale en sections de calcul (d'après [Hydrologic Engineering Center, 2000])

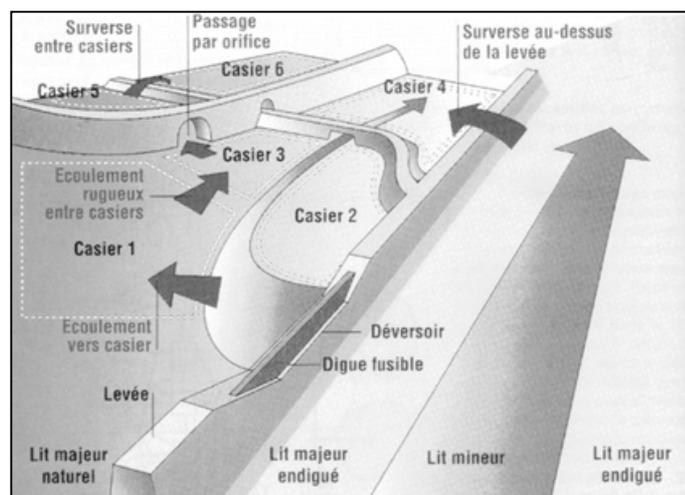
### 1.2.5.2.3 Les modèles hybrides (1D et 1/2)

#### Présentation

Cette catégorie propose des modèles de fonctionnement spatial intermédiaires entre les modèles monodimensionnels et les modèles bidimensionnels dans le sens où ils essaient de dépasser les limitations fortes imposées par les hypothèses du 1D, tout en cherchant à limiter le nombre très (voire trop) important de points de calculs et de variables à déterminer de certaines modélisations 2D.

En effet, lorsqu'on s'intéresse à une rivière naturelle en crue, la présence de sinuosité et le débordement par-dessus les berges induisent des interactions complexes entre le lit mineur et la plaine en terme d'échange de quantité de mouvement. Ces changements importants dans les caractéristiques de l'écoulement ne sont plus en accord avec les hypothèses du modèle 1D [Knight et Shiono, 1996; Bates et al., 1997; Ervine et MacLeod, 1999] : la vitesse n'est plus homogène dans une section en travers, l'écoulement n'est plus exactement parallèle au lit mineur en quelques points. Par ailleurs, en présence de lit mineur endigué, il peut exister une phase de débordement où l'écoulement dans la plaine d'inondation est plutôt perpendiculaire au lit mineur et des zones de stockage peuvent apparaître... Les adaptations des modèles monodimensionnels (*e.g.*, introduction d'un coefficient de quantité de mouvement tenant compte de la débitance propre à chacun des lits pris séparément, introduction d'un coefficient de sinuosité qui représente la longueur supplémentaire de lit mineur due au méandrement) ne suffisent pas.

Le modèle hybride le plus courant est celui dit à **casiers** (*cf.*, Figure 1-11) qui incorpore des entités surfaciques (appelées "*casiers*") dont la taille et la forme sont ajustées aux ordres de grandeurs relatifs des gradients hydrauliques (cote et vitesse) et aux orientations principales de l'écoulement. Pour rester proches de la réalité physique, leurs limites doivent s'appuyer sur les éléments structurants de la plaine : digues, ouvrages de franchissement, déversoirs, chenaux [Hingray, 1999]. Chaque casier est supposé homogène en niveau d'eau et est défini par la relation entre son volume de stockage et la cote du plan d'eau. Les liaisons avec l'écoulement principal ou avec des casiers connexes sont "conceptualisées" soit par une loi d'ouvrage (*e.g.*, déversoir, orifice), soit par une loi de résistance (*i.e.*, perte de charge par frottement).



**Figure 1-11 : exemple de modélisation à casiers**  
(illustration sur le modèle Loire, HYDRATEC d'après [METL/CETMEF, 1999])

### Hypothèses

Dans ce type de modèle, les termes d'inertie sont négligés par rapport aux termes de frottements, ce qui simplifie nettement les équations bidimensionnelles de Saint-Venant. Le calcul de l'écoulement est alors basé sur la continuité du volume dans les casiers et sur des lois d'écoulement sans inertie entre les casiers. Si ces hypothèses sont légitimes à l'intérieur des champs d'inondations (faible vitesse dans le lit majeur), elles le sont beaucoup moins en lit mineur. Ceci a débouché sur plusieurs tentatives de **modèles couplés 1D-2D**, où l'écoulement dans le lit mineur est représenté par un modèle unidimensionnel, et où l'écoulement dans le champ d'inondation (lit majeur) est représenté par des casiers ou par des équations bidimensionnelles éventuellement simplifiées [Anselmo et al., 1996; Paquier et Sigrist, 1997; Bates et De Roo, 2000].

## 1.2.6. Intérêts et limites de ces approches

### 1.2.6.1. De l'approche historique

Le principal intérêt de l'approche historique réside dans la valorisation d'archives. Elle permet donc de fournir de très précieuses données *a posteriori* sur des crues passées. Issues de l'observation et de la mesure, ces données présentent une fiabilité inégalée par les données issues de simulation. Malheureusement diverses contraintes limitent la disponibilité (quantité et répartition spatiale) de ces données. D'un point de vue pratique, cela rend indispensable le recours à une approche faisant intervenir une méthode d'interpolation et d'extrapolation des informations.

Ainsi, à l'exception de rares cas où la densité de ces informations est suffisante pour établir une cartographie de l'aléa (*e.g.*, cartographie des cotes maximum à partir de repères de crues), l'approche historique ne constituera qu'une étape nécessaire, venant alimenter l'une ou l'autre des deux grandes approches en tant que données d'entrée (*e.g.*, conditions aux limites des modélisations hydraulique), de calage ou de validation.

### 1.2.6.2. De l'approche hydrogéomorphologique

Spécialement conçue en France pour la cartographie réglementaire dans le cadre du risque d'inondation, son principal avantage réside dans sa rapidité et dans la modestie des moyens techniques auxquels elle fait appel (cartes, levés de terrain, photographies aériennes). Son atout provient de son orientation très géographique, parfaitement en accord avec ce problème spatial qu'est l'inondation.

Les principales limites résultent de :

- la difficulté, dans certaines configurations morphologiques, à délimiter des zones inondables (*e.g.*, vallons en berceau avec raccordement progressif du lit majeur au versant, limites masquées par des phénomènes secondaires comme le biseautage d'un talus par érosion) ;
- la difficulté à prendre en compte les effets d'ouvrages anthropiques récents (qui n'ont pas encore été clairement observés, ou qui n'ont pas eu le temps de façonner le paysage) ;
- la difficulté à récupérer et analyser l'ensemble de ces données éparpillées (notamment des données historiques pour les études d'évolution morphologique) et très disparates (types de documents, qualité...). Dans ce cas, un outil d'archivage et de traitement de données (spatiales) est d'une aide considérable ;
- le côté un peu opaque de l'obtention du zonage, qui rend la méthode très tributaire de l'opérateur ;
- le mode de résultat très qualitatif (au mieux semi-quantitatif).

Si la précision de ses résultats (sans recours à une modélisation) peut paraître insuffisante pour des fins réglementaires, son analyse "géographique" (pour la topographie, l'occupation du sol, ...) offre toutefois un grand intérêt au moins à un niveau plus régional dans la compréhension globale d'une vallée ou d'une portion de vallée (échelle de la planification). Ainsi, le recours à une telle approche géographique se révèle très utile en phase préalable à toute modélisation hydraulique (choix des secteurs à modéliser, aide au choix du modèle et de sa structure spatiale, aide au relevé de topographie ...). Ces propos sont confirmés par l'exemple du bassin Midi-Pyrénées [Vidal et al., 2000] où l'efficacité de la méthode hydrogéomorphologique, étroitement associée à l'approche historique, a été démontrée au niveau régional (cartographie informative restituée au 1/25000 sur 7000 km de vallée). Sur certaines zones, le passage de cette cartographie informative à une cartographie réglementaire (au 1/5000) a été rendu possible [Lambert et al., 2000; Vidal et al., 2000] grâce à l'exploitation de larges séries de repères de crues, de photographies aériennes à une échelle inférieure au 1/10000, de nouvelles missions de terrain et de topographie fine (échelle de l'ordre du 1/5000).

En conclusion, l'approche hydrogéomorphologique valorise intelligemment, mais de façon un peu opaque, le maximum de données existantes sur le site étudié par une approche géographique (et donc spatiale). Très efficace à l'échelle de la planification, elle a besoin, pour espérer approcher l'échelle locale de l'aménagement et de la réglementation, d'être "consolidée" par des données historiques quantifiées.

### **1.2.6.3. De l'approche par modélisation hydraulique**

Des différentes méthodes d'analyse de l'aléa, la modélisation hydraulique est la plus apte à répondre aux questions posées par la gestion des inondations : durée, hauteur et vitesse du courant, même si le rendu des vitesses reste un gros problème même dans les versions les plus performantes en terme de discrétisation spatio-temporelle et de prise en compte de la turbulence [Wilson et al., 2002].

*Two-dimensional numerical hydraulic models are at present the most sophisticated tools available for the prediction of fluvial extend, depth and flow velocities [Pearson et al., 2001].*

Son utilisation pour la gestion du risque d'inondation dépasse très largement la cartographie réglementaire en permettant de simuler des scénarios futurs, de comparer différentes options d'aménagement, d'étudier la sensibilité d'un système à l'urbanisation d'un bassin versant, à la rugosité... La connaissance "fine" du schéma de propagation des eaux obtenue par modélisation permet également l'étude du transport sédimentaire [Walling et al., 1996; Nicholas et Walling, 1997; Hardy et al., 2000] et donc de l'évolution morphologique, du transport de contaminant [Carroll et al., 2000], ou encore de la dynamique écologique [Richards et al., 1996; Whigham et Young, 2001].

Le développement de modèles décrivant des phénomènes de plus en plus complexes, les améliorations en terme de capacité informatique et de disponibilité de données physiques sur les plaines d'inondation (*cf.*, 2.4.3), font des modélisations hydrauliques des outils de plus en plus intéressants et d'ailleurs de plus en plus utilisés. L'utilisation de modèles bidimensionnels sur des linéaires de plusieurs kilomètres de rivière, éventuellement aidés par les possibilités croissantes de couplages inter modèles (*i.e.*, 1D-casiers-2D), devient par exemple courante. Par contre le choix a priori de la "bonne" structure du modèle reste un problème très délicat puisqu'elle définit le modèle spatial de fonctionnement d'un processus que l'on cherche à comprendre, à représenter.

Si ce n'est en terme de temps de calcul, la discrétisation temporelle (en régime transitoire) ne semble pas être source de dégradations importantes en terme de précision des résultats. En effet des

contraintes de stabilité numérique pour la résolution des équations imposent souvent des pas de temps faibles (de l'ordre de quelques secondes), très contraignants en terme de temps de calcul mais largement satisfaisants en terme de dynamique des crues de plaine.

Outre le coût de la donnée topographique, une première limite des modélisations toujours plus finement distribuées provient de la lourdeur de leur mise en œuvre, notamment au moment de l'implémentation de la topographie sur le maillage de calcul. De plus, cette course à la complexité soulève de forts questionnements sur la validité, notamment à l'intérieur de la plaine modélisée, du résultat du modèle trop souvent calé et validé sur des événements à dynamique simple (voire en régime permanent) avec, faute de mieux, un seul et même hydrogramme à l'aval ; ce qui renvoie inlassablement sur les problèmes de [Hervouet et Van Haren, 1996; Bates et al., 1997; Bates et al., 1998c; Lane, 1998; Bates et al., 1999; Ervine et MacLeod, 1999; Stewart et al., 1999; Horritt, 2000] :

- choix *a priori* du bon niveau de description du phénomène (structure du modèle : taille, forme, emplacement des mailles...)
- qualité nécessaire pour les paramètres et variables observés (topographie, conditions aux limites et éventuellement des conditions initiales)
- calage de nombreux paramètres non observables, qui doivent donc être ajustés par des méthodes inverses (*e.g.*, rugosité, lois d'ouvrages)

En effet l'ensemble de ces facteurs influe simultanément sur la réponse du modèle. Plusieurs études ont cherché à mieux cerner la sensibilité de la réponse à l'un ou l'autre de ces facteurs, mais le manque de données adéquates pour effectuer de véritables calages et validations ont fortement limité leurs conclusions du fait des difficultés à désagréger l'erreur (*cf.*, Annexe 3). La modélisation hydraulique est en effet, comme toute modélisation mécaniste de systèmes environnementaux complexes, soumise à ce problème de sur-paramétrisation qui conduit au problème d'équifinalité [Beven et Freer, 2001]. Ceci consiste, comme l'a encore montré très récemment [Horritt, 2000], à accepter plusieurs structures et plusieurs jeux de paramètres fondamentalement différents. Cela vient de notre connaissance restreinte du phénomène hydraulique modélisé, qui ne permet pas de réfuter, ni même de hiérarchiser ces différentes configurations de modèle.

*Le message essentiel de cette contribution est que l'incertitude, l'équifinalité et le relativisme sont consécutifs à l'unicité de lieu, d'action et de temps et ceci jusqu'à ce que l'on aie suffisamment de données qui permettent le rejet de certaines possibilités [Beven et al., 2001].*

Si bien qu'au stade actuel de nos connaissances, il est impossible d'identifier la part de responsabilité relative aux choix *a priori* de sa structure (erreurs liées à la discrétisation spatio-temporelle extrêmement tributaires du site d'étude), au paramétrage du modèle, à la procédure d'estimation des paramètres non observables du modèle (calage), ou aux imperfections des données servant à son calage [Bates et al., 1998c]. Ceci explique l'importance de l'expertise dans le domaine de la modélisation hydraulique. Seul l'accès à des observations distribuées du phénomène à modéliser peut permettre d'élucider ces questionnements pour mieux prendre en compte les incertitudes, et, *in fine*, produire des prédictions distribuées plus fiables :

*The application of numerical models of free surface flow to fluvial flood prediction is currently hampered by the lack of distributed calibration and validation data [Horritt, 2000].*

Sans ces observations distribuées, il est impossible de hiérarchiser l'importance relative de ces divers facteurs, et donc d'orienter les recherches futures. La priorité doit donc préalablement se tourner vers cette quête d'informations distribuées.

### 1.3. Conclusion

La complémentarité de ces trois approches est sans conteste une solution à privilégier afin de valoriser les avantages (et limiter les inconvénients) de chacune d'entre elles dans une optique de meilleure gestion du risque d'inondation.

Toutefois, il semble que l'approche hydrogéomorphologique, en valorisant d'avantage une vision inter-événementielle des crues et en fournissant des résultats qualitatifs, soit plus adaptée à l'échelle de la planification ou en étape préliminaire et complémentaire d'une approche plus quantitative (*e.g.*, modélisation hydraulique).

La modélisation hydraulique, quant à elle, bien que plus lourde et plus coûteuse, offre de réelles potentialités de représentation réaliste des phénomènes complexes à l'intérieur de la plaine d'inondation. Elle semble même l'approche privilégiée pour répondre aux diverses problématiques liées au risque d'inondation, en offrant une représentation multi-échelles de l'inondation qui incorpore l'échelle de l'aménagement et de la réglementation. Ces attentes obligent la détermination des caractéristiques (hauteurs, vitesse, durée) à l'échelle locale (échelle de la parcelle cadastrale au minimum) et obligent le recours à des modélisations qui seront dites **finement distribuées**. Toutefois une réflexion approfondie sur la qualité des modélisations et de ces résultats est indispensable, en outre pour éviter les contestations comme celles mentionnées dans [Dagorne et al., 1999] souvent relevées lors de son utilisation dans un contexte réglementaire.

L'approche historique, si elle ne constitue pas à elle seule une méthode indépendante, constitue une étape indispensable aux deux autres grandes méthodes d'analyse de l'aléa que sont l'approche hydrogéomorphologique et la modélisation hydraulique. **En tant que fournisseur de données sur la crue, elle constitue même un facteur limitant de ces approches. Un effort doit donc absolument porter sur cette phase d'obtention de données internes, distribuées et quantitatives de la crue et sur leur assimilation dans les deux autres approches.**

----- oOo -----



## 2. L'analyse de l'aléa par télédétection

Depuis le lancement des premiers satellites, la télédétection spatiale est fortement venue enrichir le domaine de l'hydrologie et en particulier de l'hydrologie spatiale comme en témoignent de nombreuses synthèses [Schultz, 1988; Engman et Gurney, 1991; Caloz et Puech, 1996; Pietroniro et Prowse, 2002] : caractérisation des états de surface, de l'occupation du sol, de la couverture végétale, neigeuse et nuageuse ; inventaire des plans d'eau et de leur cubature, extraction de Modèle Numérique de Terrain (M.N.T.) par couples d'images, estimation des champs de précipitations et d'évaporation...

Encouragés par certaines de ces avancées et par les progrès réalisés en terme de disponibilité d'images ayant des résolutions spatiales de plus en plus fines<sup>8</sup>, le domaine de l'hydrodynamique des crues de plaine a également pris conscience des énormes potentialités de la télédétection. Ce champ d'investigation s'est donc intensifié récemment, aussi bien au niveau de la caractérisation fine de la plaine que de l'apport des observations en période de crue.

Dans ce chapitre, seul l'apport des données de télédétection pour l'analyse de l'aléa inondation de plaine est abordé. La caractérisation de la vulnérabilité à partir d'images de télédétection n'est pas traitée directement, le lecteur devant se reporter à d'autres documents comme [Sharma et al., 1996; Raclot et al., 2001].

Après une brève présentation de la télédétection spatiale et aérienne (*cf.*, § 2.1), ce second chapitre fait une revue bibliographique des informations accessibles par télédétection et susceptibles d'intéresser l'analyse de l'aléa, en se focalisant d'abord sur les données prises hors inondation (*cf.*, § 2.2), puis sur celles prises au cours d'inondation (*cf.*, § 2.3). Le dernier paragraphe a pour objectif de présenter les principes du couplage entre ces données de télédétection et les schémas d'analyse existants ainsi que les différents couplages relevés dans la littérature (*cf.*, § 2.4).

### 2.1. La télédétection spatiale et aérienne

L'objectif de ce paragraphe est de présenter succinctement les principaux concepts de base de la télédétection destinée à l'observation de la Terre. Pour plus de précision, le lecteur pourra par exemple se référer à [Robin, 1995; Campbell, 1996; Girard et Girard, 1999].

#### 2.1.1. Principes généraux

La télédétection peut être définie comme "l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci" (*Journal Officiel, arrêté du 25 septembre 1984*). Le principe de base sur lequel repose la télédétection est la mesure de l'énergie électromagnétique réfléchie ou émise par tout corps à la surface de la Terre. Cette mesure de l'énergie est conditionnée par le choix du couple vecteur/capteur. En télédétection spatiale, le vecteur est une plate-forme satellitaire ou aérienne (*e.g.*, avion, hélicoptère, ballon...) et le capteur est l'instrument d'acquisition

---

<sup>8</sup> Pour une observation optimale des crues vers leur optimum, le CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) préconise, dans son rapport disponible sur <http://disaster.ceos.org/2001Ceos/Reports/flood.cfm>, une résolution spatiale inférieure à 5 m et une résolution temporelle inférieure à une journée.

des données (e.g., appareil photographique, radiomètre multispectral, le radar). Si l'énergie mesurée par le capteur est de source naturelle, la télédétection est dite passive, si elle est de source artificielle (e.g., laser, radar) elle est dite active. Selon l'altitude du vecteur, l'atmosphère peut jouer un rôle majeur en stoppant certaines longueur d'ondes, ne laissant alors que quelques fenêtres atmosphériques. La Figure 2-1 résume ces différents concepts.

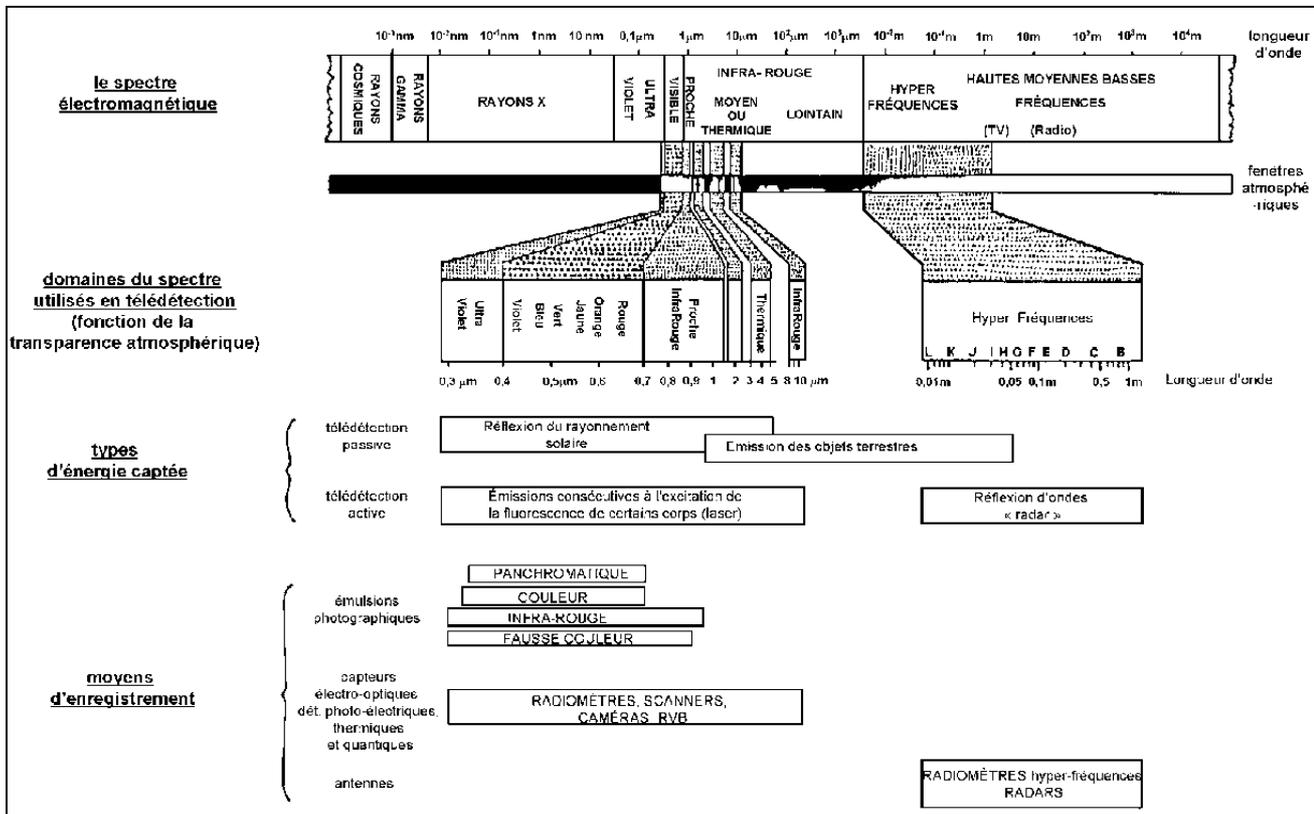


Figure 2-1 : le spectre électromagnétique et son utilisation en télédétection spatiale

Le résultat d'une mesure de télédétection est très souvent une image dont les caractéristiques dépendent du couple vecteur/capteur. Les principaux paramètres sont :

- **la résolution<sup>9</sup> spatiale**, c'est à dire la dimension et les qualités d'observation du point élémentaire (pixel en numérique ou grain de la photographie en analogique). La résolution spatiale est donc l'aptitude du capteur à distinguer deux objets sur le plan spatial. Elle est fonction de la fréquence d'échantillonnage du signal de sortie.
- **la résolution spectrale** qui correspond à la capacité du capteur à distinguer des signaux de longueurs d'onde différentes. Elle dépend du dispositif de filtrage optique qui sépare les rayonnements incidents en bandes spectrales plus ou moins larges.
- **la résolution radiométrique** qui exprime l'aptitude du capteur, dans une bande spectrale considérée, à distinguer des signaux électromagnétiques d'énergies différentes. Sa limite est la plus petite variation d'énergie décelable.

A ces paramètres caractérisant l'image, il faut ajouter **la résolution temporelle**, i.e., la répétitivité possible de prises de vue qui est majoritairement conditionnée par le vecteur.

<sup>9</sup> La résolution est définie comme la plus petite unité qui peut être mesurée à l'aide d'une technique de mesure.

### 2.1.2. Intérêts génériques

La télédétection spatiale représente avant tout une source de données spatialisées d'observation de la Terre ayant les propriétés suivantes :

- elles sont homogènes et continues sur de grandes surfaces ;
- elles offrent une vision multispectrale voire hyperspectrale unique ;
- elles permettent d'accéder à des zones dites "inaccessibles" pour des questions de topographie, de climat, de catastrophe naturelle ou encore pour des raisons politiques ;
- elles présentent un caractère d'objectivité et autorisent des observations plus ou moins rapprochées dans le temps d'un même endroit pour des problématiques de suivi ;
- les archives en images sont très fournies, avec la possibilité de revenir plusieurs décennies en arrière grâce aux photographies aériennes et aux données satellitaires Landsat MSS ;
- les programmes satellitaires sont maintenant suffisamment nombreux et fiables pour garantir aux utilisateurs une continuité dans la fourniture d'images.

### 2.1.3. Images de télédétection spatiale et mode de traitement

Pendant longtemps, les images provenant de la télédétection spatiale se sont limitées à la photographie aérienne et leur mode d'exploitation à la photo-interprétation. Cependant l'apparition de plates-formes satellitaires, initiée par la mise en orbite terrestre de Spoutnik le 4 octobre 1957, va permettre aux premiers satellites commerciaux de voir le jour au début des années 1970 (e.g., LANDSAT en 1972). Cette révolution des moyens d'observation de la Terre va véritablement stimuler l'utilisation de la télédétection spatiale pour essayer de répondre aux diverses problématiques environnementales auxquelles l'homme est confronté.

#### 2.1.3.1. *Évolution des produits en imagerie satellitaire*<sup>10</sup>

##### De 1970 à la fin des années 90

Les satellites vont alors se multiplier et se diversifier, fournissant ainsi l'accès à des données numériques en grande quantité. Les efforts de diversification ont tout d'abord porté sur la résolution spectrale et radiométrique en explorant les domaines spectraux en dehors du domaine visible (essentiellement dans l'infrarouge). Si l'on excepte les satellites géostationnaires à vocation météorologique, comme NOAA ou Météosat, qui offrent une forte répétitivité temporelle (i.e., plusieurs images par jour) mais une résolution spatiale kilométrique en contre-partie, les principaux satellites passifs à faible résolution spatiale ont été jusqu'à présent LANDSAT-TM (30m) et SPOT (10m en panchromatique P et 20m en multispectral XS). Malheureusement, leur résolution temporelle de 18 jours pour LANDSAT et de 26 jours pour SPOT (jusqu'à trois jours grâce au dépointage) constitue une limite forte en terme d'observation de phénomènes à dynamique temporelle rapide comme les crues.

En parallèle, des recherches ont été menées afin de valoriser les fenêtres atmosphériques disponibles dans les longueurs d'ondes supérieures à celles de l'infrarouge qui présentent l'avantage de passer à travers les nuages et fonctionner de nuit comme de jour. Ces progrès se sont concrétisés par

---

<sup>10</sup> Pour plus de renseignements sur les caractéristiques des capteurs actuels, passés ou futurs, le lecteur pourra consulter <http://www.ersc.wisc.edu/resources/resources.htm>.

l'apparition en juillet 1991 du premier satellite radar ERS-1 (European Remote Sensing Satellite), suivi par JERS-1 (japonnais), ERS-2 (européen), puis plus récemment par RADARSAT (canadien). Les techniques liées à l'exploitation d'images radar sont basées sur l'interprétation de la rétrodiffusion des ondes radar sur la surface terrestre et sont de ce fait très spécifiques. En particulier, la présence d'un bruit appelé chatoiement (speckle) provenant d'un phénomène d'interférence des ondes rétrodiffusées constitue une limite à l'obtention de résolution spatiale fine (résolution de l'ordre de 30 m au mieux avec ERS, malgré un pixel initial de 12,5\*12,5 m).

### Les tendances actuelles

Depuis quelques années, la tendance satellitaire s'oriente vers la THRS (Télédétection très Haute Résolution Spatiale) avec des capteurs à résolution métrique. Les prévisions de lancement sont assez nombreuses, et plusieurs satellites sont d'ores et déjà opérationnels : IKONOS-2 (USA, lancé en 1999) avec 1 m en panchromatique (P) et 4 m en multispectral (XS), Quickbird-2 (USA, lancé en 2000) avec 0,61 m en P et 2,50 m en XS et, enfin SPOT-5 (France, lancé en 2002) avec une résolution spatiale de 5 m à 2,5 m en P et 10 m en XS. Des renseignements supplémentaires sur ces satellites peuvent être obtenus dans [Aplin et al., 1997]. Pour satisfaire les besoins de diversification des capteurs avec ces résolutions métriques voire submétriques, certains programmes comme le programme "*pléiades*" du Cnes (Centre national d'études spatiales français) en association avec l'ASI (Agence spatiale italienne) prévoient l'envoi d'une constellation de petits satellites (500 kg) moins onéreux et à durée de vie plus faible. Nul doute que ce type d'images trouvera des applications dans les domaines de l'hydrologie et de l'hydraulique, d'autant plus que la vision stéréoscopique est souvent prévue. Cependant il ne faut pas oublier que l'amélioration de la résolution spatiale va de pair avec une diminution de la surface au sol couverte par l'image, ce qui a pour effet de diminuer les disponibilités en images et de multiplier les problèmes de mosaïquage d'images.

### **2.1.3.2. Évolution des produits en imagerie aérienne**

Parallèlement à l'évolution des produits satellitaires, l'offre en images issues de plates-formes aériennes subit également une diversification très marquée. En effet aux campagnes traditionnelles de couverture systématique par photographies aériennes viennent s'ajouter de plus en plus d'offres commerciales "à la carte" permettant de choisir le type de capteurs (photographie aérienne analogique et maintenant numérique, scanner, laser...) et le type de plates-formes (*e.g.*, avions, hélicoptères, ULM, drone). Le succès de ces solutions proviennent de la flexibilité offerte en terme de date de prise de vue et en terme de zones couvertes, du fait de la forte mobilité de ces vecteurs qui permettent d'observer rapidement des surfaces pouvant être très allongées comme le lit d'une rivière. En contrepartie, ce type de prise de vue à faible ou moyenne altitude, c'est-à-dire entre quelques dizaines de mètres et plusieurs kilomètres, impose souvent des pré-traitements géométriques fastidieux avant toute utilisation. L'exemple de la photographie aérienne, source d'images aériennes la plus ancienne et la plus répandue, est développé en Annexe 4.

### **2.1.3.3. Évolution des modes de traitements**

Avec les images décimétriques, les techniques d'exploitation ont largement été orientées vers les classifications pixel à pixel qui cherchent à mettre en correspondance la valeur radiométrique de chaque pixel avec son identification sémantique sur le terrain. Pour faire cette correspondance, les efforts de recherche ont porté sur la notion de signatures spectrales des objets et l'essor de l'informatique a permis l'implémentation d'algorithmes de classifications automatiques performants (*e.g.*, maximum de vraisemblance).

L'arrivée récente d'images métriques n'est pas sans poser problèmes car ces méthodes de traitement automatique deviennent caduques à cause de problèmes d'échelle [Bonn et Rochon, 1993], essentiellement parce que la faible dimension du pixel ne permet plus de le considérer homogène par rapport aux objets d'intérêt. Les méthodes automatiques d'exploitation sont de ce fait en pleine mutation, en essayant de compléter l'analyse radiométrique pixel à pixel traditionnelle par des analyses orientées vers l'objet d'intérêt comme des analyses fractales, texturales, structurales... Mais les traitements automatiques satisfaisants sont rares et l'ordinateur est le plus souvent utilisé comme aide à l'interprétation visuelle grâce à des techniques comme le rehaussement de contraste. L'environnement informatique peut également constituer un apport substantiel à l'interprétation des images par ces capacités à relier, notamment spatialement, les images avec d'autres données (*cf.*, § Annexe 5 sur les SIG).

#### **2.1.3.4. En résumé**

Les avantages des images satellitaires (format numérique, techniques efficaces de traitement automatique, multiplicité des canaux, faiblesse des déformations géométriques) et des images aériennes (rapidité, flexibilité en terme de capteurs, de disponibilité, de zones couvertes ...) font des deux plates-formes spatiales des vecteurs très complémentaires.

Même si l'offre satellitaire procure maintenant des images de résolution métrique, elle est encore loin de remplacer les capteurs aéroportés traditionnels comme l'appareil photographique du fait de sa faible couverture territoriale, de sa faible disponibilité temporelle et de la non-présence systématique de recouvrement stéréoscopique. Pour l'ensemble de ces raisons, la plate-forme aérienne est préférée dans bien des applications touchant le lit majeur des cours d'eau.

Parallèlement, l'utilisation d'images ayant des résolutions spatiales de plus en plus fines fait apparaître d'énormes problèmes méthodologiques en terme de traitement automatique, ce qui conduit à faire émerger un large champ de recherche où le traitement d'images rejoint l'analyse spatiale.

Enfin, si les données de télédétection permettent de fortement réduire les relevés de terrain, il faut rappeler qu'elle ne procure qu'une vision limitée aux couches superficielles. Elle ne peut donc venir qu'en complément des relevés traditionnels de terrain (souvent ponctuels et verticaux) et non en substitution [Puech et Vidal, 1995]. Pour cela, il est souvent nécessaire de repenser la collecte de ces informations de terrain afin de permettre la pleine exploitation des données de télédétection. Cela passe par des protocoles "terrain" capables de fournir des données adéquates pour caler et valider les techniques et résultats d'exploitation d'images de télédétection.

## **2.2. Informations accessibles à partir des données de télédétection prises hors contexte de crue**

L'intérêt de la télédétection prises en dehors des épisodes de crue dans l'analyse de l'aléa est sa capacité à appréhender les caractéristiques essentiellement physiques de la plaine d'inondation. Cette appréhension, qui concerne les couches superficielles de la plaine, est soit de nature topographique par l'identification du relief, soit de nature thématique par l'identification sémantique de l'occupation / utilisation du sol.

### 2.2.1. Le relief

Paramètre primordial du cheminement de l'eau à la surface de la terre sous l'influence du champ gravitationnel, le relief apparaît, pour des questions de temps d'acquisition et de coût, une information très intéressante à collecter par le recours aux technologies spatiales.

#### 2.2.1.1. Techniques d'acquisition

Quatre grandes techniques ont été développées selon le type et la source des données de télédétection (cf., Tableau 2-1). La photogrammétrie, à partir de photos aériennes ou d'images satellitaires, et la radargrammétrie sont toutes deux basées sur la vision stéréoscopique d'un couple d'images optiques ou d'images d'amplitude radar. L'interférométrie exploite la différence de phase entre deux images radar. La clinométrie, et la radar-clinométrie, exploite la valeur radiométrique des images pour reconstruire le relief en se basant sur une reconstruction par ombrages. Enfin, la technique laser est basée sur la distance optique, distance déduite du temps de parcours du signal entre son émission et sa réception après rétrodiffusion.

Types de données	Images optiques	Images radar	Mesures laser
Types de capteur	passif	Actif	actif
Technique	photogrammétrie, clinométrie	radargrammétrie, radar- clinométrie, interférométrie	distance optique

Tableau 2-1 : technologies spatiales de restitution du relief

#### 2.2.1.2. Qualité des résultats

La qualité de l'acquisition du relief pour des besoins hydrauliques peut être estimée par différents critères. Le critère le plus courant, et souvent le seul à être retenu, concerne la précision altimétrique au travers d'un estimateur d'erreur quadratique moyenne relative à la valeur absolue de l'altitude de chaque point de mesures. Ce critère semble nettement insuffisant car il ne permet en aucun cas de vérifier la qualité des plans dérivés comme la pente. Cela soulève une réflexion sur le protocole d'échantillonnage qui doit être mené pour représenter la variabilité naturelle du relief à partir de mesures discrètes. [Blöschl et Sivapalan, 1995] ont défini trois grandeurs pour caractériser un échantillonnage (cf., Figure 2-2) : l'extension (*extent*) qui représente le domaine d'échantillonnage, la granularité (*spacing*) qui représente le pas ou distance entre deux échantillons, et le support (*support*) qui constitue la taille de l'élément d'intégration de l'échantillon.

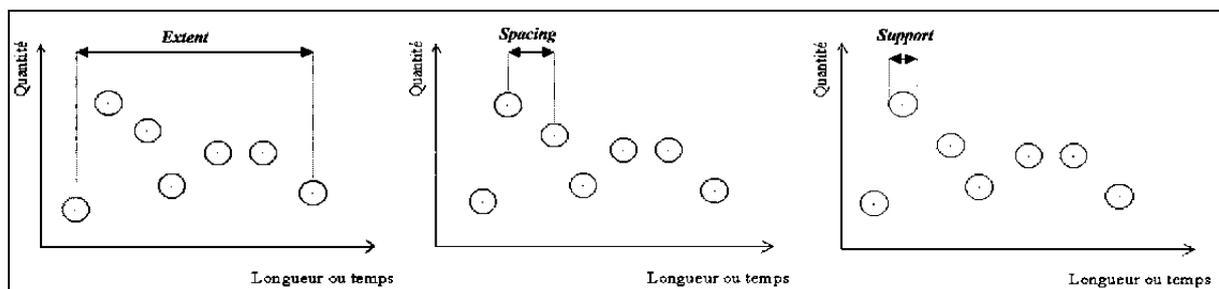


Figure 2-2 : les trois grandeurs caractéristiques d'un échantillonnage (d'après [Blöschl et Sivapalan, 1995])

Toute la difficulté est de trouver la bonne adéquation entre ces trois grandeurs et la variabilité du phénomène observé. La Figure 2-3 illustre certaines inadéquations : granularité trop grande (a), extension trop petite (b) ou support trop large (c).

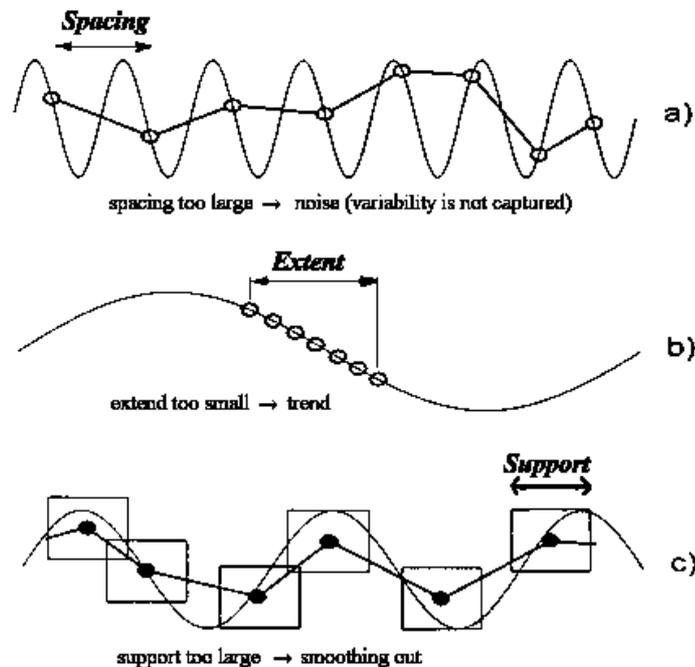


Figure 2-3 : exemples d'inadéquation entre grandeurs d'échantillonnage et phénomène naturel (d'après [Blöschl et Grayson, 2000])

L'acquisition d'informations par images de télédétection impose une granularité égale au support, lui-même étant égal à la résolution des images (taille des pixels). On comprend alors toute l'importance du choix de cette résolution spatiale des images.

#### 2.2.1.2.1 Topographie provenant d'images satellitaires

Les images satellitaires "traditionnelles" (*i.e.*, disponibles jusqu'à très peu de temps et donc avec des résolutions au mieux décimétriques) souffrent manifestement d'un problème de densité d'informations qui ne leur permet pas de restituer les variations rapides de relief. En terme de précision altimétrique, [Endreny et al., 2000a] et [Robin, 2000] ont montré que des MNT obtenus par photogrammétrie à partir d'images SPOT (à résolution 10m), présentaient des écarts moyens absolus ou quadratiques par rapport à une référence altimétrique de l'ordre de cinq mètres. De façon plus générale, les précisions altimétriques obtenues à partir des images satellitaires "traditionnelles" ne permettent pas de descendre en dessous de 5m, quels que soit le type d'image et la technique utilisée [Endreny et al., 2000b; Toutin et Gray, 2000; Charleux, 2001].

Les nouvelles images optiques à résolution métriques semblent quant à elles plus à même de répondre au problème de densité d'informations. Les précisions altimétriques sont également bien meilleures avec des valeurs annoncées par les différents producteurs et diffuseurs de données de l'ordre de 2m en erreur quadratique moyenne. Des études en milieu urbain à partir d'images IKONOS ont permis d'obtenir, par traitement automatique sur une zone test restreinte, des précisions altimétriques inférieures au mètre [Fraser et al., 2002]. L'altitude mesurée à partir de ces images optiques par photogrammétrie correspond à celle du sursol (*i.e.*, sol + végétation), ce qui nécessite, pour des

besoins d'hydraulique, des traitements plus ou moins précis pour soustraire la hauteur de la végétation et accéder ainsi à l'altitude du sol. De ce fait le résultat prometteur obtenu à partir des images IKONOS constitue une situation idéale assez éloignée des conditions réelles pour notre problématique.

#### 2.2.1.2.2 Topographie provenant d'images aériennes

Pour augmenter la précision des résultats, les techniques mises au point et éprouvées à partir d'images satellitaires ont souvent été transposées

L'ensemble des techniques exposées ci-dessus sont disponibles (ou l'ont été) à partir d'images acquises par un vecteur aérien, le plus souvent l'avion ou l'hélicoptère. L'intérêt de la plate-forme aérienne, outre sa flexibilité spatiale et temporelle, provient de son altitude de vol qui permet de satisfaire, au moins potentiellement, le critère de densité. Dès lors, le critère de précision altimétrique devient prépondérant.

La technique aérienne d'interférométrie (IFSAR) par exemple, bien que très rapide, ne permet pas dans l'état actuel une restitution de la topographie avec une précision altimétrique inférieure au mètre [Sanders et Tabuchi, 2000].

En fait, parmi les techniques provenant de télédétection aérienne, seules deux semblent véritablement intéressantes pour les problèmes d'hydraulique.

La première est la technique bien connue de photogrammétrie qui a longtemps été la seule technique spatiale permettant d'accéder à des précisions altimétriques et planimétriques inférieures au mètre (*cf.*, A4\_4). Bien que demandant des traitements lourds, cette technique est largement venue supplanter le fastidieux levé de terrain par topométrie dans le domaine de l'hydraulique, devenant ainsi la technique altimétrique la plus répandue dans les plaines d'inondation. Dans les zones à fort couvert végétal comme la forêt, cette technique devient inopérante. Il est également intéressant de constater qu'il existe un niveau de traitement beaucoup plus léger de ces photographies à l'aide d'un simple stéréoscope. L'examen d'un couple stéréographique de photographies permet alors d'accéder à moindre coût et avec une qualité correcte à une topographie relative, c'est-à-dire à l'identification des variations même brutales du relief. La précision altimétrique en valeur absolue n'a alors pas de sens puisqu'elle n'est pas traitée. D'autres données comme la photographie oblique prise à basse altitude procure également une idée relative du relief sous une forme non quantitative.

Très récemment, la technique de laser scanner aéroporté est venue bouleverser le secteur de l'altimétrie de précision. Très différente et complémentaire de la photogrammétrie [Baltsavias, 1999b], cette technique apparaît révolutionnaire par son principe physique [Baltsavias, 1999a] qui permet d'acquérir rapidement le relief sous forme d'un semis de points très dense (plusieurs points au m<sup>2</sup>) avec une précision altimétrique pouvant descendre autour de 15cm en erreur moyenne quadratique [Huising et Pereira, 1998; Hill et al., 2000]. De plus certains dispositifs, le plus connu et le plus répandu étant le LIDAR, permettent d'attribuer à chaque point l'altitude du couvert végétal (même en zone boisée [Kraus et Pfeifer, 1998]) et celle du sol sous ce couvert par le recueil du premier et du dernier écho pour chaque impulsion émise [Flood et Gutelius, 1997]. Des tests en zone alluviale [Gomes Pereira et Wicherson, 1999; Cobby et al., 2001] ont permis de conclure à sa compatibilité avec les besoins en terme d'aménagement avec une précision altimétrique inférieure à 15 cm. D'autres tests ont cependant montré que la précision diminuait avec l'angle de scannage et la pente du terrain naturel [Huising et Pereira, 1998; Kraus et Pfeifer, 1998; Baltsavias, 1999a]. De plus, une perte de qualité peut provenir de la phase d'identification et de correction du sursol qui s'effectue par des traitements lourds et complexes, souvent composés de filtrages et seuillages.

## 2.2.2. L'occupation du sol dans la plaine d'inondation

La technologie spatiale est également largement utilisée pour accéder à la description de l'occupation du sol, c'est-à-dire à l'identification spatiale et sémantique des différents objets d'intérêt qui composent les plaines d'inondation. Le terme occupation du sol est utilisée pour l'ensemble des objets, quelle que soit sa composante anthropique ou socio-économique.

### 2.2.2.1. Techniques

L'identification de l'occupation du sol constitue une préoccupation majeure de l'exploitation des images de télédétection. Il est difficile d'en énumérer toutes les techniques tant elles sont nombreuses et variées. Généralement basées sur des images multispectrales provenant de télédétection passives, elles exploitent tantôt une image unique, tantôt une série d'images diachroniques, ou bien encore complètent ces images par des données exogènes aux images.

La première d'entre elles a été tout naturellement la photo-interprétation visuelle développée depuis fort longtemps sur les photographies aériennes et étendues aux images satellitaires. Aujourd'hui, la photo-interprétation est souvent assistée par ordinateur : on parle de PIAO.

Pour des raisons de temps d'interprétation et de difficultés d'interprétation notamment avec des images hyperspectrales, des techniques automatiques ont été recherchées pour déterminer directement l'ensemble des objets d'une même classe, et non plus objet après objet. Les premières d'entre elles ont été des *classifications pixel à pixel*, notamment la méthode des centres mobiles en mode non supervisé et le maximum de vraisemblance en mode supervisé [Robin, 1995; Girard et Girard, 1999]. Ces approches statistiques s'appuient sur une segmentation d'images en classes de radiométrie par un algorithme qui minimise la variance intra-classe (*e.g.*, similitude radiométrique) et maximise la variance inter-classes (*e.g.*, ségrégation), et une hypothèse de correspondance entre ces classes de radiométrie et les classes d'occupation du sol recherchées. La qualité de ces techniques statistiques maintenant bien éprouvées dépend essentiellement des caractéristiques des images utilisées et de la résolution sémantique recherchée (*i.e.*, finesse de la nomenclature recherchée). Pour améliorer les résultats, le recours à une série d'images diachroniques s'est vite imposé comme très utile pour mettre en évidence des différences de dynamique d'évolution et améliorer la séparation de classes d'objets. Juste pour une détermination des systèmes agricoles à partir de données SPOT XS, il est par exemple courant de recourir à un minimum de deux images [Guerif et al., 1992] ; quatre images étant même préconisées dans des applications à hautes exigences comme le projet européen MARS<sup>11</sup>.

Le développement des SIG (*cf.*, § Annexe 5) dans les années 1990 a permis de dépasser les stratégies de classification pixel à pixel, en autorisant des approches de *classification "par objets"*. Celles-ci consistent à regrouper des pixels et à affecter "en bloc" un thème d'occupation du sol. Des auteurs proposent d'extraire directement les objets de l'image, le plus souvent de façon préalable [Kettig et Landgrebe, 1976; Moller-Jensen, 1990; Jansen et Molenaar, 1995] mais également de façon simultanée [Gonzales Alonzo et Lopez Soria, 1991]. Ces approches font appel à des analyses fractales, texturales ou encore structurales qui, si elles posent encore de fortes difficultés méthodologiques, apparaissent très prometteuses pour le traitement des images à très haute résolution spatiale (*cf.*, § 2.1.3.3). Une solution alternative consiste à faire appel à une délimitation des objets exogène à l'image. Dans ce cas seule la valeur sémantique est supposée évoluer au cours du temps. Cette technique est très utilisée pour la détermination de l'occupation du sol en milieu agricole, technique appelée dans ce cas "classification à la parcelle" ([Pedley et Curran, 1991; Brown et Fletcher, 1994].

<sup>11</sup> projet européen nommé MARS, continuité de MARS-STAT et de MARS-PAC ; *cf.*, <http://mars.aris.sai.jrc.it/>

Un des gros avantages du travail par objets est la possibilité de faire intervenir, dans le processus de détermination de l'occupation du sol, des données exogènes à l'image. Ces données peuvent être composées du contexte physique de l'objet (*e.g.*, pente, l'altitude moyenne, distance à la rivière), caractéristiques géométriques (*e.g.*, forme, surface, linéarité des bordures) ou encore de données historiques sur l'objet (*e.g.*, antécédent cultural) [Goodenough David et al., 1986; Jian-Kang et al., 1988; Axes, 1991; Desachy et al., 1996; Largouët, 2000; Colin et al., 2001]. Dans cette solution, l'accès et la manipulation des données exogènes avec les images de télédétection sont souvent réalisés dans un environnement SIG et le processus d'affectation de l'occupation du sol repose généralement sur la mise au point de règles d'affectation issues de dires d'experts ou apprises sur des jeux de données connues.

Les modes de traitement évoluent vers l'utilisation croissante d'informations exogènes à l'image, ce qui pose le problème de la fusion de données multi-sources et amène consécutivement à recourir à des méthodes issues du domaine de l'Intelligence Artificielle pour réaliser cette fusion [Largouët, 2000] : méthode probabiliste, théorie des croyances, théorie possibiliste, système expert, système multi-agents...

### 2.2.2.2. Qualité

Si l'on excepte l'influence d'éventuelles informations exogènes utilisées, la qualité d'extraction d'une occupation du sol à partir de télédétection dépend à la fois des "objets" recherchés (*i.e.*, une nomenclature recherchée qui sous-entend un niveau de précision spatial exprimé en terme de taille et de forme, et un niveau de précision sémantique exprimé en terme de spécialisation) et du mode de traitement retenu (*i.e.*, méthode et images).

La notion de résolution optimale [Marceau et al., 1994] illustre bien cette inter-dépendance : pour une méthode de traitement et un type d'images choisis, il existe pour chaque classe d'objets une résolution spatiale de l'image qui optimise l'extraction de cette classe d'objets (*cf.*, Figure 2-4). Cela revient à affirmer que la notion d'homogénéité est fortement dépendante de l'échelle d'observation (*i.e.*, de la résolution spatiale pour des images) [Puech, 2000].

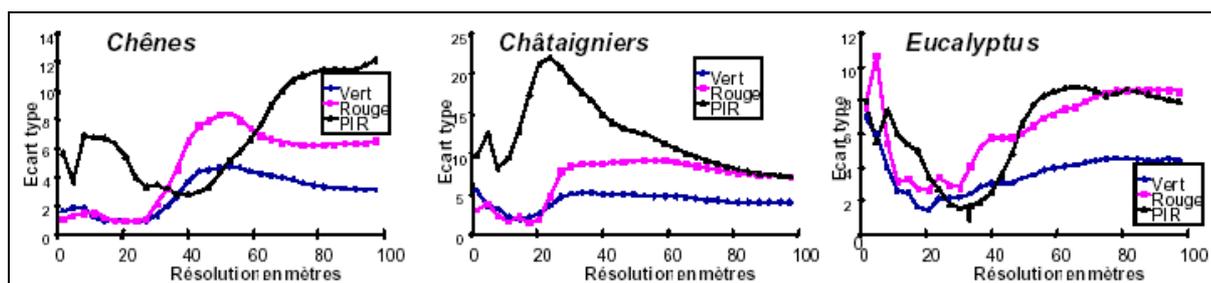


Figure 2-4 : illustration du concept de résolution optimale par la recherche d'un minimum de variance pour chaque objet recherché (d'après [Puech, 2000])

Les caractéristiques des objets présents dans la plaine étant très variables (lit mineur, plan d'eau permanent, haie, route, digue, pont, seuil, écluse, maison, culture, fossés ...) aucune méthode ne sera optimale pour extraire l'ensemble ces objets et plusieurs approches complémentaires sont nécessaires.

Pour une présentation très globale des possibilités d'extraction de ces objets, ces derniers sont regroupés en éléments surfaciques de "grandes" tailles (0,5 ha et plus : plan d'eau, parcelle agricole, habitat collectif ou concentré...), en éléments surfaciques de petites tailles (moins de 1 ha : habitat

individuel, seuil, écluse...) et en éléments linéaires (digue, fossé, route...). Seules les potentialités en fonction des grands types d'images de télédétection seront passées en revue.

#### 2.2.2.2.1 Occupation du sol provenant d'images satellitaires

D'une manière générale, la télédétection satellitaire "traditionnelle" permet d'accéder assez facilement aux éléments surfaciques de grandes tailles avec des précisions sémantiques limitées aux grandes classes : eau, cultures, urbain ; ainsi qu'à certaines structures linéaires dont la largeur dépasse quatre ou cinq mètres pour une image décimétrique.

La télédétection satellitaire très haute résolution permet, par des techniques manuelles ou semi-automatiques, l'extraction de ces mêmes éléments avec une meilleure précision sur les limites de ces objets. Elle permet en plus l'extraction de structures linéaires plus étroites et de certains éléments surfaciques de petites tailles. Malheureusement, le gain en terme de précision sémantique semble plus limité que le gain en terme de précision géométrique.

#### 2.2.2.2.2 Occupation du sol provenant d'images aériennes

La photographie aérienne verticale permet, par photo-interprétation visuelle, l'extraction de la majorité des objets cités ci-dessus, à condition que ceux-ci ne soient pas masqués par de la végétation. Générées de manière systématique sur l'ensemble du territoire (IGN ou IFN), de telles données offrent l'intérêt de présenter une même échelle d'observation pour toute la plaine avec la finesse du grain de l'émulsion photographique. Son principal inconvénient provient de sa nature analogique et de ses distorsions géométriques (*cf.*, Annexe 4) qui rendent la superposition des images avec d'autres informations spatialisées très fastidieuse (*i.e.*, scannage puis orthorectification).

Enfin, il existe des dispositifs légers, très mobiles et peu onéreux susceptibles d'apporter une information intéressante. Il s'agit de la photographie oblique, prise par exemple à partir d'avion léger ou d'ULM, qui offre une vision plus habituelle du paysage. Par des survols à basse altitude elle permet une appréhension plus fine de certains éléments particuliers du paysage (*e.g.*, éléments cachés sous de la végétation, ouvrages anthropiques...). Par contre elle permet difficilement de rendre compte de l'ensemble de la plaine avec la même qualité (prise partielle de la plaine, arrière plan très distordu, partie cachée...). La vidéographie aérienne présente quant à elle l'avantage de fournir une vision numérique multispectrale, voire hyperspectrale en une seule image continue. La contrepartie de ces dispositifs légers sont des distorsions géométriques qui rendent très délicats la restitution de l'information dans un repère cartographique.

La solution actuelle pour contrer ces problèmes de géométrie constatés dans les vecteurs très mobiles aéroportés consiste à embarquer, avec le capteur, une centrale inertielle et un GPS différentiel. Le problème est une hausse conséquente du coût des données qui sont alors livrées post-traitées. Une étape technique supplémentaire permet même de fournir des produits numériques multispectraux orthorectifiés avec une résolution spatiale inférieure à un mètre associée à une restitution très précise du relief. C'est le cas du produit commercialisé par la société ISTAR (<http://www.istar.com/>) basé sur trois vues scanners HRSC prises simultanément d'un même avion équipé d'une centrale inertielle et d'un GPS différentiel.

## 2.3. Informations accessibles à partir des données de télédétection prises en contexte de crue

Contrairement aux données précédentes, les données prises en contexte de crue sont beaucoup plus rares car elles nécessitent une concomitance entre le passage du vecteur et le phénomène de crue. Malgré cela, de tels documents commencent à s'accumuler, constituant ainsi des archives de plus en plus importantes, surtout sur les événements à faible dynamique temporelle (*e.g.*, crue lente). La richesse de ces données vient de la capacité de la télédétection à offrir une vision synoptique de la zone inondée, offrant ainsi un moyen inégalé d'observation instantanée de ce phénomène difficilement observable par d'autres moyens, et donc un support privilégié de l'approche historique.

De par la nature des images de télédétection, l'apport principal est la délimitation surfacique des zones inondées. Plusieurs études sont toutefois allées plus loin en cherchant à déterminer, de manière directe ou indirecte, des profondeurs ou des niveaux d'eau depuis l'espace. La qualité des informations accessibles étant, là encore, très tributaire des images, le potentiel des images sera présenté selon leur origine satellitaire ou aérienne.

### 2.3.1. Par imagerie satellitaire

De nombreuses publications sur l'apport de l'imagerie satellitaire prise en contexte de crue (ou de post-crue) montrent l'intérêt et l'étendue des recherches dans ce domaine. Ce paragraphe s'appuie en partie sur les deux travaux synthétiques suivants : [Bates et al., 1997] et [Smith, 1997].

#### 2.3.1.1. *Délimitation surfacique de la zone inondée*

*Despite the variety of uses the most common hydraulic property studied by remote sensing is the inundation extend field [Bates et al., 1997].*

Les techniques de différenciation des zones inondées / non inondées étant très nombreuses, seules les principales sont mentionnées ci-dessous.

##### 2.3.1.1.1 Passif

Quoique assez marginale, une première technique exploite les différences de températures émises la nuit entre les surfaces en eau et les surfaces terrestres, différences dues au fait que l'eau se refroidit moins vite que la surface terrestre. Cette détection est rendue possible, grâce au captage, la nuit, du spectre d'émission dans l'infrarouge thermique. Cette technique a été utilisée par [Barton et Bathols, 1989] avec des données issues du capteur AVHRR du satellite NOAA (résolution de 1,1 km) mais pourrait être utilisée avec des données de résolution spatiale plus faible comme celles issues avec la bande 6 du capteur ETM+ de Landsat7 (*i.e.*, 60m).

L'utilisation des données passives dans le domaine de l'optique (*i.e.*, visible et proche infrarouge) est quant à elle beaucoup plus fréquente comme en témoignent les nombreux travaux cités dans [Smith, 1997]. La séparation "eau/non eau" s'appuie avant tout sur la différence de comportement dans le proche infrarouge (PIR) : forte absorption de l'eau et forte réflexion des autres composantes terrestres dont la végétation (*cf.*, Figure 2-5), comportement confirmé par [Gupta et Banerji, 1985] avec des mesures radiométriques de terrain lors d'une étude d'évaluation des bandes 5 (0,6-0,7 $\mu$ m) et 7 (0,8-1,1 $\mu$ m) de Landsat/MSS.

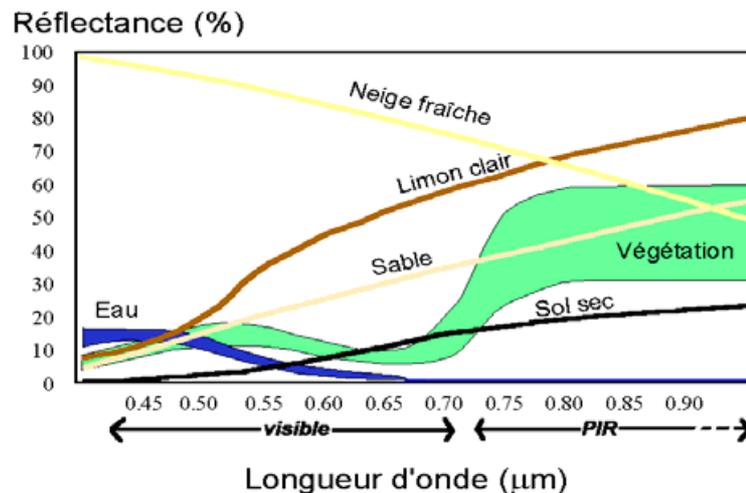


Figure 2-5 : réflectance des éléments constitutifs de la plaine dans le domaine de l'optique

Dès lors les principales techniques de séparation sont la photo-interprétation ou le simple seuillage sur le seul canal PIR comme dans [Blasco et al., 1992], permettant d'accéder ainsi à des estimations de la surface inondée avec 5 % d'erreur en terme de surface inondée avec des données Landsat/MSS pour des lacs de grande surface en Inde [Gupta et Banerji, 1985]. Cette technique conduit cependant à des confusions lors de la présence d'ombre de nuages, de forte turbidité ou de présence de chlorophylle [Hubert-Moy et al., 1992; Hess et al., 1995; Smith, 1997], et de végétation émergée venant masquer les surfaces en eau [Robin, 1992]. Pour [Robin, 2000], la méthode manuelle de délimitation de la zone inondée par photo-interprétation, bien que moins robuste car tributaire du photo-interprète, donne de meilleurs résultats que la méthode par seuillage sur des données issues de SPOT4 (ayant une bande dans le PIR et une bande dans le MIR).

Enfin, deux limitations à l'utilisation systématique de ce type de données sont classiquement énoncées. La première s'exprime en terme de résolution spatio-temporelle, la fréquence de passage diminuant avec la résolution spatiale. Heureusement, la possibilité de détecter les sols humides permet, même avec des image prises plusieurs jours après le maximum de crue, de retrouver la surface maximale de la zone inondée. Dans certaines régions du monde, le dépôt de limons offre une très bonne lisibilité de l'extension maximale un mois après la crue (e.g., plaine du Gharb au Maroc [Puech, 1995]). [Blasco et al., 1992] conseillent cependant de ne pas dépasser dix jours après la passage de la crue. De façon opérationnelle, la disponibilité d'images satellitaires décimétriques ou moins durant une crue est très aléatoire et devient systématique uniquement lors de crue très lente (un mois ou plus). Pour le moment la disponibilité de telles images se limitent, pour les images les plus fines, à des données Landsat/TM (30m) ou SPOT/HRV (20m en XS), gamme de résolution pouvant s'avérer un facteur limitant à petite échelle, typiquement à l'échelle de l'aménagement et de la réglementation :

*Moreover, the resolution of Landsat TM (30m) would seem to be relevant to large-scale problems. In the case of the river Stour model discussed above, average element resolution is of the order of 10 m for which Landsat TM data would be somewhat coarse [Bates et al., 1997].*

La seconde limitation provient de la non-opérationnalité de ces données en présence de couverture nuageuse, phénomène pourtant fréquent au moment des crues [Blyth, 1997]. Des traitements spécifiques pour éliminer l'influence des nuages ont même été tentés sur des données NOAA/AVHRR

(résolution de 1,1 km au nadir) [Sheng et al., 2001], données intéressantes pour des cours d'eau très larges, à cause de sa forte répétitivité temporelle égale à 6 heures et de son efficacité même pendant la nuit grâce à l'exploitation en émission [Puech et Vidal, 1995].

#### 2.3.1.1.2 Actif

La capacité du système actif SAR (Synthetic Aperture Radar) à percer les nuages procure à cette source de données un fort avantage sur les technologies passives [Brivio et al., 2002], avantage flagrant en zone tropicale. La comparaison, par exemple avec des données Landsat, tourne à l'avantage de la technologie radar :

*Landsat TM data are less appropriate for mapping inundation than the tested radar data [Townsend et Walsh, 1998].*

Pour [Imhoff M. et al., 1987], cette supériorité des données radar se concrétise également en terme de performance de détection des zones inondées avec 85% pour les données SAR contre 64% pour les données Landsat/MSS.

Un autre avantage du radar est son fort potentiel à détecter la présence d'eau même sous une forte canopée, notamment avec la bande L [Hess et al., 1990; Hess et al., 1995], et dans une moindre mesure avec la bande C si le système de polarisation est horizontal comme radarsat et non vertical comme ERS [Townsend, 2002].

Le principe de base pour extraire les zones inondées repose sur le fait que la surface en eau, globalement lisse contrairement aux zones hors eau plus rugueuses, va générer une réflexion spéculaire et donc un faible signal radar en retour [Badji et Dautrebande, 1997; Smith, 1997]. L'exploitation d'une image prise en période d'inondation se sert de cette caractéristique par une technique de photo-interprétation ou de seuillage d'une seule image (et une seule bande) [Sharma et al., 1996], souvent après une réduction préalable du chatoiement (speckle) par passage d'une filtre de convolution [Noyelle, 1995]. D'autres algorithmes automatiques plus évolués que le simple seuillage ont été mis au point sur une seule image et une seule bande, utilisant par exemple des opérateurs de morpho-mathématique [Guilloux, 1996] ou valorisant la texture en plus de la teinte [Oberstadler et al., 1997; Horritt, 1999]. L'utilisation d'une seule image ne permet cependant pas de s'affranchir des confusions possibles avec certaines zones telles que les surfaces en asphalte, les zones en eau permanentes ou des zones d'ombre créées par une topographie marquée [Badji et Dautrebande, 1997]. Une source de confusion plus importante encore survient lors de la présence de vent qui va perturber la surface de l'eau, ainsi que la présence de végétation émergée dont le traitement est difficile avec les configurations satellitaires actuelles [Henderson, 1995; Smith, 1997; Pearson et al., 2001].

Pour essayer de limiter certaines confusions, des auteurs ont cherché à valoriser plusieurs scènes SAR, dont une au moins se situe en période de crue ou de post-crue. L'analyse multi-temporelle permet en effet de détecter les changements entre les images hors crue et les images de crue. Cette détection des changements est le plus souvent basée sur l'amplitude, soit par interprétation visuelle avec la réalisation d'une composition colorée 3 canaux à partir de trois images [Kannen, 1995; Noyelle, 1995; Delmeire, 1997; Tholey et al., 1997], soit par des techniques automatiques avec la construction d'indices suivie d'un seuillage [Badji et Dautrebande, 1997]. Une autre technique de détection automatique du changement se base sur l'étude du degré de cohérence, différence de phase entre deux images [Marinelli et al., 1997], ou sur l'étude combinée des variations d'amplitude et de phase [Nico et al., 2000].

Il ressort de cette revue bibliographique que les résultats obtenus avec les méthodes automatiques d'extraction, même très évoluées, présentent des lacunes en terme de surface inondée extraite et de précision sur l'emplacement des limites (supérieur au décamètre). La comparaison avec des photographies aériennes a permis par exemple d'évaluer l'algorithme développé dans [Horritt, 1999] et de conclure à des performances en deçà des 80% :

*the SAR segmentation scheme classifying 75% by area of the shoreline region correctly. Seventy per cent of the shoreline coincides with the ground data to within 20 m. The main error is due to unflooded vegetation giving similar radar returns to open water [Horritt et al., 2001].*

Ces résultats expliquent que les approches qualitatives [Pearson et al., 2001], basées sur l'interprétation visuelle avec une approche multi-temporelle, sont globalement préférées. Les essais réalisés par [Oberstadler et al., 1997] confirment également cette préférence.

### 2.3.1.2. **Obtention des niveaux ou profondeur d'eau**

#### 2.3.1.2.1 Méthode directe

Une première voie de recherche a consisté à exploiter la relation directe entre l'absorption des rayonnements dans le visible et la longueur d'eau traversée, relation étudiée notamment dans [Defant, 1961]. Dès lors la mesure du rayonnement réfléchi par la surface constituant le fond de l'eau permet d'accéder à des profondeurs d'eau [Ibrahim et Cracknell, 1990; Gilvear et al., 1998; Bryant et Gilvear, 1999]. Cependant la relation simple n'est valable que pour de l'eau pure et de multiples facteurs tels que la couleur de l'eau, sa turbidité, la présence de chlorophylle, la non homogénéité de l'occupation du sol... viennent fortement limiter l'utilisation opérationnelle d'une telle méthode en période d'inondation [Hubert-Moy et al., 1992; Robin, 1992; Rango, 1994].

Une seconde voie est l'utilisation d'un télémètre radar (technique identique à l'altimétrie Laser décrite § 2.4.3.1.1) qui permet de mesurer précisément le niveau de l'eau. Le premier instrument de ce type installé sur plate-forme satellitaire a été le capteur Geosat de la U.S. Navy qui a été fonctionnel entre 1985 et 1989. Il a permis de mesurer le niveau des cinq grands lacs des États-Unis avec une erreur quadratique moyenne (rms) de 11 cm [Morris et Gill, 1994]. Plus récemment, d'autres télémètres sont apparus, comme le capteur TOPEX/POSEIDON qui a permis d'obtenir des précisions équivalentes sur le lac Tchad [Birkett, 2000]. De telles données ont également été utilisées sur une crue de l'Amazone, permettant l'accès aux niveaux d'eau avec une rms de 0,7 m pour une technique manuelle et de 1,2 m pour une technique automatique [Koblinsky et al., 1993]. La perte de précisions provient de la faible résolution spatiale (de l'ordre de 1 km) de telles données qui limitent leur utilisation à des applications océanographiques [Polidori, 1997], voire à de grandes surfaces en eau telles que celles des lacs, des mers intérieures ou des deltas de grands fleuves [Rango, 1994; Birkett, 1998].

#### 2.3.1.2.2 Méthode indirecte

Pour [Robin, 1992; Puech et Vidal, 1995], l'imagerie satellitaire ne saurait suffire à elle seule et il importe de la coupler à d'autres données pour améliorer son exploitation. Par ce couplage avec des mesures sur le terrain ou d'autres données géographiques comme la topographie, il est parfois possible, par une approche indirecte, de retrouver par télédétection des variables comme le niveau d'eau ou le débit.

L'idée la plus simple est de corrélérer les surfaces (ou largeurs) d'eau extraites des images de télédétection avec la connaissance de la loi reliant cette variable avec la hauteur d'eau. Soit cette

relation est déjà établie et alors il suffit d'appliquer le modèle de corrélation, soit, cas le plus fréquent pour les inondations, ce modèle doit être construit en se basant sur des mesures de hauteurs d'eau effectuées sur le terrain simultanément à la prise des données de télédétection. [Smith, 1997] énumère plusieurs tentatives d'établissement de cette relation plus ou moins fructueuses selon les cas. Le modèle linéaire est souvent utilisé, parfois en première approximation faute d'une série d'observations suffisamment longues comme dans [Imhoff M. et al., 1987]. Ensuite, si l'on connaît une loi de tarage reliant le débit à la hauteur, il est possible de déduire le débit à partir des surfaces ou largeurs d'eau extraites des images. Dans la même idée, [Puech et Ousmane, 1998] construisent et utilisent des courbes hauteur/surface/volume à partir de données SPOT pour des plans d'eau semi-permanents au Niger, afin d'étudier les variations des niveaux des plans d'eau déduites des images et les relier avec un bilan hydrologique. [Smith et al., 1995] ont réussi à établir une corrélation directe de bonne qualité entre une surface en eau extraite d'images radar ERS-1 SAR et des débits mesurés sur le terrain pour de larges rivières anastomosées au Canada.

Une autre idée est d'exploiter la localisation de la zone de contact eau/terre en la croisant avec une connaissance topographique du terrain pour en déduire le niveau d'eau. Cette méthode est d'autant plus efficace que les gradients topographiques sont faibles et que la localisation de la zone de contact est précise (ce qui nécessite de faibles résolutions spatiales et une bonne superposition avec les données topographiques) [Smith, 1997]. [Gupta et Banerji, 1985] furent dans les premiers à utiliser cette méthode avec des données Landsat/MSS et des cartes topographiques pour en déduire des niveaux d'eau, puis leurs variations et enfin les variations de volumes stockés dans des réserves d'eau en Inde. Pour plus de précision, ils se placèrent à la confluence des affluents avec le réservoir, zone de faible gradient topographique. Sur un affluent en crue du Mississippi, [Brakenridge et al., 1998] ont obtenu, avec une carte topographique au 1/24000 et des données ERS-1/SAR, des estimations de niveaux d'eau sur le profil en long de la rivière avec des intervalles de confiance à 90% de l'ordre de 1 à 2 m. La comparaison avec une simulation en régime permanent leur a permis d'obtenir des renseignements précieux sur l'amplitude de l'onde de propagation de la crue (*cf.*, Figure 2-6).

Après une interprétation visuelle d'une image ERS-1 SAR, [Oberstadler et al., 1997] ont obtenu une estimation des niveaux d'eau du Rhin lors d'une crue avec des écarts s'étendant entre 0,5 et 2 m par rapport à des mesures de terrain, écarts qu'ils expliquent par des erreurs d'interprétation dans la zone inondée et des imprécisions dans le positionnement de la limite eau/terre dues à la résolution des données ERS-1 SAR (12,5 m). Cependant, un calcul rapide montre qu'avec des gradients topographiques transversaux classiques dans les plaines d'inondation (*i.e.*, inférieur 1% dans certains secteurs au moins), une erreur d'emplacement de 1 pixel SPOT/XS (*i.e.*, 20 m) conduit à une erreur altimétrique inférieure à 0,20 m. Comme cette erreur est très largement inférieure à la qualité des topographies classiquement disponibles sur de larges zones, il semblerait que l'effort, dans ce type de méthode, doive prioritairement porté sur l'obtention d'une topographie de précision décimétrique. Cette remarque est confirmée par [Robin, 2000] qui a clairement montré les limites des topographies issues de cartes IGN au 1/25000 ou d'un MNT obtenu à partir d'un couple stéréoscopique d'images panchromatiques SPOT. Il est intéressant de noter que la synergie entre topographie et surface en eau extraite de télédétection peut être valorisée dans le sens inverse, à savoir pour reconstituer le relief à partir de la télédétection de plans d'eau dans des milieux où la micro-topographie joue un rôle très important, comme dans les marais côtiers à partir d'images ERS [Ramsey et al., 1997] ou les mares semi-permanentes du Niger [Piaton et Puech, 1992].

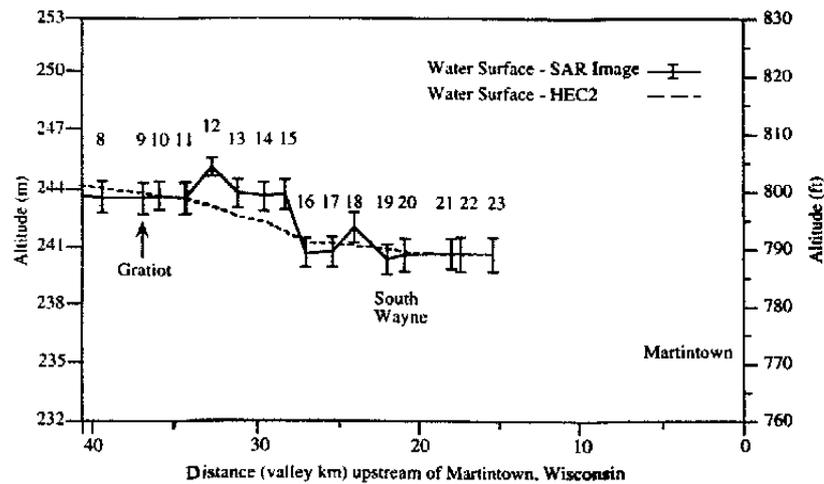


Figure 2-6 : profil en long des niveaux d'eau obtenus à partir d'images SAR et de cartes topographiques, superposé à un régime permanent simulé par le modèle HEC2 (d'après [Brakenridge et al., 1998])

### 2.3.1.3. Conclusion

Pour contrer les contraintes apportées par la plate-forme satellitaire, essentiellement en terme de résolution spatiale, spectrale et de résolution temporelle, de nombreux développements méthodologiques ont vu le jour. Parmi ceux-ci, les plus efficaces sont ceux qui limitent ces contraintes par la valorisation de données complémentaires. Ces données peuvent être des mesures de terrain simultanées ou historiques [Tholey et al., 1997], ou bien d'autres images de télédétection : [Puech, 1995] exploite conjointement des données à haute répétition temporelle (NOAA/AVHRR), des données ayant des résolutions spatiales fines (SPOT/XS, Landsat/TM) et des données de topographie ; [Wang et al., 1995] des images radar et optiques ; [Birkett, 2000] des images dans le PIR avec des données de télémètre radar... Cette dynamique de fusion de données localisées dans l'espace, est bien souvent fortement facilitée par le recours à un Système d'Information Géographique (*cf.*, § Annexe 5) [Guilloux, 1996; Tholey et al., 1997; Townsend et Walsh, 1998; Nico et al., 2000]. [Brivio et al., 2002], par exemple, utilisent le SIG pour desserrer la contrainte de temporalité en retrouvant la surface inondée maximum à partir d'une image SAR prise en période de récession et d'un algorithme d'extension basé une distance pondérée par la topographie (*cf.*, Figure 3-1).

Malgré tous ces efforts, les contraintes apportées par la plate-forme satellitaire restreignent leur intérêt à des applications à l'échelle régionale, c'est-à-dire à l'échelle de la planification comme dans [Blasco et al., 1992] pour les larges mangroves côtières du Bangladesh. La précision des grandeurs accessibles semble en effet insuffisante pour des applications locales à grande échelle comme l'exige la réglementation du risque d'inondation. Le recours à l'imagerie aérienne devient alors quasiment inévitable :

*For some mapping requirements, the resolution of satellite data will not be adequate and aircraft remote sensing will have to be employed [Blyth, 1997].*

### 2.3.2. Par imagerie aérienne

Tous les principes de bases énoncés ci-dessus pour l'exploitation de données satellitaires prises en période de crue restent bien entendu valables pour les données aériennes. Cependant la faible diversification des capteurs embarqués sur des vecteurs aériens jusqu'à l'apparition très récente

d'offres "à la carte" (cf., 2.1.3.2), et l'absence de programme avancé de télédétection dans les cellules de veille ont pour le moment limité la disponibilité de l'imagerie aérienne prise en crue à la photographie aérienne oblique ou verticale. De plus cette donnée analogique peut être préférée pour la finesse de son grain et son caractère commun qui la rend accessible même à des non spécialistes en télédétection. Ainsi elle peut aussi bien être utilisée par des hydrauliciens que par des aménageurs, des maires ou même la presse... En fonction du temps de réaction, de la présence de nuages et de la disponibilité d'un avion équipé d'une trappe et d'une chambre métrique, les prises de vue peuvent être verticales ou obliques.

### **2.3.2.1. Délimitation surfacique de la zone inondée**

La principale, et quasiment unique valorisation des clichés pris en période de crue consiste à extraire précisément les limites gauche et droite de la crue. La preuve en est que, lorsqu'ils existent, ils sont utilisés comme vérité terrain pour vérifier la qualité des zones inondées extraites d'images satellitaires [Imhoff M. et al., 1987; Biggin et Blyth, 1996; Horritt et al., 2001].

*Aerial photography would seem to be the way forward to validating the identification of the flood boundary from ERS-1 imagery [Bates et al., 1997]*

Ceci explique leur intérêt même si la cartographie des extensions des eaux à partir de photographies aériennes apparaît moins avantageuse économiquement que par une option satellitaire comme des données ERS/SAR [Biggin et Blyth, 1996]. La précision planimétrique de la délimitation peut en effet assez facilement descendre sous les dix mètres [Bates et al., 1997], moyennant une procédure adéquate de correction géométrique. De plus il a été démontré que l'extraction par photographie était bien moins chère que le recours aux relevés de terrain ([Blyth et Nash, 1980] in [Blyth, 1997]).

### **2.3.2.2. Obtention des niveaux ou profondeur d'eau**

La méthode directe qui relie radiométrie et profondeur d'eau a été appliquée avec succès pour extraire finement la morphologie fluviale (*i.e.*, dépôt de sable) dans des eaux peu profondes et peu turbides [Gilvear et al., 1998; Bryant et Gilvear, 1999]. Cependant les limitations fortes de cette méthode, à savoir la très faible turbidité et la très faible profondeur d'eau, la rendent inadaptée en période de crue.

En méthode indirecte par croisement avec la topographie, aucun travail formalisé n'a, à notre connaissance, été réalisé pour déduire les niveaux d'eau à partir de photographies aériennes, bien que cette méthode semble prometteuse étant donné la précision de l'extraction des limites et les progrès réalisés dans les restitutions topographiques.

### **2.3.2.3. Autres informations disponibles**

Les apports possibles de la photographie aérienne oblique ou verticale à grande échelle (supérieure au 1/20000) ne se limitent pas aux deux limites gauche et droite, mais de nombreuses informations internes à la zone inondée, énumérées dans [Doridot et Garry, 1987], sont accessibles. Les observations en période de montée des eaux permettent d'identifier les points bas, les cheminements préférentiels de l'eau et les meilleures implantations d'ouvrages de décharge. Les clichés réalisés en période de décrue ou de post-inondation (pris suffisamment vite après l'étalement maximal), fournissent la détermination précise de la submersion maximale des terres par la mise en évidence des lasses de crue, mais aussi la visualisation des zones d'érosion, d'atterrissement des sédiments, ou encore du fonctionnement des digues et levées de terres. Enfin, les photographies en période d'étalement des eaux, couvertures les plus classiquement réalisées, offrent la possibilité de tirer des informations sur les effets de barrages à l'écoulement, les zones de concentration des courants, les

points de fuite du cours d'eau, les transports de pollution, et même parfois sur la capacité érosive de l'eau.

Il est important de noter que plusieurs de ces informations internes à la zone inondée nécessitent la finesse du grain de l'émulsion photographique, ce qui peut les rendre inaccessibles depuis des images numériques même métriques.

Enfin, force est de constater que ces informations internes sont très peu valorisées. La principale cause provient très vraisemblablement de leur nature qualitative qui, si elle permet de se faire une représentation du phénomène à un niveau conceptuel, ne tolère guère les approches quantitatives comme la modélisation hydraulique. Seuls quelques rares essais de quantification de ce type d'informations internes ont été réalisés à notre connaissance, comme la détermination ponctuelle d'une vitesse maximale de surface par le repérage d'un corps flottant visualisé à deux instants différents sur un couple stéréographique de photographies [Lalanne-Bertoudicq, 1994].

#### **2.3.2.4. Conclusion**

L'imagerie aérienne permet d'accéder à une vision de l'inondation qui semble nettement plus en adéquation avec l'échelle fine de la réglementation que l'imagerie satellitaire. Ces avantages sur la télédétection satellitaire proviennent de sa flexibilité spatiale et temporelle, allée à des résolutions spatiales très fines. Représentée principalement par la photographie aérienne, elle permet d'accéder aux limites de crue, et donc de quantifier avec une bonne précision la grandeur "surface inondée". Mais elle regorge d'un potentiel beaucoup plus important via de nombreuses informations internes au champ d'inondation, potentiel malheureusement rarement exploité. Le recours à des méthodes indirectes, comme celles développées en télédétection satellitaire, semble être une voie intéressante pour transformer ces informations de nature qualitative en des grandeurs requises par les approches d'analyses de l'aléa (en thématique, précision ou échelle spatio-temporelle).

Parmi ces images aériennes ayant un fort potentiel informatif sur le fonctionnement interne de la plaine inondée, la photographie verticale est souvent préférée [Doridot et Garry, 1987]. La photographie oblique apparaît alors comme un très bon substitut ou complément par sa réactivité encore plus forte à l'événement et sa plus faible dépendance par rapport aux conditions météorologiques (possibilité de vol sous les nuages).

#### **2.3.3. En résumé**

Les multiples avantages d'images de télédétection prises en période de crue (prise d'information à distance, temps d'acquisition, vision instantanée, objectivité...) en font une donnée très prisée et expliquent les nombreux développements méthodologiques élaborés en vue de leur exploitation.

La complémentarité des sources d'images (aérien vs satellitaire, passif vs actif) en terme de caractéristiques spectrales (*i.e.*, longueur d'onde) mais aussi en terme de résolution spatiale et temporelle a également poussé vers la diversification des méthodes afin d'explorer chaque archive existante. Il faut noter que le nombre de ces archives est en constante augmentation, et que si les images provenant de satellites sont aléatoires, la prise d'images d'origine aérienne peut être quasiment systématisée moyennant une anticipation par la mise en place d'une cellule de veille par exemple.

Pour l'instant, la délimitation surfacique de la zone inondée au moment de la prise de vue, voire du maximum de crue pour des images prises en décrue, est de loin l'information la plus recherchée et valorisée. La qualité d'extraction de la "tache d'eau" est très variable selon les données sources et la méthode utilisée, mais une limitation systématique provient de la résolution spatiale des données

sources, limitant ainsi fortement l'intérêt des données satellitaires "traditionnelles" dans des problématiques à l'échelle de la réglementation.

Bien qu'issus de développements méthodologiques très intéressants car prévoyant l'adjonction de données exogènes, les résultats de niveaux d'eau obtenus à partir de ces données satellitaires "traditionnelles" semblent avoir une portée encore plus limitée du fait de leur faible qualité.

Si bien que la délimitation de la surface inondée, issue de photographie aérienne, semble aujourd'hui la seule information "extractible" de télédétection compatible avec l'échelle de la réglementation. La télédétection THRS (Très Haute Résolution Spatiale) possède tous les atouts pour apporter une information de même qualité.

Enfin, les nombreuses informations internes au champ d'inondation, principalement accessibles à partir des photographies aériennes de crue, apparaissent nettement comme une source d'information très riche non valorisée. Cette lacune d'exploitation peut être expliquée par la nature qualitative de ces informations qui nécessitent des traitements particuliers pour être exploitables...

## 2.4. Couplage télédétection / analyse de l'aléa

### 2.4.1. Introduction aux problèmes de couplage

Si la télédétection constitue un moyen privilégié d'observer la plaine, que ce soit avec des images hors crue pour une caractérisation physique de la plaine ou avec des images prises pendant la crue pour une caractérisation directe de l'événement, son assimilation avec les méthodes d'analyse de l'aléa existante n'est pas forcément immédiat. Celle-ci nécessite en effet une adéquation entre les *informations accessibles* par télédétection et les *informations requises* par l'approche choisie. Pour [Puech, 2000], cette adéquation s'exprime en terme de thématique (végétation vs coefficient de rugosité), de précision (quantitatif vs qualitatif), d'échelle spatiale (ponctuel vs surfacique) ou temporelle (conformité en date ou encore instant vs durée).

Ces problèmes d'adéquation impliquent de définir des techniques d'exploitation d'images propres à chaque problème, rendant inséparables les fonctions de "télédéacteur" et de "thématicien". En effet, seul le rapprochement entre ces deux fonctions permet de procéder aux adaptations nécessaires. Pour [Caloz et Puech, 1996], ces adaptations concernent soit les grandeurs extraites des images pour passer d'informations primaires à des informations secondaires plus adaptées au schéma d'analyse, soit les schémas d'analyse eux-mêmes qui doivent être repensés en tenant compte des nouvelles données :

*Further advances in the use of the observations depends on the development of new models that need and can usefully assimilate new observations [Pearson et al., 2001].*

La suite de ce chapitre se focalise sur le couplage avec les principales méthodes d'analyse de l'aléa déjà existantes, à savoir l'approche hydrogéomorphologique (*cf.*, 2.4.2) et la modélisation hydraulique (*cf.*, 2.4.3), ce qui limite l'assimilation à l'adaptation des grandeurs extraites.

Notons également que si l'adaptation des modèles semble plus flexible en hydrologie (*e.g.*, développement de modèles prenant en compte la surface des zones saturées pour faciliter le couplage avec les données "radar" [Gineste, 1998]), elle se restreint en hydraulique aux développements pratiques des modèles 2D ou 3D.

## 2.4.2. Assimilation dans l'approche hydrogéomorphologique

Basée dans sa conception même sur des données de télédétection hors inondation, la question de l'assimilation de telles données ne se pose pas de manière classique pour l'approche hydrogéomorphologique. C'est pourquoi ce paragraphe se propose dans un premier temps de rappeler les modes d'exploitation des données hors inondation traditionnellement réalisés, pour ensuite déboucher sur les apports potentiels de nouvelles données. Enfin, il se conclut sur l'intérêt d'apporter des observations en crue pour approcher l'échelle de la réglementation. Seules les principales exigences de l'approche hydrogéomorphologique sont discutées ici ; à savoir **la détection des éléments morphologiques situées à l'interface entre les différentes unités** (e.g., talus, terrasses) et la détection de **l'occupation / utilisation du sol** allant des pratiques culturelles aux ouvrages anthropiques ayant un rôle hydraulique direct important.

### 2.4.2.1. Exploitation classique de données hors inondation

Les **données satellitaires "traditionnelles"** (i.e., disponibles jusqu'à très peu de temps et donc avec des résolutions au mieux décimétriques) ont été utilisées pour élaborer des premiers zonages hydrogéomorphologiques relativement grossiers dans des problématiques touchant l'évaluation de la ressource en eau à une échelle régionale [Shankar Narayana et al., 1996]. Pour l'analyse de l'aléa inondation, leur utilisation permet d'évaluer par exemple les limites des bassins versants, les capacités de concentration des bassins par des analyses de forme, les rétrécissements importants du lit majeur pouvant conduire à des accumulations d'eau... Intéressantes à l'échelle de la planification, elles deviennent totalement inefficaces à l'échelle de la réglementation puisque la majorité des structures linéaires par exemple ne sont pas détectables avec de telles résolutions spatiales.

Par contre les **photographies aériennes verticales** constituent véritablement le document de base de l'approche hydrogéomorphologique qui est construite et basée sur leur analyse. En effet elles permettent [Doridot et Garry, 1987; Prunet, 1998] :

- de réaliser d'un orthophotoplan après redressement et agrandissement éventuel pour servir de fond de plan et de référentiel géométrique ;
- de visualiser la micro-topographie par stéréoscopie, voire de la restituer par stéréophotogrammétrie en recourant à des cabinets de géomètres spécialisés ;
- de déterminer l'occupation / utilisation du sol, en particulier les infrastructures ayant un rôle hydraulique comme la présence de haies, routes "drain", digues, fossés, remblais, habitats, formations végétales, chenaux de crue, points préférentiels de débordement, plans d'eau....
- d'évaluer, par analyse diachronique, les modifications apportées par l'homme à la plaine alluviale (e.g., drainage agricole, construction de digues, remembrement, recalibrage de fossés, imperméabilisation de chemins ruraux ou de zones de stationnement...)

La force de la photographie verticale est de permettre, par analyse stéréoscopique à l'aide d'un simple stéréoscope et donc à moindre coût, une visualisation du paysage pouvant être interprété simultanément en terme de contenu sémantique et de micro-topographie. C'est sans aucun doute cette propriété qui fait de la photographie verticale le document de télédétection qui répond le mieux aux besoins de la cartographie hydrogéomorphologiques des zones inondables [METL/MATE, 1996].

Selon les auteurs de cette méthode, cette visualisation permet de se forger une représentation conceptuelle du fonctionnement de la plaine puis, après ajout et confrontation avec des données de terrain, de délimiter des unités hydrogéomorphologiques et donc d'accéder aux zones d'inondation

fréquente, annuelle, décennale ou exceptionnelle [Vidal et al., 2000]. Pour satisfaire une vision à la fois suffisamment fine du relief et suffisamment étendue pour ne pas perdre la perception générale de la structure de la plaine, l'échelle du 1/10 000 pour ces clichés verticaux semble la plus adaptée [METL/MATE, 1996; Lambert et al., 2000].

Par sa capacité à apporter une information plus précise sur certains secteurs et plus facilement interprétable, la photographie aérienne oblique constitue une source d'information très souvent utilisée en complément des photographies aériennes verticales.

#### 2.4.2.2. *Apports potentiels de nouvelles données hors inondation*

Les nouvelles données de *télédétection à très haute résolution spatiale (THRS)* offrent un support d'information présentant a priori les qualités requises pour répondre aux attentes de l'approche hydrogéomorphologique : résolution métrique et vision stéréoscopique ; tout en présentant nettement moins de distorsions géométriques que les photographies. De plus comme la prise d'informations n'est pas tributaire d'un événement de crue, les contraintes d'acquisition sont moins contraignantes et la disponibilité en images plus importante. Avec sa résolution métrique et une gamme de capteurs (en radiométrie) assez large, le potentiel de la THRS pour détecter l'occupation / utilisation du sol répond assez précisément aux besoins de l'approche hydrogéomorphologique dans ce domaine (au moins par des techniques non-automatiques de photo-interprétation). Les capacités de la THRS à restituer du relief sont insuffisantes pour l'approche hydrogéomorphologique. En effet l'expérience montre que la précision altimétrique des MNT issus d'images de télédétection est de l'ordre de deux fois la taille du pixel. La précision altimétrique de deux mètres annoncée par la société Spaceimaging (<http://www.spaceimaging.com/>) pour les produits 3D issus d'images IKONOS (résolution de un mètre) confirme cette règle. Or la détection des transitions entre zones hydrogéomorphologiques requiert bien souvent la détection de dénivelées de l'ordre de quelques décimètres. Cette caractéristique constitue le défaut majeur de la THRS par rapport à la photographie aérienne verticale. Un second défaut, plus anecdotique, réside dans l'investissement technique et financier nécessaire pour permettre la vision stéréoscopique à partir d'images numériques (*i.e.*, sur écran d'ordinateur grâce à l'utilisation de logiciels spécifiques).

En *aéroporté*, la *vidéographie* présente l'avantage d'offrir, à partir de moyens légers, une image continue de la plaine ayant un fort potentiel en terme de reconnaissance de l'occupation du sol. Avec une résolution spatiale de 1 m, son utilisation après la crue de la rivière Saguenay en 1996 [Fung et al., 1998], a démontré de bonnes capacités d'analyse fine de la plaine. [Bryant et Gilvear, 1999] ont, quant à eux, utilisé des images aériennes multitudes à 2 m de résolution et à 12 canaux pour détecter, par traitement automatique, les changements de l'occupation / utilisation du sol. La satisfaction des exigences de l'approche hydrogéomorphologiques par ce type de produits est doublement limitée : la vision unique d'un tel dispositif ne permet pas l'appréhension du relief et de forts problèmes de géométrie sont encore à déplorer. Si la solution (*cf.*, § 2.2.2.2.2) qui consiste à embarquer dans l'avion plusieurs capteurs, une centrale inertielle et un GPS différentiel permet de contrer ces deux limites, elle conduit à des produits dont le prix est tel qu'ils ne correspondent plus à la philosophie de cette approche qualitative ou semi-qualitative.

#### 2.4.2.3. *Intérêt des observations de crue*

Bien que l'approche hydrogéomorphologique s'appuie principalement sur des données de télédétection prises hors crue, les images en crue présentent également de forts intérêts. Le premier est

de contribuer au processus cognitif qui consiste à se forger une image mentale du fonctionnement de la plaine pendant l'inondation (*i.e.*, une **représentation conceptuelle** du phénomène).

Une exploitation approfondie de ces documents offre cependant l'accès à des informations quantitatives sur des événements historiques dont la valorisation par l'approche hydrogéomorphologique peut lui permettre de produire des résultats semi-quantitatifs et donc de se rapprocher de l'échelle de la réglementation (*cf.*, 1.2.4.3). Pour l'instant, seule la "surface inondée", unique grandeur quantifiée facilement accessible par télédétection, vient œuvrer dans ce sens en venant conforter / valider / affiner le zonage hydrogéomorphologique. Les nombreuses informations internes, bien qu'adaptées à l'approche hydrogéomorphologique de par leur nature qualitative, ont un apport limité à la représentation conceptuelle du phénomène, faute d'adéquation dans leur état brut en terme de précision (information non quantifiée) ou d'adéquation thématique.

Globalement, il semblerait que plus l'information historique incorporée est précise, complète et quantifiée, plus l'approche hydrogéomorphologique peut espérer se rapprocher de l'échelle locale de la réglementation et de l'aménagement. Cette voie a été initiée avec des données de terrain par l'apport de niveaux d'eau historiques répertoriés en tant que laisses de crue [Lambert et al., 2000].

#### 2.4.2.4. **Conclusion**

Conçue à partir de la photographie aérienne verticale hors crue, l'approche hydrogéomorphologique peut difficilement se passer de cette information qu'elle exploite pleinement en restant, fidèle à sa philosophie, sur une interprétation assez qualitative du paysage. Beaucoup d'autres sources de télédétection hors inondation viennent utilement la compléter, en offrant notamment soit d'autres points de vue, soit des observations facilement mobilisables à des dates différentes.

Les données de crue permettent, par une exploitation qualitative, d'affiner la représentation conceptuelle des écoulements dans la plaine. Une exploitation quantitative a quant à elle le potentiel d'affiner et de préciser le résultat du zonage.

#### 2.4.3. **Assimilation dans les modélisations hydrauliques**

Méthode non basée sur des données de télédétection, la modélisation hydraulique s'est vite tournée vers les données de télédétection prises hors inondation pour extraire les paramètres descriptifs de la plaine dont elle a besoin, à savoir la topographie et la rugosité.

Plus récemment, avec la multiplication des modélisations finement distribuées, l'intérêt s'est également porté sur les données de télédétection en crue pour valider les variables de sortie du modèle ou estimer les paramètres de calage.

*However, two particular areas are changing particularly rapidly as new models and new observations are brought together. The first ... The second is the use of different types of remotely sensed data to initialise and validate two- and three-dimensional models of river flooding [Pearson et al., 2001].*

##### 2.4.3.1. **Comme paramètre descriptif**

###### 2.4.3.1.1 La topographie

Principal paramètre descriptif requis par la modélisation hydraulique, la télédétection contribue fortement à l'évolution vers des modélisations de plus en plus finement distribuées. Toutefois

l'extrême sensibilité des modèles à cette information soulève des questionnements sur l'adéquation entre la précision requise et la précision obtenue :

*En matière de cartographie des zones inondables, la plus grande partie des efforts se tourne vers le développement et la mise en œuvre de modèles hydrauliques sophistiqués toujours en admettant que les données topographiques nécessaires aux calculs seront non seulement disponibles, mais encore de la plus haute précision [Metzger et Consuegra, 1998].*

La précision requise par les modélisations hydrauliques en plaine d'inondation étant de l'ordre du décimètre, les données issues de télédétection satellitaires "traditionnelles" sont inefficaces, si bien que les topographies classiquement utilisées proviennent de levés de terrain et/ou de campagnes photogrammétriques réalisées à partir de photographie à petite échelle (cf., A4\_4 pour des estimations de la qualité obtenue en fonction de l'échelle des photographies).

L'arrivée récente de données issues de télémètres laser aéroportés apparaît comme une source d'information, susceptible de remplacer la photogrammétrie pour des raisons de rapidité d'acquisition. Plusieurs utilisations de données LIDAR dans des modélisations finement distribuées ont déjà été réalisées [Marks et Bates, 2000; Priestnall et al., 2000]. Un doute subsiste toutefois sur l'efficacité des procédures automatiques de filtrage des éléments du sursol quant à la conservation des structures morphologiques linéaires telles que des digues surmontées d'une haie, éléments si importants en terme de paramétrisation (cf., § A3\_2).

Quelle que soit la technologie spatiale retenue, photogrammétrie ou télémètres laser, un travail de complément par des levés de terrain est nécessaire pour caler et valider ces techniques, mais aussi pour obtenir la bathymétrie du lit mineur, la topographie de certains ouvrages (e.g., seuil, siphon, vanne), et éventuellement la topographie de certaines structures morphologiques très étroites (e.g., murets) difficilement repérable à distance.

Enfin il ne faut pas oublier que l'obtention sur la plaine d'un MNT "générique" de bonne qualité n'est pas suffisant pour des applications hydrauliques. En effet la nécessaire étape de transformation entre ce MNT générique et un "MNT hydraulique" (i.e., adapté à un schéma de discrétisation du modèle hydraulique retenu) est susceptible d'apporter une dégradation de qualité (cf., § A3\_1).

*L'incertitude n'est pas dans la modélisation elle-même mais bien dans la transformation du paysage dans l'espace de la modélisation [Beven et al., 2001].*

#### 2.4.3.1.2 La rugosité

Le besoin d'accéder à un paramètre de rugosité spatialisé dans les modèles hydrauliques distribués a conduit plusieurs auteurs à se pencher sur les potentialités de la télédétection.

L'idée fondamentale est de se baser sur la détermination de l'occupation du sol, puis d'utiliser les tables de correspondance (fournies dans la plupart des manuels d'hydraulique générale) qui relient la valeur du paramètre "rugosité" à l'occupation du sol. Après l'échec de l'utilisation d'une occupation du sol obtenue par traitement automatique d'une image Landsat-TM (résolution de 30m), [Colby et al., 2000] ont eu recours à une photo-interprétation de clichés digitalisés à 1 m avec guère plus de succès.

Afin d'affiner cette correspondance, certains auteurs [Priestnall et al., 2000; Cobby et al., 2001] ont cherché à utiliser en plus de la nature de l'occupation du sol, sa hauteur obtenue à partir de données laser selon un schéma similaire à celui exposé en Figure 2-7.

Si l'idée d'utiliser la télédétection pour spatialiser le coefficient de rugosité est séduisante, les remarques énoncées en Annexe 3 (*cf.*, § A3\_3) montrent qu'une estimation complètement a priori de ce paramètre est vaine. Une phase de calage est donc rendu obligatoire puisque les coefficients de rugosité ne peuvent être vus comme des paramètres purement descriptifs.

Par contre, si les informations dérivées des images ne permettent pas d'estimer ces coefficients de rugosité en valeur absolue, il semblerait qu'elles puissent utilement les contraindre en valeur relative (ordonnancement), voire en ordre de grandeur.

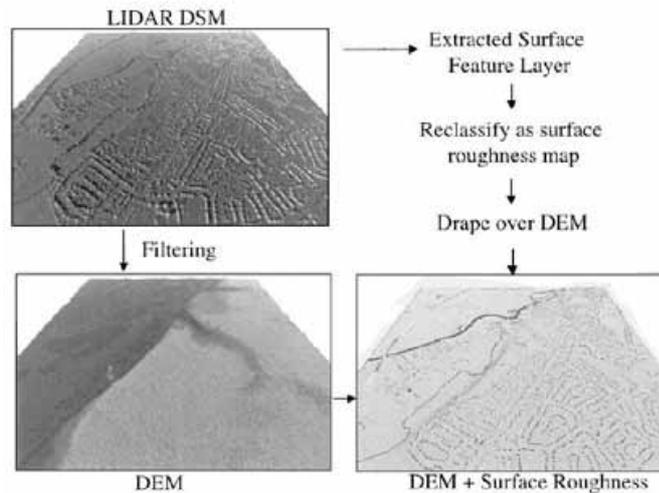


Figure 2-7 : obtention conjuguée du relief et de la rugosité (d'après [Priestnall et al., 2000])

#### 2.4.3.2. Comme variable des modèles

##### 2.4.3.2.1 Rappel sur les problèmes de validation de modèle

Profitant entre autres du développement de la télédétection qui facilite l'accès aux principaux paramètres descriptifs de la plaine, les modèles hydrauliques finement distribués (2D) sont de plus en plus utilisés. En effet, leur potentiel à fournir, à chaque pas de temps et en chaque point de calcul, la valeur des variables d'état hauteur d'eau et vitesse les font apparaître comme l'outil le plus apte à répondre aux exigences d'une gestion du risque d'inondation dans une perspective d'aménagement et de réglementation (*cf.*, § 1.1.4). Si le modèle finement distribué répond approximativement bien à ces exigences en terme de thématique, d'échelle spatiale et temporelle, il reste néanmoins à vérifier l'adéquation en terme de précision et de justesse, c'est-à-dire à valider le modèle, sans quoi sa capacité à répondre aux exigences d'une politique de gestion du risque d'inondation peut être remise en cause.

Mais la notion de validation d'un modèle a-t-elle un sens dans le domaine des sciences environnementales ? Si cette terminologie persiste, plusieurs auteurs s'accordent à dire que cette notion est erronée voire absurde puisque la légitimité d'un modèle ne peut être remise en cause que par un processus de "falsification" : un modèle est non valide si au moins une de ces hypothèses est réfutée. La position de ces auteurs consiste à dire que le manque de données de contrôle, ainsi que les incertitudes qui entachent aussi bien ces données lorsqu'elles existent que les paramètres d'entrée, ne peuvent conduire qu'à une validation très partielle de ces modèles dont l'objectif est de représenter un phénomène complexe distribué et difficilement observable.

*Modellers practically never declare their models to be "invalidated", primarily because ground water models nearly always have enough adjustable parameters to fit*

*a limited set of field observations [National Research Council, 1990] in [Anderson et Bates, 2001].*

*Models cannot be validated [Oreskes et Belitz, 2001].*

Le concept d'équifinalité (*cf.*, 1.2.6.3) apparaît donc inhérent à ce type de modélisation : les jeux de contrôle sont trop limités pour permettre de réfuter plusieurs structures/paramétrisation de modèles, ce qui conduit donc à les accepter.

Plusieurs voies sont possibles pour avancer dans cette problématique de validation/falsification [Bates et Anderson, 2001] et limiter la subjectivité dans l'acceptation ou non d'un modèle. La première consiste à se pencher sur les solutions numériques [Lane, 1998] (*e.g.*, conservation de la masse), ou sur des cas simples particuliers où des solutions analytiques existent. Mais cette étape n'est pas suffisante car elle ne teste pas les problèmes dans des configurations physiques complexes telles qu'elles existent dans la nature. La mise en oeuvre de modèle physique réduit constitue une deuxième voie dont l'inconvénient majeur est lié au changement d'échelle entre le modèle réduit et la réalité [Horritt, 2000]. Il est également possible de faire une validation croisée entre différents modèles, mais la comparaison avec des données d'observations du phénomène provenant d'événements réels constitue pour beaucoup la voie de contrôle la plus satisfaisante.

*Nevertheless, for many hydrological modellers comparison to field data is a key test a model must undergo in order to prove its utility, despite the relatively data-poor environments in which we work and the consequent loss of experimental control [Bates et Anderson, 2001].*

Encore faut-il pouvoir accéder à des jeux de données de contrôle qui soient en adéquation avec les objectifs de ces modèles distribués. C'est à ce niveau que les images de télédétection prises en période de crue ont un rôle majeur à jouer.

#### 2.4.3.2.2 Rappel sur les problèmes de calage

Dans la modélisation distribuée de phénomène complexe, le besoin en données d'observation du phénomène est démultiplié, car en plus du contrôle, ces données doivent servir à estimer l'ensemble des paramètres de calage. En modélisation hydraulique, ces paramètres de calage sont principalement les coefficients de rugosité (un par maille de calcul) auxquels peuvent s'ajouter des paramètres de lois d'ouvrages. Leur estimation a priori étant quasiment impossible (*cf.*, § A3\_3 en Annexe 3), il ne reste guère que l'estimation par méthode inverse qui consiste à ajuster les paramètres du modèle de façon à minimiser les erreurs entre la (ou les) variable(s) de sortie simulée(s) et les observations [Gineste, 1998]. Cette voie nécessite d'établir une fonction "objectif" (*i.e.*, un critère mathématique mesurant le degré d'ajustement entre les valeurs observées et simulées), puis de trouver l'ensemble des paramètres qui la minimisent.

Des méthodes automatiques pour trouver le jeu de paramètre optimum ont été recherchées (*cf.*, [Anastasiadou-Partheniou et Samuels, 1998] pour des modélisations 1D et [Barros, 1996] pour des modélisations 2D), mais leurs développements semblent se heurter à des problèmes méthodologiques mais aussi philosophiques car la recherche d'un optimum unique est en désaccord avec le concept d'équifinalité.

De ce fait, les seules méthodes réellement utilisées consistent à explorer le domaine des valeurs possibles, soit avec un pas d'espace systématique, soit avec une stratégie de tirage aléatoire (*i.e.*, méthode de Monte Carlo) pour limiter le nombre de simulation. Cette dernière approche est aujourd'hui largement utilisée au travers de la méthode stochastique GLUE proposée par [Beven et

Binley, 1992], aussi bien pour caler les paramètres d'un modèle que pour gérer l'incertitude sur la valeur des paramètres (e.g., [Aronica et al., 1998]). Cependant les temps de calcul limitent fortement ce type d'investigation à des modèles simples (type 1D), si bien que le calage (et l'analyse de sensibilité) des modèles 2D aux éléments finis constitue actuellement une phase très délicate.

*While this is certainly a rigorous and useful way to go forward, the need for a large number of simulations to cover a parameter space of high dimensionality is a disadvantage, especially with complex finite element codes which are computationally intensive [Horritt, 2000].*

Pour essayer de sortir de cette impasse, il est courant de réduire drastiquement le nombre d'inconnues en faisant l'hypothèse de l'uniformité des coefficients de rugosité dans le lit mineur et dans le lit majeur [Aronica et al., 1998; Bates et al., 1998c; Marks et Bates, 2000]; voire même de fixer le rapport entre ces deux coefficients afin de limiter encore plus le nombre de combinaisons possibles [Horritt, 2000].

*The simplistic assumption of uniform frictions over the channel and the floodplain is unrealistic but does make for a manageable calibration problem [Horritt, 2000].*

Pour desserrer cette contrainte, [Romanowicz et al., 1996] ont élaboré une méthode de calage qui permet de différencier des coefficients de rugosité par tronçon de rivière. Cette méthode s'appuie cependant sur des données de type hydrogramme entre chaque tronçon, contrainte (contournée dans son illustration par le recours à des résultats d'un modèle hydraulique 2D) qui limite fortement sa portée.

#### 2.4.3.2.3 Évolution des besoins en données de calage et de contrôle

Si l'utilisation de la télédétection pour estimer les paramètres descriptifs de la plaine est largement répandue, l'idée de recourir aux données de crue pour valider les résultats des modèles, ou pour en estimer les paramètres de calage, est beaucoup plus récente. Le calage et la validation des modèles ont en effet longtemps reposé sur une seule variable synthétique de sortie du modèle : un hydrogramme situé en un point du lit mineur, bien souvent à l'extrémité aval du domaine modélisé. Les techniques de comparaison les plus répandues reposent soit sur des variables secondaires synthétiques comme le volume transité ou le déphasage [Bates et al., 1998b], soit sur l'analyse de la similarité des hydrogrammes eux-mêmes via une comparaison visuelle [Green et Stephenson, 1986] ou un critère mathématique (e.g., critère basé sur des écarts quadratiques [Nash et Sutcliffe, 1970]). Cependant le développement des modèles distribués a réellement fait apparaître la nécessité d'une validation qui ne se borne pas aux limites du système :

*It has been shown that without internal validation it may be impossible to calibrate hydraulic models to produce acceptable spatially distributed predictions [Bates et al., 1998c].*

Cette validation à l'intérieur du domaine modélisé peut se faire avec des données hydrométriques présentes à l'intérieur du domaine modélisé comme dans [Bates et al., 1998c], mais la faible densité des stations de mesures est une réelle limitation à cette approche [Bates et Anderson, 2001]. De plus, cette validation reste limitée à des données mesurées et donc représentatives du flux en lit mineur.

*The use of point (essentially zero-dimensional in space) data to validate two-dimensional models is fundamentally suspect, as there is no indication that spatial flow patterns are being approximated reasonably by the model [Horritt, 2000].*

Pour contrer cette limitation, une alternative est de recourir aux autres informations disponibles par l'approche historique de terrain, à savoir les témoignages et les repères de crue qui permettent d'accéder à des niveaux d'eau maximaux à l'intérieur de la plaine d'inondation, comme dans [Aronica et al., 1998]. Ce type de données présente toutefois des limites en terme de disponibilité, de fiabilité/précision sur les valeurs atteintes mais également sur l'instant où se sont produits ces maxima. Selon la dynamique spatio-temporelle de l'événement analysé, cette question de correspondance temporelle peut être très importante [Brakenridge et al., 1998], et tend à renforcer l'intérêt de la vision instantanée offerte par les données de télédétection.

#### 2.4.3.2.4 Méthodologies d'assimilation des données de télédétection de crue

L'assimilation des données de télédétection de crue pose à nouveau le problème de l'adéquation entre les variables de caractérisation de la crue accessibles à partir des images, et les variables d'état des modèles hydrauliques (*e.g.*, hauteur et vitesse).

Or, dans l'état actuel des techniques d'exploitation, la délimitation de la surface inondée est la seule grandeur accessible par télédétection pouvant intéresser la modélisation (*cf.*, § 2.3). Les validations de modèles hydrauliques par télédétection passent donc toutes par cette grandeur qui est interprétée comme une forme dégradée des niveaux d'eau, dégradation non pas dans sa distribution spatiale mais dans sa temporalité (instant unique de la prise de vue) et de sa précision (estimation qualitative codée sous une forme binaire "présence ou absence d'eau") [Aronica et al., 2002].

Le mode de comparaison des données est alors souvent basé sur une simple comparaison visuelle et aucune quantification n'est donnée. C'est le cas de [Kjelds et Jorgensen, 1997] qui utilisent une image SAR pour valider un modèle 1D sur un bassin versant de 82000 km<sup>2</sup> au Bangladesh, ou encore le cas de [De Jonge et al., 1996] qui utilisent des photographies aériennes de crue pour valider un modèle 1D sur une portion de la Meuse.

Pour des besoins de quantification, différentes mesures de performance, notées  $P^{<1>}$ , ont été proposées pour tester l'ajustement entre la zone inondée  $Z_{\text{mod}}$ <sup>12</sup> issue du modèle et celle issue de données de contrôle  $Z_{\text{ref}}$ . Trois d'entre elles sont discutées dans [Aronica et al., 2002]. La première,  $P^{<1>}$  (*cf.*, **Eq. 2-1**), proposée par l'auteur présente l'inconvénient d'être tributaire de la surface du domaine modélisé, ce qui ne permet pas de comparer les valeurs trouvées d'un site à l'autre, ou d'un modèle à un autre.

$$P^{<1>} = \frac{S(Z_{\text{mod}} \cap Z_{\text{ref}}) * S(\overline{Z_{\text{mod}}} \cap \overline{Z_{\text{ref}}})}{S(Z_{\text{tot}})} \quad \text{Eq. 2-1}$$

La seconde,  $P^{<2>}$  (*cf.*, **Eq. 2-2**), proposée par [Bates et De Roo, 2000; Horritt et Bates, 2001b], présente l'inconvénient de favoriser les sur-prédictions du modèle.

$$P^{<2>} = \frac{S(Z_{\text{mod}} \cap Z_{\text{ref}})}{S(Z_{\text{mod}} \cup Z_{\text{ref}})} \quad \text{Eq. 2-2}$$

Enfin, la troisième,  $P^{<3>}$  (*cf.*, **Eq. 2-3**), proposée par [Franks et al., 1998], semble s'affranchir de ces défauts. Nettement plus contraignante en terme de résultat, cette fonction objectif associe une notion de même superficie (*i.e.*, 1<sup>er</sup> terme) et d'équilibre entre les erreurs de sur-prédiction (*i.e.*, 2<sup>ème</sup> terme) et de sous-prédiction (*i.e.*, 3<sup>ème</sup> terme).

<sup>12</sup> notations :  $Z$  (en gras) représente un ensemble, c'est-à-dire une surface spatialisée,  $S(Z)$  la surface de  $Z$  et  $\overline{Z}$  le complémentaire de  $Z$  par rapport à  $Z_{\text{tot}}$ , ensemble formant le domaine modélisé.

$$P^{<3>} = \left(1 - \frac{|S(Z_{\text{mod}}) - S(Z_{\text{ref}})|}{S(Z_{\text{ref}})}\right) * \left(1 - \frac{S(Z_{\text{mod}} \cap \bar{Z}_{\text{ref}})}{S(Z_{\text{mod}})}\right) * \left(1 - \frac{S(\bar{Z}_{\text{mod}} \cap Z_{\text{ref}})}{S(Z_{\text{ref}})}\right) \quad \text{Eq. 2-3}$$

Cependant, pour des raisons évidentes de symétrie, un estimateur de type  $P^{<4>}$  semble préférable (cf., Eq. 2-4).

$$P^{<4>} = \left(1 - \frac{|S(Z_{\text{mod}}) - S(Z_{\text{ref}})|}{S(Z_{\text{mod}} \cup Z_{\text{ref}})}\right) * \left(1 - \frac{S(Z_{\text{mod}} \cap \bar{Z}_{\text{ref}})}{S(Z_{\text{mod}})}\right) * \left(1 - \frac{S(\bar{Z}_{\text{mod}} \cap Z_{\text{ref}})}{S(Z_{\text{ref}})}\right) \quad \text{Eq. 2-4}$$

#### 2.4.3.2.5 Retombées et limites actuelles

Les retours d'expérience concernant l'assimilation de données de télédétection sont peu nombreux et se limitent à l'introduction de la zone inondée.

Un premier concerne l'exploitation d'une surface inondée extraite d'une image SAR validée par des photographies aériennes [Horritt, 1999; Horritt et al., 2001] pour estimer les paramètres de friction utilisés dans un modèle 2D aux éléments finis sur une portion de la Tamise en Angleterre [Horritt, 2000]. L'assimilation de la surface inondée a fait apparaître qu'une distribution non uniforme des coefficients de rugosité semblait nécessaire, et a permis de réduire le domaine des paramétrisations acceptables.

*the remotely sensed data has proved invaluable, however, in the calibration process, and has reduced the equifinality problem inherent in calibrating distributed models with point hydrometric data [Horritt et Bates, 2001b].*

L'assimilation d'une surface inondée déduite d'une image RADARSAT lors d'une crue de la rivière Severn au Royaume-Uni, en plus d'un hydrogramme aval, a encore permis de mettre en défaut un modèle semblant pourtant satisfaisant lorsqu'il était estimé par rapport à une seule de ces deux données [Horritt et Bates, 2001a].

Cependant, le pouvoir de discrimination apporté par la surface inondée s'est avéré globalement décevant. Un travail approfondi sur la Meuse [Bates et De Roo, 2000] a montré que les surfaces inondées extraites à partir de données satellitaires radar ne permettent de réfuter que les modèles les plus grossiers, amenant l'auteur à conclure que le recours à des données d'observation distribuées à l'échelle fine (*i.e.*, vitesse ou hauteur locale) est nécessaire pour les modèles complexes [Bates et Anderson, 2001].

Finalement, le contrôle de tels schémas d'analyse ne peut se passer d'approches multi-données (*e.g.*, [Connell et al., 2001]), multi-critères [Lane et Richards, 2001] et même multi-modèles [Bates et Anderson, 2001].

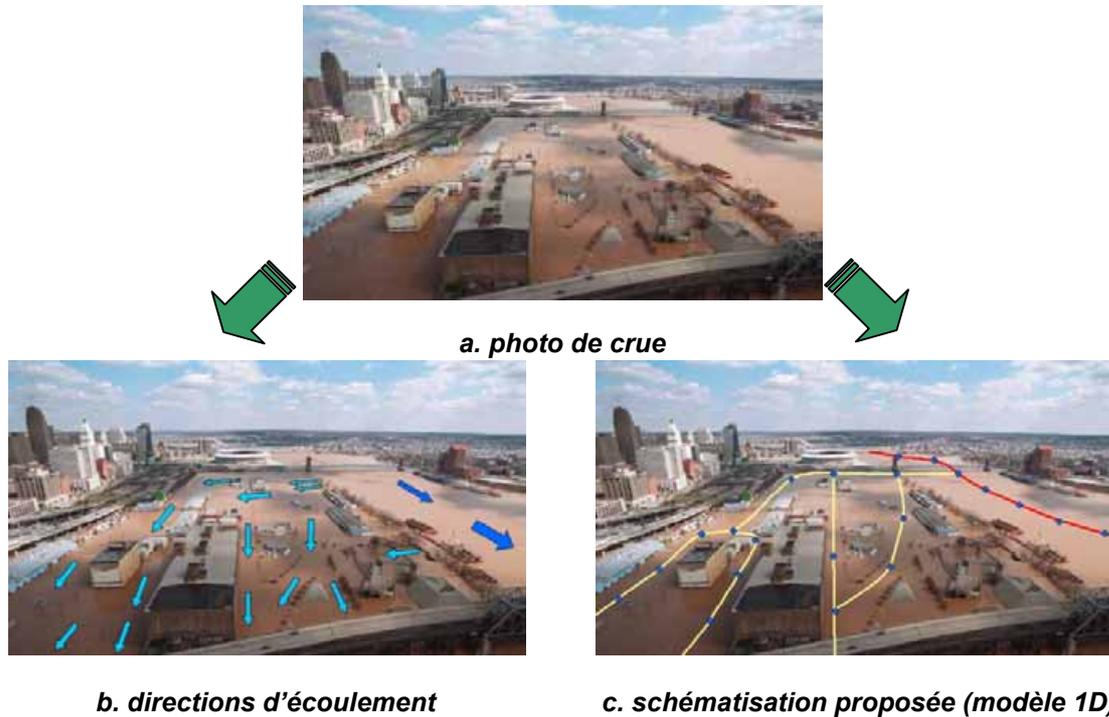
## 2.5. Conclusions

### 2.5.1. La télédétection : une pièce maîtresse pour l'analyse de l'aléa

**La télédétection apparaît clairement comme une pièce maîtresse des méthodes d'analyse de l'aléa** en intervenant à quasiment tous les stades de son développement.

- Dès la phase très amont qui consiste à se forger une représentation conceptuelle du fonctionnement de la plaine en crue, elle peut être utilisée pour guider le choix (*i.e.*, approche hydrogéomorphologique ou modélisation hydraulique) et la forme de l'approche à retenir (*e.g.*, modélisation hydraulique 1D, à casiers ou 2D). Dans cette phase, les données de télédétection

prises en dehors des crues ou pendant les crues (cf. Figure 2-8) sont toutes deux intéressantes, et les besoins d'interprétation restent à un niveau très qualitatif.



**Figure 2-8 : conceptualisation du fonctionnement d'une crue ([Gourbesville, 2000])**  
 (a. photo de crue, b. directions d'écoulement, c. schématisation proposée pour un modèle 1D)

- Pendant le développement de l'approche retenue, elle va faciliter l'accès aux caractéristiques physiques de la plaine grâce à des images prises en dehors de tout événement de crue.
- Enfin, après le développement du schéma d'analyse, elle peut être utilisée pour la phase de calage de l'analyse ou de validation grâce à des observations distribuées de l'aléa à un moment donné (*i.e.*, prises de vue pendant la crue).

### 2.5.2. Une assimilation complexe

Les informations accessibles à partir de télédétection sont difficilement assimilables dans les schémas d'analyse de l'aléa pour des problèmes d'adéquation, problèmes d'autant plus complexes que les schémas d'analyse ne sont pas construits sur une approche géographiquement distribuée. C'est pour cela que l'assimilation dans la modélisation hydraulique, conçue initialement en favorisant la dimension temporelle, pose beaucoup plus de difficultés que dans l'approche hydrogéomorphologique.

Pour des schémas d'analyse existant, la question est de savoir si les données extraites des images répondent aux exigences du schéma d'analyse : ce problème d'adéquation, souvent transcrit sous le vocable de qualité, est particulièrement ardu dès qu'il s'agit de données spatiales (*cf.*, 3.2.1). Les méthodes d'exploitation des données de télédétection doivent donc, en plus d'extraire l'information nécessaire à la thématique, la qualifier en terme d'adéquation avec l'information requise, ce qui soulève plusieurs besoins.

### Besoin en double compétence : thématique et télédétection

Si l'extraction de l'information géographique à partir des images de télédétection n'est pas guidée dès le départ par la thématique, alors elle a toutes les chances de produire des informations inadéquates. Les fonctions de "télédétecteur" et "thématicien" doivent donc être étroitement associées, voire confondues.

*Le couplage télédétection / gestion de l'eau suppose donc un travail pluridisciplinaire [Charleux, 2001].*

### Besoin en mesures de terrain

L'évaluation de la qualité des extractions réalisées à partir d'images de télédétection ne peuvent en aucun cas se passer de données de validation. Si une source de données de validation peut provenir d'images de télédétection plus fine (*e.g.*, validation à partir de photographies aériennes de la surface inondée extraite à partir de données satellitaires), le moyen le plus fréquent pour obtenir ces données reste la mesure de terrain dont la maîtrise est censée être meilleure. L'obtention de ces données est cependant très délicate, notamment en période de crue où la mobilité est très limitée.

Il existe cependant des protocoles de terrain d'une certaine efficacité qui tendent à se généraliser. C'est le cas des relevés des plus hautes eaux réalisés de façon quasiment systématique dans le département de l'Hérault par une équipe de la Direction Départementale de l'Équipement peu de temps après la crue (*cf.*, § 1.2.3.2 et Annexe 2). De nouveaux outils peuvent cependant augmenter la performance (en précision mais surtout en nombre) de ces relevés comme en témoigne l'utilisation d'un GPS différentiel pour cartographier rapidement un grand nombre de laisses de crue et obtenir ainsi l'étendue maximale de la zone inondée [Higgitt et Warburton, 1999]. Ces mesures de terrain réalisées post-crue représentent cependant le maximum de crue, ce qui n'est pas forcément en cohérence avec un cliché instantané car les plus hautes eaux ne sont pas forcément atteintes partout en même temps, décalage évident entre l'amont et l'aval (dynamique temporelle longitudinale de la crue illustrée par exemple dans [Brakenridge et al., 1998]), mais aussi décalage possible dans la dimension transversale lorsque la plaine est très structurée [Puech et Raclot, 2002]. De fortes précautions doivent donc être prises dans les protocoles de terrain si l'information mesurée est destinée à valider l'information extraite de données de télédétection.

### Besoin en terme de réalisme

Particulièrement vrai pour les modélisations hydrauliques, le schéma d'analyse doit être assez réaliste pour permettre la confrontation de ces résultats avec les informations issues de télédétection. Comment en effet confronter une surface inondée avec un modèle utilisant une topographie certes "équivalente" mais loin de la réalité ?

Dans cette voie, l'aide apportée par les Systèmes d'Information Géographique, aussi bien pour développer un modèle réaliste que pour exploiter et confronter ces résultats avec d'autres données comme les informations issues de télédétection, apparaît comme majeure (*e.g.*, spatialisation des résultats d'un modèle 1D).

### Besoin en méthodes pour qualifier et gérer des informations imparfaites

Dès que l'exploitation des données de télédétection passe à un stade quantitatif, l'assimilation ne peut se passer d'une évaluation de la qualité des données extraites. Ces données étant entachées d'imperfections (imprécision, incertitude,...), ne serait-ce que par l'étape de transcription de la variable mesurée (*e.g.*, radiométrie) en la variable d'intérêt, il convient de se tourner vers les

techniques capables de gérer ce caractère. Parmi les rares tentatives dans cette voie, on peut citer l'utilisation d'une approche bayésienne permettant de prendre en compte des informations externes à l'image (e.g., occupation du sol) pour essayer de qualifier spatialement la qualité des limites de la surface inondée extraite à partir de données SAR [Horritt et al., 2001]. Cependant, la question de l'assimilation reste entière : **comment valoriser des informations spatiales, présentes en grand nombre sur tout l'espace mais fortement entachées d'imperfections (imprécision, incertitude, ...), dans des schémas actuels d'analyse de l'aléa qui ne sont pas conçus pour cela ?**

### 2.5.3. La surface inondée : une information pertinente mais insuffisante

Si la télédétection hors crue est d'un apport fondamental pour accéder aux caractéristiques physiques de la plaine d'inondation, la télédétection en période d'inondation constitue un apport tout aussi inestimable en offrant une observation de l'événement encore plus difficilement accessible par d'autres moyens de mesures.

Malheureusement la surface inondée, qui constitue actuellement la seule grandeur quantitative exploitée à partir d'images de télédétection, a montré des limites dans le processus de "falsification" des schémas d'analyses les plus fins. Accéder à des informations plus locales (*i.e.*, vitesse et hauteur) s'avère une étape indispensable pour avancer dans la justification des techniques d'analyses de l'aléa à l'échelle de l'aménagement et de la réglementation. L'expérience menée par [Romanowicz et al., 1996], consistant à introduire la connaissance de hauteurs d'eau en plusieurs points internes à la plaine d'inondation, en illustre bien l'intérêt.

**Dépasser la "simple" caractérisation de la surface inondée pour approcher ces caractéristiques locales** apparaît alors comme un défi lancé au "télédéacteur-thématicien". Dans cette voie, la **photographie aérienne prise en période de crue représente la donnée à examiner prioritairement du fait de ces nombreuses informations internes au champ d'inondation** (*cf.*, § 2.3.2.3). La caractérisation directe de la hauteur ayant échoué, il ne reste guère que la **voie indirecte qui fait appel à des données exogènes à l'image**. Au vu des développements méthodologiques réalisés à partir des données satellitaires (*cf.*, § 2.3.1.2.2), la **fusion** de données semble effectivement particulièrement intéressante dès lors qu'elle s'inscrit dans un véritable processus **d'analyse spatiale** guidé par le fonctionnement hydraulique de la plaine. Comme ce dernier ne suit pas forcément la logique des approches classiques de l'analyse de l'aléa, il peut être utile et judicieux de repenser le mode d'exploitation des données de télédétection.

*L'objet du chapitre suivant (cf., § 3) est d'examiner quelques pistes pour améliorer l'exploitation de données spatiales dont les caractéristiques sont d'être nombreuses, multi-sources et de qualités très disparates.*

----- oOo -----

## 3. Modélisation et données spatiales

*Notre capacité à décrire précisément un système est une fonction inverse de sa complexité, c'est-à-dire du nombre d'éléments qui le composent, des relations entre eux, de la difficulté de définir leur caractéristiques. Le besoin d'étudier ou de gérer des systèmes complexes conduit nécessairement à la prise en compte de données vagues ("coût élevé"), imprécises ("mesurant environ 3 à 5 m"), soumises à des erreurs ("200 kg à 5 % près"), mal définies ("forte douleur"), dont la validité n'est pas absolue ("dans 90 % des cas"), soumises à une incertitude ("très probable"). [Bouchon-Meunier, 1999].*

Dans les problématiques environnementales, la nécessité de gérer la localisation de nombreuses données entachées d'imperfections est une source supplémentaire de difficulté.

Ce chapitre s'attache dans un premier temps (*cf.*, § 3.1) à expliciter le fort potentiel de l'outil **SIG** (*cf.*, présentation rapide en Annexe 5) pour faciliter la gestion des données spatiales dans la problématique du risque d'inondation. On s'attarde sur la caractérisation de l'aléa pour laquelle les données spatiales sont principalement utilisées pour alimenter les approches existantes.

Le paragraphe suivant (*cf.*, § 3.2) s'attache au problème de traitement de l'information géographique en tant qu'information imparfaite. Il décline d'abord (*cf.*, § 3.2.1) la nature des **imperfections** et les différents formalismes associés pour les représenter. Ensuite (*cf.*, § 3.2.2), des techniques liées au problème de la **fusion/révision** de ces informations disparates au sein d'un même système d'information sont exposées.

Par la suite, une réflexion sur la modélisation spatiale (*cf.*, § 3.3) fait surgir l'intérêt de s'orienter vers de nouveaux schémas d'analyse afin que ceux-ci représentent un niveau d'abstraction du monde réel à la fois plus à même de valoriser les données spatiales disponibles et plus proches des schémas conceptuels humains.

Enfin, le dernier paragraphe (*cf.*, § 3.4) s'attache à décrire les techniques des deux principales pistes d'inspiration, toutes deux attachées au domaine de l'intelligence artificielle, pour valoriser efficacement les nouveaux schémas d'analyse adaptés aux données spatiales.

### 3.1. Systèmes d'Information Géographique (SIG) et aléa inondation

Par ses fonctionnalités (*cf.*, Annexe 5), le SIG est devenu aujourd'hui un outil incontournable dans la gestion des problématiques environnementales. Sa synergie avec les données de télédétection et les bases de données environnementales en fait un outil privilégié dans la gestion du risque d'inondation que ce soit pour la caractérisation spatialisée de l'aléa, des enjeux [Raclot et al., 2001], ou du croisement entre ces deux composantes (*e.g.*, [Consuegra et al., 1994; Du Plessis et Viljoen, 1999; Islam Khan, 1999]). Seul l'intérêt du SIG pour l'aléa est mentionné ici.

#### 3.1.1. Aide pour la modélisation hydraulique

Pour la modélisation hydraulique, le SIG est le plus souvent utilisé en liaison avec des modèles existants afin de faciliter les pré-traitements et post-traitements des données [Kraus et

DodsonAssociates, 1999; Sanders, 1999]. Il permet en effet l'acquisition, le stockage et la mise à jour des données nécessaires en entrée de modèle, puis il permet de restituer et d'analyser ces résultats [Amighetti et al., 1994]. Les interfaçages sont nombreux et consistent en la création de passerelles, par exemple entre les SIG Intergraph et Idrisi et le modèle HEC-2 [Nunes Correia et al., 1998], entre le SIG Arcview et le modèle HEC-RAS (*i.e.*, extension Arcview nommée HECgeoRAS) [Hydrologic Engineering Center, 2000; Tate et al., 2002] ou le modèle MIKE 11 [Kjelds et Jorgensen, 1997].

### 3.1.1.1. *Pré-traitements géométriques*

L'intérêt du SIG pour construire le maillage servant de support de calcul à un modèle hydraulique tient à ses fonctionnalités de manipulation de données géoréférencées. Certains développements ont abouti à des produits autonomes spécialisés avec juste les fonctionnalités SIG intéressant l'hydraulique. C'est le cas de l'environnement PC-Raster qui comprend un modèle hydraulique hybride particulièrement adapté à l'utilisation de MNT fins dans un format raster [De Roo et al., 1999]. L'INRS-Eau propose un "Modeleur" destiné à faciliter l'intégration des données topographiques brutes pour l'élaboration du modèle topographique d'un modèle hydraulique 2D aux éléments fins. L'intérêt d'un tel système est de permettre un retour aux jeux de données d'origine intégralement préservés (notion de traçabilité ou d'intégrité) ce qui facilite leur mise à jour et l'adjonction de nouvelles données [Secretan et al., 2002].

### 3.1.1.2. *Post-traitements*

Le recours au SIG a permis l'élaboration de plusieurs méthodes pour tenter de spatialiser les résultats de modèles hydrauliques 1D. La première consiste à déterminer les points d'intersection entre le niveau d'eau (supposé constant dans une section) et la topographie pour chaque section en travers. La surface inondée peut ensuite être reconstituée par l'intermédiaire d'un TIN [Tate et al., 1999]. Les principales erreurs proviennent de l'interpolation entre les points d'intersection de chaque section, mais également des cas de sections non entièrement convexes (*e.g.*, gestion des zones situées derrière des bourrelets de berges, des digues). Une approche alternative s'appuie sur des algorithmes de propagation de proche en proche sur des éléments surfaciques de type polygone [De Jonge et al., 1996] ou triangle [Bachoc et al., 2002]; la difficulté étant alors de passer de la représentation en sections en travers à la représentation surfacique en prenant en compte les éléments structurants comme les digues. Une autre méthode calcule des hauteurs d'eau sur des points particuliers des sections en travers, procède ensuite à une estimation de la hauteur en tout point de la plaine grâce à une interpolation pondérée par la distance, puis élimine les zones non connectées aux lits mineur grâce à un algorithme basé sur la distance-coût [Werner, 2001]. Le logiciel Ophtyca (<http://www.strategis.fr/ophtyca/>), logiciel spécialisé dans le post-traitement hydraulique, s'appuie sur des triangulations de Delaunay contraintes pour faciliter la représentation spatialisée des résultats de modèles, qu'ils soient 1D, hybrides ou 2D [Bachoc et al., 2002].

## 3.1.2. *Autres utilisations dans la caractérisation de l'aléa*

### 3.1.2.1. *Appui à l'analyse hydrogéomorphologique*

Par ses fonctionnalités d'analyse spatiale intra- et inter-couches (*e.g.*, analyses multicritères distribuées aisées), l'intérêt du SIG pour une approche géographique est évident [Prunet, 1998]. En ce sens le développement de l'approche hydrogéomorphologique dans un environnement SIG ne peut que lui être profitable.

### 3.1.2.2. Appui à la valorisation directe des mesures limnimétriques

Le SIG permet également de valoriser très rapidement les mesures de cotes de l'eau observées à des stations limnimétriques. Afin d'obtenir une première idée de la surface inondée, [Colby et al., 2000] ont par exemple utilisé les fonctionnalités d'interpolation linéaire (selon le lit mineur puis transversalement) pour spatialiser la valeur de cote de l'eau mesurée à trois stations limnimétriques.

### 3.1.2.3. Appui au traitement d'images de télédétection en crue

Il est également à l'origine d'amélioration dans le traitement des images de télédétection prises en périodes de crue (cf., 2.3.1.3) en permettant par exemple de reconstituer la surface inondée maximale à partir d'une image SAR prise en période de récession [Brivio et al., 2002]. Pour cela l'auteur s'appuie sur un algorithme de distance-coût (le coût étant calculé à partir du relief et d'un indicateur de rugosité) pour combler des zones non détectées comme inondées sur l'image (cf., Figure 3-1).

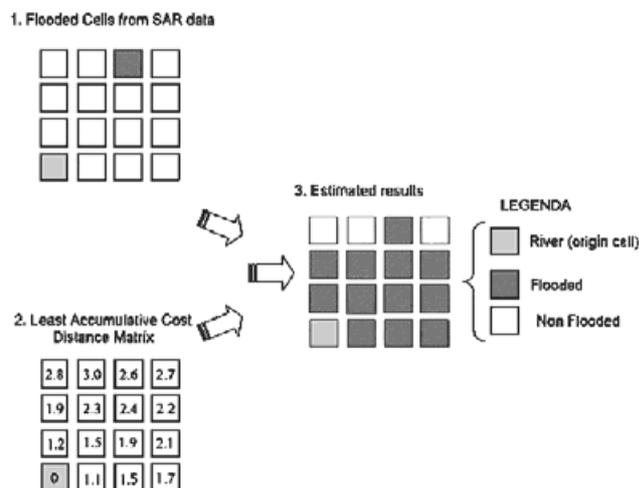


Figure 3-1 : algorithme s'appuyant sur des fonctionnalités SIG pour retrouver la surface inondée maximale à partir d'une image SAR prise en récession de crue [Brivio et al., 2002]

### 3.1.3. Aide pour la communication

En permettant la restitution très réaliste des données et scénarios (vue 3D, animations, superposition avec des fonds de plans,...), il contribue à une démarche participative entre les différents acteurs préoccupés par la gestion du risque d'inondation. Lors de l'utilisation d'un modèle hydraulique dans un environnement SIG par exemple, il est assez facile de montrer le maillage utilisé et les phénomènes que le modèle est capable de restituer, ce qui permet d'ouvrir la voie à une discussion sur les hypothèses et limites du modèle retenu [Bates et De Roo, 2000] et constitue finalement un moyen assez efficace pour l'évaluation du modèle [Lane et Richards, 2001].

Il permet également une restitution très réaliste et optimisée selon la circonstance par les "cartes d'un jour" [Pacaud, 1996], rendant l'information accessible à la majorité des personnes, décideurs mais également grand public [Nunes Correia et al., 1999; Gourbesville, 2000]. Diffusés efficacement (e.g., atlas des zones inondables consultables sur Internet<sup>13</sup>), de tels documents participent activement à l'instauration d'une culture du risque. Si une carte a des capacités limitées pour représenter l'incertitude [Zerger, 2002], la présentation de plusieurs cartes superposables, voire d'une animation,

<sup>13</sup> <http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-Roussillon/risques/zi/herault/communes34.htm>

peut apporter une réponse au moins partielle (*e.g.*, cartes des scénarios favorables, "normaux", défavorables).

L'archivage centralisé des SIG permet de constituer des bases de données de crue historiques qui viennent alimenter la mémoire du risque. L'accès rapide à ces données peut également servir pour la gestion de crise en facilitant l'organisation des secours et la mise au point des plans d'intervention [Sauvagnargnes-lesage, 2001].

Enfin, il permet de valoriser efficacement d'autres systèmes d'information concernant des objets présents dans la plaine, et plus particulièrement les systèmes concernant le suivi de l'état d'ouvrages à vocation hydraulique (*e.g.*, systèmes d'information sur les digues [Maurel et al., 2001]).

### 3.1.4. Conclusion

Le développement des SIG constitue une avancée majeure pour l'exploitation et donc la valorisation des données spatiales à chaque étape de caractérisation du risque d'inondation. Si bien qu'aujourd'hui, le SIG, par son potentiel à **mettre en relation de grande quantité d'informations spatialisées**, représente **un outil quasiment indispensable** dans la gestion du risque d'inondation.

Pour la caractérisation de l'aléa, il est principalement utilisé pour faciliter l'assimilation des données spatiales dans la modélisation hydrauliques en favorisant les phases d'implémentation et de restitution des paramètres et variables d'entrée-sortie (*cf.*, § 3.1.1).

Il facilite la mise en œuvre de l'approche hydrogéomorphologique (*cf.*, § 3.1.2.1), et permet d'ouvrir de nouvelles voies de caractérisation de l'aléa comme la reconstitution de surface inondée à partir d'observations terrain (*cf.*, § 3.1.2.2) ou de télédétection (*cf.*, § 3.1.2.3)

Enfin ses capacités en terme de restitution de l'information, notamment sous la forme de "cartes d'un jour" en font un bon outil de communication (*cf.*, 3.1.3).

Le SIG ne permet cependant pas de lever les contraintes inhérentes à l'exploitation conjointe d'informations spatialisées multi-sources et donc de qualité très disparate [Openshaw, 1991]. Pour essayer de desserrer ce frein, des techniques de traitement de l'information dont une partie est empruntée au domaine de l'intelligence artificielle peuvent représenter une solution très intéressante.

## 3.2. Quelques problèmes posés par le traitement de l'information<sup>14</sup> géographique

La valorisation simultanée de plusieurs sources de données (*e.g.*, image de télédétection et mesures de terrain), opération appelée **fusion** de données, est de la plus haute importance car elle permet d'accéder à une plus-value de connaissance.

*Le tout est plus grand que la somme des parties ([Confucius] in [Konieczny, 2000]).*

Le SIG s'impose alors comme le cadre idéal pour mettre en relation des informations géographiques dont les caractéristiques sont d'être localisées, multi-sources et multimédia [Laurini et Milleret-

<sup>14</sup> Le Larousse définit le terme *information* comme un "élément de connaissance susceptible d'être codé pour être conservé, traité, ou communiqué". Dans ce paragraphe, l'information est issue de l'observation ou de la connaissance d'un phénomène physique. Le terme information peut donc être interprété comme une donnée, une connaissance, une observation.

Raffort, 1993]. Réunir au sein d'un même système d'information de telles données disparates pose inévitablement des problèmes de compatibilité comme en témoigne la citation suivante :

*La modélisation numérique apparaît comme une tâche très délicate et laborieuse dans le contexte d'études hydrauliques et plus particulièrement celles reliées aux risques d'inondations. La principale difficulté est liée à la grande diversité des ensembles de données de base disponibles lesquels présentent souvent de forts caractères d'hétérogénéité tant par le format, la précision intrinsèque, la structure spatiale de distribution que par la représentativité par rapport aux conditions évolutives du milieu (érosion, sédimentation) [Secretan et al., 2002].*

L'intégration de données hétérogènes en vue de leur utilisation et valorisation ultérieure passe par la caractérisation et le codage dans un même référentiel des imperfections susceptibles de les affecter. Cette phase de modélisation de l'information est abordée à travers la notion de **qualité** (intrinsèque) de l'information géographique (cf. § 3.2.1).

Traiter les incohérences éventuelles entre informations (encore appelés conflits, incompatibilités ou incohérences) constitue un problème majeur pour bien des applications automatisées. Beaucoup de travaux en "Intelligence Artificielle" traitent de ce sujet appelé **révision** de croyance. L'objectif du paragraphe 3.2.2 n'est pas de détailler ces nombreux travaux, mais de faire ressortir les grandes idées de quelques approches apparues comme centrales.

### 3.2.1. Qualité et imperfections d'une information géographique

#### 3.2.1.1. Qu'est-ce que la qualité ?

La **qualité** peut être définie comme "l'ensemble des propriétés et des caractéristiques d'un produit ou service qui lui confère l'aptitude à satisfaire des besoins exprimés ou implicites" (norme ISO 8402, 1994). Transcription d'une adéquation entre une information (ou d'une donnée ou d'une connaissance) et des spécifications, la qualité n'a donc de sens qu'en référence à des besoins thématiques que l'on cherche à satisfaire :

*Quality depends on use [Harvey, 1996].*

Pour se dissocier de la demande thématique, certains auteurs évoquent la notion de **qualité interne** qui ne se réfère plus à des spécifications thématiques mais à des spécifications propres au produit [David et Fasquel, 1997]. Lorsque ces spécifications "internes" se réfèrent à la réalité que la donnée (ou connaissance, ou information) est censée représenter, le terme de **qualité intrinsèque** est employé.

Définir la qualité (intrinsèque) d'une information se ramène à trouver un mode de représentation de l'information qui prenne en compte les imperfections qui la caractérisent. En science, ce domaine est appelé "représentation de la connaissance".

#### 3.2.1.2. Nature des imperfections d'une information

La langue française utilise une terminologie très riche pour décrire les imperfections d'une information, comme en témoigne l'énumération détaillée présentée par [Dubois et Prade, 2001] pour qui une information peut être :

- bruitée, si elle est soumise à une erreur aléatoire;
- biaisée, si elle est sujette à une erreur systématique ;

- imprécise, si son contenu ne correspond pas au standard de précision attendue ; elle peut être aussi graduelle (floue) si l'ensemble des valeurs auxquelles elle renvoie n'a pas de contour tranché ;
- incertaine, si on n'a qu'une confiance partielle dans la vérité de l'information ;
- incomplète, s'il en manque une partie nécessaire pour caractériser correctement une situation ;
- ambiguë, si on ne sait pas de manière sûre à quoi elle se rapporte ;
- incohérente (ou conflictuelle), si elle contredit une ou plusieurs autres informations ;
- redondante, si elle est disponible sous plusieurs formes.

A cette énumération il ajoute les problèmes d'évolution temporelle de l'information (e.g., mise à jour).

Si l'on compare avec d'autres terminologies, notamment anglophones, il est très délicat d'établir des correspondances. Pour des mesures topographiques par exemple, [Cooper, 1998] différencie seulement trois termes selon l'origine de l'erreur : "*precision*" se réfère aux erreurs aléatoires (i.e., **bruit** de la mesure) ; "*accuracy*" aux erreurs systématiques (i.e., **biais** de la mesure) et "*reliability*" aux erreurs grossières (i.e., **défaillances**<sup>15</sup>), totalement imprévisibles, d'origine essentiellement humaine. Goodchild quant à lui utilise le terme "*accuracy*" dans un sens beaucoup plus large :

*Accuracy refers to the relationship between a measurement and the reality it purports to represent [Goodchild, 1993].*

Les définitions apparaissent donc peu homogènes d'un pays à l'autre, d'un domaine scientifique à l'autre et même d'un auteur à l'autre ; ce qui rend très ardue la compréhension de la littérature à ce sujet [Bertoni, 2001].

**Dans ce mémoire, la terminologie suivante sera utilisée :**

- la **précision** (ou **imprécision**) traduit le niveau de détail de l'information relative à sa formulation, exprimé par exemple par le nombre de chiffres significatifs de la mesure d'un instrument ;
- l'**exactitude** est un indicateur de l'écart d'une grandeur à la réalité ;
- l'**incertitude** exprime le degré de confiance global que l'on donne à une information (i.e., croyance en sa véracité) ;
- la **fiabilité** est utilisé pour caractériser l'incertitude liée à la présence d'erreur grossière (e.g., défaillance de mesures) ;

### 3.2.1.3. Outils de représentation et de manipulation des imperfections

Malgré la grande diversité des sources d'imperfections, l'homme se représente l'ensemble des imperfections d'une information individuelle uniquement à partir de deux notions : l'**incertitude** et l'**imprécision**. Le monde réel est cependant perçu de manière imprécise et incertaine à la fois, ces deux notions étant intimement mêlées [Bouchon-Meunier, 1999] comme l'illustre le dialogue suivant :

*"Quel âge a-t-il ? Une trentaine d'années. Vous en êtes certain ? Absolument. C'est bien imprécis ! En fait je crois qu'il a 31 ans, mais je n'en suis pas sûr" (tiré de [Bouchon-Meunier, 1999]).*

Si bien que plusieurs auteurs interprètent une proposition imprécise comme une disjonction de propositions précises mais incertaines. Par exemple, la proposition "Avoir une trentaine" peut être vue

<sup>15</sup> Le terme anglais utilisé est "blunders", en français le terme de "faute" est également utilisé.

comme la disjonction de "Avoir 28 ans", "Avoir 29 ans", ..., "Avoir 32 ans", chacune étant pondérée par un degré d'incertitude qualifiant la plus ou moins grande comparabilité avec le terme "trentaine" [Cazemier, 1999]. C'est pourquoi on ne parle jamais de raisonnement dans l'imprécision mais uniquement de raisonnement dans l'incertain. Les degrés d'incertitude peuvent être interprétés comme une mesure de confiance. Parmi les différents formalismes et théories qui ont vu le jour, le débat porte essentiellement sur la signification et le codage de ces mesures de confiance, et notamment sur la possibilité de rendre compte ou non d'une situation d'ignorance totale ou partielle. Sont également associées à chaque théorie des règles de manipulation et de combinaisons qui lui sont propres.

Pour ne pas alourdir la lecture du document, une présentation succincte des principaux développements théoriques utilisés en fusion et révision a été placée en Annexe 6. Limitée aux grandes différences philosophiques, ces développements sont ceux cités par [Wilson, 2002]. Après un petit rappel sur l'approche probabiliste classique, cette présentation concerne :

- deux extensions de l'approche probabiliste : l'approche bayésienne et l'approche par probabilités imprécises ;
- la théorie des possibilités ;
- la théorie de Dempster-Shafer.

#### 3.2.1.4. *Particularités de l'information géographique*

Par rapport à une information classique (thématique), la spécificité de l'information géographique provient de sa dimension spatiale supplémentaire. De ce fait beaucoup d'auteurs différencient les imperfections selon qu'elles sont relatives à la sémantique (*i.e.*, attributs décrivant les objets géographiques) et à la géométrie (*i.e.*, position, forme, ... des objets). A ces deux dimensions, il faut ajouter la dimension temporelle relative à de l'information (*e.g.*, évolution des objets, problème de mise à jour).

Les travaux portant sur la qualité des données spatiales à travers ces différentes dimensions, sont nombreux, notamment dans le cadre des SIG [Goodchild, 1993; Veregin et Lanter, 1995; David et Fasquel, 1997; Burrough et McDonnell, 1998; Goodchild et al., 1998]. Ainsi de très nombreux développements pour mesurer des erreurs de localisation ont vu le jour ces dernières années. Si la localisation d'une donnée ponctuelle est classiquement réalisée à travers une erreur moyenne quadratique entre la position de la donnée et une référence, la définition et la mesure d'erreur sur la localisation de données de dimension supérieure (ligne ou polygone) sont nettement plus complexes. La comparaison de deux éléments linéaires peut par exemple s'appuyer sur leur longueur, mais aussi sur leur forme ou bien une mesure de distance (*e.g.*, distance maximale de "Hausdorff" [David et Fasquel, 1997]). Représenter l'imprécision sur la position d'une ligne devient alors très délicat, surtout lorsque celle-ci est censée définir une limite graduelle entre deux objets. Plusieurs solutions recourant aux outils de représentations des imperfections ont été élaborées : définition d'une "zone-tampon" autour de la limite [Lagacherie et al., 1996], ou recours à la théorie des sous-ensembles flous et des possibilités [Cazemier, 1999].

Selon les sources d'informations géographiques, les qualités selon la dimension spatiale et selon la dimension attributaire peuvent ne pas être indépendantes. La liaison peut même être très complexe, l'exemple de points cotés obtenus par des campagnes photogrammétriques en est une illustration sur une grandeur attributaire quantitative. La qualité altimétrique de tels points cotés dépend en effet de chaque pointé mais également de l'orientation de chaque cliché photographique. Ceci induit une

corrélation spatiale très complexe qui conditionne les imperfections mais à laquelle on n'a majoritairement pas accès. De manière plus générale pour la représentation de la topographie, [Fisher, 1998] souligne la nécessité de considérer un modèle prenant en compte la dispersion des erreurs et leur auto-corrélation spatiale. Cependant l'utilisateur est bien souvent dans l'incapacité de proposer ce genre de modèle (au moins de façon *a priori*), ce qui le conduit bien souvent, faute de mieux, à ignorer les erreurs ou à utiliser un modèle homogène pour celles-ci. Un autre exemple portant sur une grandeur attributive qualitative concerne l'occupation du sol obtenue à partir d'images de télédétection. La matrice de confusion [Congalton, 1991], qui est l'outil le plus couramment employé pour évaluer une classification, ne prend, elle non plus, pas du tout en compte les problèmes de corrélation spatiale pourtant souvent présents (*e.g.*, [Pugh et Congalton, 2001]).

L'implémentation dans un SIG impose de choisir une structure de données (*e.g.*, vectorielle) qui peut également être à la source d'erreurs [Puricelli et al., 1998]. La représentation des phénomènes naturels continus (*e.g.*, topographie) dans une telle structure est également source d'approximation liée entre autre à l'échantillonnage de prise d'information (*e.g.*, densité et la répartition des points cotés ou taille du pixel du MNT) et aux méthodes d'interpolation.

Au final, les facteurs pouvant affecter la qualité des données géographiques dans un SIG sont multiples, comme en témoignent l'énumération tirée de [Burrough et McDonnell, 1998] et consignée dans le Tableau 3-1.

1. Currency
  - Are data up to date?
  - Time series
2. Completeness
  - Areal coverage— is it partial or complete?
3. Consistency
  - Map scale
  - Standard descriptions
  - Relevance
4. Accessibility
  - Format
  - Copyright
  - Cost
5. Accuracy and Precision.
  - Density of observations
  - Positional accuracy
  - Attribute accuracy— qualitative and quantitative
  - Topological accuracy
  - Lineage— When collected, by whom, how?
6. Sources of errors in data
  - Data entry or output faults
  - Choice of the original data model
  - Natural variation and uncertainty in boundary location and topology
  - Observer bias
  - Processing
    - Numerical errors in the computer
    - Limitations of computer representations of numbers
7. Sources of errors in derived data and in the results of modelling and analysis
  - Problems associated with map overlay
  - Classification and generalization problems
  - Choice of analysis model
  - Misuse of logic
  - Error propagation
  - Method used for interpolation

**Tableau 3-1 : facteurs affectant la qualité des données géographiques [Burrough et McDonnell, 1998]**

### 3.2.1.5. *Problèmes de propagation des imperfections*

Une difficulté majeure de caractérisation de l'information provient des mécanismes de **propagation** des imperfections au cours d'une chaîne de traitement, la donnée que l'on cherche à qualifier (et qui constitue une donnée de base pour une application) pouvant être le résultat d'un traitement complexe. Le problème est de déterminer la qualité d'une donnée élaborée à partir de données de bases connues imparfaitement... La chaîne de traitement peut être vue comme un modèle (*e.g.*, modèle de représentation du fonctionnement) souvent complexe et non linéaire dans les problématiques environnementales. Les équations physiques de l'hydraulique en sont la preuve (*cf.*, § 1.2.5.2). L'analyse de ces propagations constitue un thème actif de recherche dans le domaine des données géographiques et des SIG (*e.g.*, [Veregin, 1995; Burrough et McDonnell, 1998; Crosetto et al., 2001]). Il rejoint en grande partie les deux problématiques très proches de l'analyse des incertitudes (UA) et de l'analyse de sensibilité (SA) *a priori* pour les modèles de fonctionnement (*cf.*, [Bertoni, 2001] pour plus de détails). Les avancées dans ce domaine concernent essentiellement les modèles stochastiques, ce qui explique qu'elles privilégient la représentation des incertitudes sous la forme probabiliste par une fonction de densité de probabilité. Des approches analytiques ont été élaborées (*e.g.*, analyse du premier ordre) mais elles deviennent vite très complexes lorsque le nombre de données de base utilisées dans le modèle (*i.e.*, variables et paramètres) devient important et lorsque l'indépendance des paramètres n'est pas justifiée. Un autre inconvénient majeur de cette approche provient de sa sensibilité aux non linéarités du modèle [Kauark Leite, 1990]. L'approche expérimentale par exploration de l'ensemble du domaine possible des variables permet de s'affranchir en grande partie de ces problèmes (*e.g.*, approche basée sur une exploration systématique des valeurs des données de base ou plus fréquemment sur une approche par tirage aléatoire de type Monté-Carlo). L'exploration de l'ensemble des combinaisons permet également de minimiser les problèmes de corrélations spatiales ou encore de s'appuyer sur des distributions floues (*e.g.*, [Aronica et al., 1998]). En contrepartie, elle nécessite des temps de calculs importants, même avec l'option de tirage aléatoire. **Si bien qu'aujourd'hui, l'étude de propagation des incertitudes constitue un problème majeur qui restreint l'intégration des données spatiales dans les modèles hydrodynamiques distribués (*i.e.*, modèles mécanistes et déterministes basés sur des équations différentielles non linéaires).**

### 3.2.1.6. *Conclusion*

Chercher à estimer précisément la qualité intrinsèque d'une base de données géographiques constitue une volonté louable mais quelque peu illusoire étant donné la multiplicité et la diversité des facteurs pouvant l'affecter. Le seul inventaire exhaustif de ces sources d'imperfections représente un objectif ambitieux. Comme, de plus, la hiérarchisation des facteurs potentiels identifiés n'est pas évidente, il n'est pas toujours possible d'identifier clairement une série de facteurs négligeables devant les autres. Enfin, la représentation dans un formalisme unique des imperfections issues de plusieurs facteurs implique forcément des approximations, aucun formalisme n'étant adapté à tous les types d'imperfections. L'intégration des données spatiales, avec leurs nombreuses imperfections, dans des approches déterministes et mécanistes est alors rendu très complexe, voire impossible pour des schémas finement distribués.

Si la construction de système d'information, notamment géographique, aide à gérer des données nombreuses, le problème de la réunion de sources d'informations hétérogènes et donc de qualité très disparates reste entier. Cette problématique concerne la **fusion** de données et la **révision** de croyance (*cf.*, § 3.2.2).

Devant la complexité et la lourdeur du problème, la phase de caractérisation de la qualité de données géographiques de façon indépendante d'une application donnée (e.g., qualité intrinsèque) ne peut être que très partielle et n'a donc peu de sens. Face à un problème déterminé, une approche globale et approximative de gestion des imperfections par l'utilisateur constitue souvent une solution pragmatique alternative à leur omission pure et simple.

*Uncertainties and errors are intrinsic to spatial data and need to be addressed properly [Burrough et McDonnell, 1998].*

Ceci explique certainement l'importance prise par les théories plus souples que les probabilités classiques (cf., Annexe 6), l'estimation de la qualité étant souvent effectuée de manière globale et imprécise.

### 3.2.2. Problématique de la fusion et de la révision

#### 3.2.2.1. *Le problème de la fusion*

Le problème de la **fusion** de bases de connaissance se pose lorsque l'on dispose de plusieurs sources d'informations et que l'on désire exploiter conjointement ces informations. L'ordre dans lequel les connaissances sont considérées n'a aucune répercussion en terme de hiérarchisation de croyances. Les motivations d'une telle fusion résultent de l'idée simple suivante : un résultat basé sur un grand nombre d'informations, si possible d'origines et de natures variées, est généralement plus fiable et plus précis qu'un résultat s'appuyant sur un faible nombre d'informations. Il est donc légitime de chercher à exploiter toutes les connaissances disponibles, quels que soient leur origine (e.g., expérimentales, expertes) et leur degré d'imperfections. Dans le cadre du diagnostic, [François, 2000] donne les raisons suivantes :

- la redondance d'une information parmi plusieurs sources améliore la certitude du diagnostic (les avis convergent et se renforcent) ;
- la complémentarité permet de limiter les faiblesses possibles de certaines sources dans certains cas avec les points forts d'autres sources ;
- la prise en compte des contradictions permet souvent de donner des informations sur la diagnostic lui-même, en terme d'erreur potentielle ou de confiance.

#### 3.2.2.2. *Le problème de la révision*

On entend par **révision** d'une base de connaissances, lorsqu'une nouvelle information y est introduite, la modification de la base de connaissances afin de la rendre de nouveau cohérente, en conservant l'information introduite et en supprimant le moins d'information possible [Gärdenfors, 1988].

Si le raisonnement humain sait adapter sa connaissance par des mécanismes cognitifs complexes (et souvent inexpliqués), le codage automatique de ce type de raisonnement pose de sérieux problèmes. Les difficultés majeures proviennent du codage de ces connaissances, des règles de combinaisons et des modes de raisonnement face à des connaissances contradictoires. Si la logique classique est bien adaptée au raisonnement valide, elle ne permet pas de raisonner à partir de connaissances partielles et incomplètes, et donc évolutives. Pour cela, des développements méthodologiques ont vu le jour sous le nom de logiques non monotones dont le raisonnement révisable est un cas particulier. Pour pallier à l'insuffisance d'informations, on est amené à formuler des hypothèses qui, pour certaines, peuvent être remises en question lors d'un ajout ultérieur d'informations. Les conclusions dont on disposait avant l'ajout peuvent donc être invalidées : il est alors possible de déduire une propriété à partir d'une base

de connaissances, et de déduire son contraire lorsqu'une information vient compléter la base de connaissances.

*Belief revision and nonmonotonic logic are two sides of the same coin [Gärdenfors, 1990].*

Ce problème de révision de la connaissance, ainsi que celui de fusion qui lui est très proche, constitue un axe de recherche important en intelligence artificielle (IA). Ce dernier a été abordé de différentes manières, sous un aspect quantitatif ou qualitatif, probabiliste ou logique, ce qui a donné naissance à de nombreux cadres de travail très différents [Koblinsky et al., 1993; Lin, 1996; Revesz, 1997; Lin et Mendelzon, 1998; Konieczny, 2000; Benferhat et al., 2002] dont beaucoup sont des extensions des règles de combinaisons/conditionnement dans les formalismes de représentation de l'incertain développés en Annexe 6 (e.g., probabilités qualitatives, fonctions de croyance, théorie des possibilités). Le conditionnement correspond en effet à une révision avec un fait parfaitement certain.

Seuls les concepts généraux de la révision des croyances dans le cadre logique sont abordés à travers le cadre AGM dont la philosophie me semble suffisamment démonstrative de ce qui est fait dans le cadre de la théorie de la cohérence. Une telle présentation simplifiée présente forcément des approximations.

### 3.2.2.3. *Le cadre AGM (d'après C. Alchourrón, P. Gärdenfors et D. Makinson)*

Le cadre AGM [Alchourrón et al., 1985] propose une caractérisation logique des opérateurs de révision qui s'est imposée dans la communauté scientifique. Il consiste en un ensemble de propriétés qu'un opérateur de révision doit satisfaire et présente l'avantage de s'appuyer sur des méthodes de révision assez intuitives. Seules les idées générales nous intéressent et sont exposées brièvement. Pour faciliter la compréhension, le discours se limite aux croyances booléennes (i.e., vrai ou faux) en excluant donc la notion de degré de croyance.

#### 3.2.2.3.1 Les différents types de changements de croyances

Le problème général de la révision est de définir le comportement d'un agent lors de l'arrivée d'une nouvelle information. Cela revient à étudier l'évolution de l'ensemble des croyances de cet agent (appelé état épistémique  $\mathbf{K}$ ) à l'arrivée d'une nouvelle information.

Les auteurs décrivent trois sortes d'évolution de croyance :

- **l'expansion** : elle correspond à l'ajout d'une nouvelle information  $\alpha$  dans  $\mathbf{K}$  sans retirer aucune connaissance de  $\mathbf{K}$  et intervient quand  $\alpha$  n'est pas incohérente avec  $\mathbf{K}$ , son résultat est noté  $\mathbf{K} + \alpha$  ;
- **la contraction** : elle consiste à retirer une (ou plusieurs) information(s) de  $\mathbf{K}$  afin que les nouvelles croyances ne soient pas en contradiction une information  $\alpha$  donnée, son résultat est noté  $\mathbf{K} - \neg\alpha$  ;
- **la révision** : lors de l'ajout d'une nouvelle information  $\alpha$ , si  $\alpha$  est cohérente avec  $\mathbf{K}$  l'expansion est utilisée, sinon il convient de sélectionner des informations à retirer de  $\mathbf{K}$  pour pouvoir accepter  $\alpha$ , son résultat est noté  $\mathbf{K} \star \alpha$  ;

#### 3.2.2.3.2 Les idées de base de la révision

Une série de postulats est associée à chacune des évolutions de croyance énoncées ci-dessus. On y voit que la révision est donc définie comme la succession d'une contraction (pour éliminer tout ce qui est en contradiction avec la nouvelle information) et d'une expansion pour accepter la nouvelle information. Cette définition est connue sous le nom d'*identité de LEVI* :

$$\mathbf{K} \star \alpha = (\mathbf{K} - \neg\alpha) + \alpha.$$

Eq. 3-1

La motivation sous-jacente à la construction d'un tel opérateur de révision repose sur le souhait :

- **d'accepter la nouvelle information** qui est celle que l'on préfère (principe de primauté) ;
- de déboucher sur un nouvel état épistémique **cohérent** après acceptation de la nouvelle information ;
- de **minimiser le changement**, c'est-à-dire de conserver le plus possible de nos anciennes croyances ;

La phase de sélection de l'étape de contraction constitue la véritable difficulté puisque c'est elle qui doit résoudre les contradictions. Ceci étant fait, l'étape d'expansion est purement mécanique.

### 3.2.2.3.3 Les opérateurs de contraction

Les opérateurs de contraction proposés dans le cadre AGM font appel à la notion de sous-ensemble maximal n'impliquant pas une formule  $\phi$ , dont la définition est la suivante :

**Définition :**  $\mathbf{K}'$  est un sous-ensemble maximal (au sens de l'inclusion) de  $\mathbf{K}$  n'impliquant pas  $\phi$ , si et seulement si :

1.  $\mathbf{K}' \subseteq \mathbf{K}$  ;
2.  $\phi \notin \text{Cn}(\mathbf{K}')$  ;
3.  $\forall \mathbf{K}'' \text{ tel que } \mathbf{K}' \subset \mathbf{K}'' \subseteq \mathbf{K}, \phi \in \text{Cn}(\mathbf{K}'')$

où  $\text{Cn}(\mathbf{K})$  est l'ensemble des croyances de  $\mathbf{K}$  (croyances de base ainsi que tout ce qui peut en être déduit)

Un tel sous-ensemble, noté  $\mathbf{K} \perp \phi$ , n'est pas unique et il est possible de construire plusieurs opérateurs de contraction.

Une première façon de définir la contraction consiste à considérer l'intersection de toutes ces sous-ensembles maximaux n'impliquant pas  $\phi$  : c'est la **fonction de contraction par intersection totale (full meet contraction)** [Gärdenfors, 1988]. Cette révision est considérée comme trop drastique car l'ajout d'une formule inconsistante conduit à effacer toute l'ancienne connaissance [Konieczny, 2000].

La solution proposée par les auteurs est une **fonction de contraction par intersection partielle (partial meet contraction)** qui agit sur une sélection de ces sous-ensembles maximaux n'impliquant pas  $\phi$ . La fonction de contraction maxichoix (*maxichoice contraction*) correspond au cas particulier où un seul sous-ensemble est conservé. La principale difficulté est de justifier la fonction de sélection.

### 3.2.2.3.4 L'enracinement épistémique (epistemic entrenchment)

La justification de la fonction de sélection ne peut provenir que d'une connaissance extra-logique. Les opérateurs de contraction (et donc de révision) construits dans le cadre AGM correspondent à des méthodes basées sur la définition d'une hiérarchie de "**degrés de préférence**" s'appliquant aux croyances : une formule (ou une connaissance) est plus crédible aux yeux de l'agent qu'une autre. Un principe évident de rationalité nous demande de retirer les connaissances les moins importantes.

Le concept d'enracinement épistémique proposé dans [Gärdenfors et Makinson, 1988] permet de définir cette relation d'ordre<sup>16</sup>. La base de connaissances est alors vue comme un ensemble de couches, plus une formule appartient à une couche profonde (e.g., plus elle est enracinée) plus elle est

<sup>16</sup> Les définitions relatives aux relations d'ordre sont regroupées en Annexe 7

importante. Lorsque l'on a un changement à effectuer sur la base, ce sont les formules appartenant aux couches les plus superficielles que l'on enlève en premier.

Cette notion d'enracinement épistémique s'inscrit très bien dans le cadre des formalismes étudiés en Annexe 6, et notamment avec l'approche possibiliste :

*It has been pointed out that this epistemic entrenchment is nothing but a qualitative necessity measure [Dubois et Prade, 1997b].*

### 3.2.2.3.5 Conclusion sur le cadre AGM

Le cadre AGM est une formalisation de la révision qui repose sur des postulats ayant des fondements bien justifiés, bien que chacun d'entre eux puisse être critiqué individuellement [Sombe, 1994]. Seules les grandes idées intuitives des propriétés requises par un opérateur de révision ont été énumérées et sont à retenir pour faciliter la compréhension de la suite du document. Bien que la complexité des calculs nécessaires à la construction des sous-ensembles maximaux soit prohibitive, ce cadre constitue aujourd'hui une référence à partir de laquelle plusieurs extensions/adaptations ont été développées. [Konieczny, 2000] a également montré que ce cadre de travail avait une portée très large, en présentant des rapports étroits avec les domaines des logiques non monotones ou de la logique des possibilités (e.g., [Dubois et Prade, 1997a; Dubois et Prade, 1997b]).

### 3.2.2.4. Conclusion

Lorsque l'on cherche à préserver la logique classique, le principe général des approches de **fusion** est de construire des mécanismes de traitement de contradictions qui permettent de restaurer la consistance dans les bases de connaissances : on parle de **méthode de résolution des conflits**. Les approches sémantiques (i.e., qui considèrent la connaissance implicite : informations de base et informations déduites) dans lesquelles s'inscrit le cadre AGM, cherchent à conserver un maximum d'information de la base de croyance. Les approches syntaxiques (qui reposent sur les seules connaissances explicites, i.e., informations de base), s'appuient sur le concept de **sous-ensembles maximaux cohérents**. Même si leurs propriétés sont différentes, ces deux approches reposent sur l'idée de **changement minimal** de la base de connaissances, i.e., d'économie de l'information. La principale difficulté est la détermination et l'élimination des conflits :

*La détection et l'élimination des contradictions est un problème difficile et coûteux puisque l'incohérence est souvent implicite et il n'existe pas de solution unique pour la traiter [Koriche, 1998].*

## 3.3. Réflexion sur la modélisation spatiale

### 3.3.1. L'analyse spatiale pour exploiter des données spatiales d'observation

#### 3.3.1.1. Retour sur la notion de modèle

La brève introduction sur les modèles (cf., § 1.2.5.1) a mis en avant le fait qu'un modèle n'est qu'une représentation schématique, et donc simplifiée, du "réel". Pour [Hill, 2000], cette simplification, qui définit le **niveau d'abstraction** du modèle, repose sur deux contraintes principales :

- les objectifs à atteindre (type de résultats et questions/problèmes que l'on veut résoudre)
- l'état des connaissances concernant le système et les données à disposition (ou du moins qu'il est raisonnable d'espérer acquérir dans le temps imparti).

Le choix du niveau d'abstraction constitue le cœur de la problématique de modélisation des systèmes complexes contenant des processus spatio-temporels. Il n'est pas unique et s'exprime à la fois en terme de processus, de composante spatiale, et de composante temporelle. Une part importante de la réflexion pour intégrer la composante spatiale dans la modélisation est produite par la communauté scientifique s'occupant de l'**analyse spatiale** : "*ensemble de méthodes mathématiques et statistiques visant à préciser la nature, la qualité, la quantité attachées aux lieux et aux relations qu'ils entretiennent (l'ensemble constituant l'espace) en étudiant simultanément attributs et localisations*" [Brunet et al., 1983]. Dans la suite on ne s'intéresse qu'aux systèmes physiques observables (au moins en théorie).

### 3.3.1.2. *Système spatial et analyse spatiale*

Appréhender le fonctionnement d'un espace constitue une des motivations de base de la géographie, avec comme outil privilégié l'**analyse systémique**. La définition la plus large d'un système se réfère à un ensemble d'éléments en interaction.

*Toute application de ce concept [de système] nécessite donc une réflexion préalable sur la nature et le sens des éléments et des interactions correspondant à l'objet d'étude [Sanders et al., 1999].*

Depuis la multiplication des offres en télédétection et plus généralement en bases de données, les opportunités de prise en compte de la dimension spatiale dans les problématiques environnementales se sont accrues et ont stimulé la recherche dans ce domaine. D'un point de vue conceptuel, cela a abouti à la notion de **système spatial** [Sanders et al., 1999], qui peut être caractérisé par ces deux composantes : sa structure (spatiale) et son fonctionnement. Le système spatial est alors représenté par un ensemble d'entités spatiales (les éléments) entre lesquelles il existe des relations fonctionnelles appelées interactions spatiales. Il constitue donc le **schéma conceptuel**<sup>17</sup>, connaissances de base du fonctionnement à partir desquelles on est capable de construire un modèle. Il est souvent représenté sous forme schématique par des objets reliés entre eux par des flèches pour montrer les objets en relation fonctionnelle. L'ampleur prise par la modélisation objet dans le monde informatique témoigne de la robustesse de ce schéma de pensée. L'identification de ce système spatial puis la formalisation des interactions (e.g., sous forme d'équations), enjeux majeurs pour la modélisation, représentent les objectifs principaux de l'**analyse spatiale**. Cela passe par une approche inductive, dans laquelle les données ont un rôle prépondérant.

### 3.3.1.3. *Difficultés rencontrées par l'analyse spatiale*

Les difficultés rencontrées par l'analyse spatiale peuvent être résumées ainsi [Openshaw, 1991] :

1. l'absence de théorie ou d'hypothèse oblige l'utilisateur à chercher l'existence de motifs ou de relations sans savoir quoi chercher ni même s'il y a quelque chose à trouver ;
2. les difficultés d'opérer dans un contexte exploratoire dans lequel la connaissance des données complique le test d'hypothèses et de modèles qui en découlent;
3. les données géographiques disponibles sont souvent des substituts d'autres données qui manquent et qui sont impossibles à obtenir ;
4. même si les SIG regorgent de données, les variables-clés des processus ne sont pas disponibles pour la plupart des applications;

<sup>17</sup> Au sens de représentation mentale

5. la nature écologique de la plupart des analyses est un facteur limitant au sens où les agrégations de données changent la nature des micro-relations et parfois en créent indûment de nouvelles (relations) ;
6. les données spatiales tendent à être complexes ;
7. il y a des problèmes endémiques de qualité et de précision des données ;
8. la prise en compte de la dimension temporelle pose de sérieuses difficultés.

Les points 1 et 2 expriment la difficulté de caractériser un **système spatial** et de valider la forme des relations induites. Dans la continuité, le point 5 rejoint l'idée que la nature est structurée en différents **niveaux d'organisation**, et donc qu'un système spatial (*i.e.*, les éléments spatiaux et les relations fonctionnelles entre eux) n'est pertinent que pour une gamme d'échelle donnée (en temps, espace et processus).

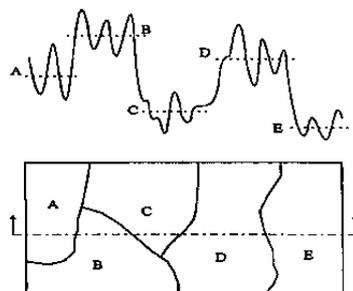
*A chaque niveau d'organisation correspondent des objets, des processus et des paramètres [de modélisation] pertinents [Puech, 2000].*

Les points 3 et 4 expriment le fait que les données spatiales auxquelles on a accès ne sont pas exactement celles que l'on désire. C'est typiquement les cas avec les données de télédétection en crue qui procurent une vision 2D de la plaine (*i.e.*, surface inondée) alors que l'on recherche souvent une vision 3D (*i.e.*, hauteur en tout point). Les points 6 et 7 rappellent que les données spatiales sont souvent imparfaites, thème abordé précédemment (*cf.*, § 3.2). Enfin le point 8 met en avant la difficulté de gérer simultanément les composantes spatiale et temporelle.

### 3.3.2. Modélisation et espace

#### 3.3.2.1. Problème du découpage spatial

Le recours à la modélisation distribuée pose le problème fondamental du choix du découpage spatial en accord avec les processus en jeu. Le découpage doit être fonctionnel dans le sens où il doit être à même de représenter la variabilité du processus dominant [Grayson et Blöschl, 2000]. Autrement dit, les variables d'intérêt (*e.g.*, variables d'état) sont supposées homogènes à l'intérieur de chaque entité spatiale. Comme le concept d'homogénéité ne prend de sens qu'avec la granularité et le support<sup>18</sup> liée à l'échelle de sa caractérisation (*cf.*, discours sur la résolution optimale § 2.2.2.2), le choix d'un découpage ne peut provenir que d'un compromis entre une variabilité intra-élément et une variabilité inter-élément (*cf.*, Figure 3-2) :



*Figure 3-2 : exemple de découpage spatial en fonction de la variabilité de la variable à caractériser (in [Kavvas, 1999])*

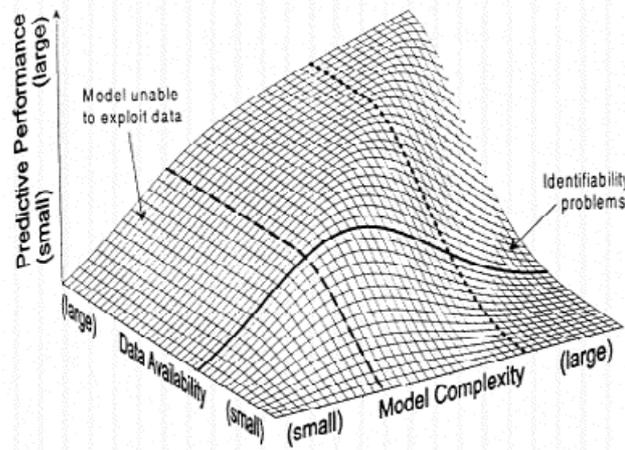
<sup>18</sup> terme défini au § 2.2.1.2

Il ressort donc clairement que le choix d'un découpage est fortement lié au niveau d'abstraction retenu puisqu'il est tributaire du niveau de restitution de la variabilité spatiale des variables d'intérêt. Les informations disponibles pour caractériser le processus et sa variabilité sont cependant tout aussi importantes dans le choix du découpage spatial [Grayson et Blöschl, 2000]. Le choix du niveau d'abstraction ne peut donc être guidé entièrement par les objectifs, mais des considérations en terme de disponibilité de données doivent être prises en compte :

*Par ailleurs, l'identification du niveau d'abstraction impose un examen approfondi des données : les objectifs étant fixés et donc le niveau d'abstraction déterminé, encore faut-il que les données relatives à ce niveau d'abstraction soient disponibles [Hill, 2000].*

### 3.3.2.2. Complexité du modèle et disponibilité en données

La disponibilité en données d'observation du phénomène (*e.g.*, télédétection en crue) est fondamentale en amont de la modélisation dans l'élaboration d'un schéma conceptuel du fonctionnement de la plaine en crue (*cf.*, § 2.5). En aval de la modélisation, la Figure 3-3 illustre très bien le fait que la disponibilité en données est un facteur limitant sur les performances prédictives du modèle.



**Figure 3-3 : représentation schématique de la relation entre disponibilité en données, complexité du modèle et performance prédictive (in [Grayson et Blöschl, 2000] )**

Pour les auteurs, le terme "data availability" représente aussi bien la quantité que la qualité des données (notamment au niveau de leur répartition spatiale) pour tester le modèle. Le terme "model complexity" est vu comme le degré de détail (notamment dans la dimension spatiale) dans la représentation des processus. Pour une certaine disponibilité en données (trait plein sur la Figure 3-3), il y a une limite dans la complexité du modèle au delà de laquelle les problèmes de validation et d'équifinalité (*cf.*, § 1.2.6.3) deviennent importants et réduisent les performances du modèle:

*There are too many model parameters and not enough data to test whether the model is working, or is working for the good reasons, which means that both the model structure and the model parameters cannot be identified properly [Grayson et Blöschl, 2000].*

Vouloir exploiter des données spatiales, *i.e.*, distribuées dans l'espace mais entachées d'imperfections, impose donc de recourir à un niveau de complexité du modèle qui soit adapté.

### 3.3.2.3. *Vers des approches adaptées aux données environnementales disponibles*

L'arrivée des données spatiales et des SIG a soulevé de forts questionnements quant à la façon d'appréhender l'hydrologie des bassins versants. La modélisation des processus physiques doit être repensée en fonction des nouvelles possibilités de caractérisation de l'environnement [Puech, 2000]. S'il est légitime de chercher à adapter ces nouvelles données dans des modèles existants, une voie complémentaire réside dans la recherche de nouvelles formes de modélisation plus adaptées aux données disponibles. Cette voie représente un tournant majeur par rapport aux modélisations classiques puisque le niveau de représentation du processus est réfléchi en fonction des données auxquelles il est possible d'accéder. Cette piste de réflexion, complémentaire à la modélisation traditionnelle, a été ouverte depuis plusieurs années en hydrologie distribuée :

*A further and more complicated question is to ask how hydrologic modeling can be rethought in the spatial context that GIS provides. In other words, instead of attaching existing models to GIS databases, can new hydrologic models be created that take advantage of the spatial data organizing capabilities of GIS? This question implies a reversal of traditional priorities in hydrologic modeling where the emphasis has always been on the way that physical processes are represented, and the manner in which the parameters are to be obtained for a particular environment plays a relatively minor role. In a spatial hydrology model, the emphasis is first on the digital description of the environment, and then on the formulation of process models which can fit the available data and environmental description [Maidment, 1996].*

### 3.3.2.4. *Variété des principaux modèles de processus spatio-temporels*

La complexité des modèles pour représenter des processus continûment variables dans l'espace et le temps couvrent une gamme assez importante selon leur niveau d'intégration dans ces deux composantes. La Figure 3-4 expose les principaux modèles existants [Favre et al., 1999], à travers une grille dans laquelle un espace (*resp.* un temps) est dit :

- **déconnecté (D)** si le modèle ne tient pas compte des positions relatives des éléments entre eux ;
- **découpé-connecté (DC)** si le modèle relève d'une structuration de l'espace et du temps en éléments (objets, entités) caractérisées par des variables d'état. La structure (du temps ou de l'espace) est formalisée par des relations entre éléments permettant une reconstruction partielle des espaces. Les relations et dépendances entre éléments sont modélisés en prenant en compte les positions relatives dans des graphes (*e.g.*, graphe de voisinage) ou dans la séquence temporelle.
- **continu (C)** si le modèle dans sa formalisation représente l'espace et le temps comme un support continu où les variables (d'état) d'un processus sont définies en tout point.

Cette grille de lecture forme la base de la formalisation MDQ (Modèle – Données – Questions) dont l'objet est tester l'adéquation en terme spatio-temporel de l'objectif, des données et du modèle mis en place afin de juger de la pertinence d'une démarche de modélisation et de ses hypothèses associées (la Figure 3-4 représente uniquement la grille des modèles).

Plus l'intégration dans l'espace et le temps est forte, plus la variabilité des processus spatio-temporels peut être approchée mais plus le besoin en données est important. Le niveau intermédiaire Découpé-Connecté en espace, avec des modèles associés s'appuyant sur des graphes de liaison, apparaît tout à fait intéressant par son adéquation avec la conception que l'on se fait du fonctionnement d'un système complexe en objets et relations entre ces objets (*cf.*, § 3.3.1.2).

		Espace		
		Continu	Découpé-Connecté	Déconnecté
T e m p s	Continu	- équations aux dérivées partielles	- processus d'état sur un graphe	- processus stochastiques temporels (trajectoires)
	Découpé Connecté	- techniques d'animation (morphing)	- chaînes de Markov spatio-temporelles	- chaînes de Markov - séries chronologiques - modèles ARIMA
	Déconnecté	- champs aléatoires	- analyse de graphes	- régression - analyse des données (ACP, AFC, ...)

ARIMA = Auto-Regressive Integrated Moving Average;  
ACP = Analyse en Composantes Principales ; AFC = Analyse Factorielle des Correspondances

Figure 3-4 : principales méthodes d'analyse spatiale - exemple de la grille des modèles (d'après [Faivre et al., 1999])

### 3.3.3. Conclusion

La valorisation de l'ensemble des informations élémentaires que l'on peut extraire des images de télédétection en crue nécessite une réflexion approfondie sur le système spatial. Ceci sous-entend le choix d'un découpage spatial et d'un mode de représentation des processus agissant entre les entités du découpage.

*L'organisation des systèmes se présente souvent sous la forme de réseaux de relations et de structures s'articulant entre elles, régies par un ensemble de contraintes [Hill, 2000].*

Du fait du caractère distribué de l'information de crue, la modélisation des interactions spatiales entre ces éléments peut être simplifiée par rapport aux équations différentielles afin de présenter une forme plus simple (e.g., linéaire) et plus apte à accepter les nombreuses données imparfaites disponibles. Dans cette voie alternative, mais complémentaire, aux techniques numériques habituelles en hydraulique (i.e., équations différentielles), les représentations discrètes de type "Découpé-Connecté" en spatial (et éventuellement en temps) apparaissent comme centrales. L'objet du paragraphe suivant (cf., § 3.4) est d'exposer brièvement des techniques empruntées à l'intelligence artificielle, et plus particulièrement au **raisonnement qualitatif** et aux **problèmes de satisfactions de contraintes (CSP)**, qui ont inspiré ce travail.

### 3.4. Pistes d'inspiration pour la valorisation des images de télédétection en crue

#### 3.4.1. Le raisonnement qualitatif

L'objectif de ce paragraphe est de présenter quelques techniques du **raisonnement qualitatif** associées aux systèmes physiques. Cette présentation s'appuie largement sur l'ouvrage [Travé-Massuyès et al., 1997].

##### 3.4.1.1. Introduction

Le raisonnement qualitatif est le résultat d'une convergence multidisciplinaire (*e.g.*, économistes, écologistes, automaticiens) issue de la motivation suivante : il n'est pas toujours possible, ni nécessaire, d'accéder à des connaissances quantitatives pour raisonner sur un système réel.

*Les deux cas principaux, dans lesquels les modèles qualitatifs peuvent offrir une bonne alternative aux traditionnelles représentations numériques, sont lorsque l'on peut se satisfaire de résultats approchés, ou lorsque les connaissances disponibles sur le système physique sont très imprécises, ou même lorsqu'elles sont intrinsèquement qualitatives [Travé-Massuyès et al., 1997].*

Ces approches sont clairement prônées en tant que **complément**, et non en opposition, des méthodes quantitatives classiques. Un de ses fondements, issu des travaux en Intelligence Artificielle, est guidé par des aspects cognitifs : comment automatiser les raisonnements de sens commun réalisés par l'homme sur des phénomènes physiques ?

*Qualitative reasoning is another very active subfield of Artificial Intelligence (Weld et De Kleer, 1989) whose aims is to produce programs that reason about physical system according to commonsense. While numerical system modelling is good for prediction and precise simulation, qualitative modelling should provide explanations about how a physical system works [Dubois et Prade, 1999].*

Une grande variété d'approches méthodologiques (*i.e.*, formalismes et techniques) ont vu le jour, toutes très proches des schémas conceptuels des opérateurs humains (de ce fait ils semblent également tout-à-fait adéquat pour retranscrire une connaissance d'expertise). Les principaux thèmes de recherche concernent [Travé-Massuyès et al., 1997] :

- le calcul qualitatif basé sur des algèbres de signes, d'ordre de grandeur, ou d'intervalles numériques ;
- les formalismes de modélisation de systèmes en termes de composants et connexions, de processus, ou d'influences causales ;
- la simulation d'équations différentielles qualitatives, contrepartie symbolique des équations ordinaires classiques ;
- l'abstraction temporelle visant la représentation et la simulation de processus à dynamique plus ou moins rapide.

Comme la composante spatiale est privilégiée par rapport à la composante temporelle, le discours a été axé sur les deux premiers points.

### 3.4.1.2. Signes, ordre de grandeur et intervalles

L'algèbre des **signes** est le premier concept qui a été développé en raisonnement qualitatif. L'idée initiale a été de représenter les évolutions des variables d'un système. Comme l'évolution d'une variable peut être représentée par le signe de sa dérivée, seules des équations qualitatives reliant les dérivées des variables sont nécessaires. Le domaine de variations des dérivées est alors réduit à l'ensemble fini  $\{+, 0, -\}$ . Une algèbre de signes a été construite à partir de cet ensemble et de relations d'addition, de multiplication et d'égalité qualitative (le signe  $\{?\}$  traduisant l'indétermination doit alors être ajouté). De nombreuses propriétés analogues avec l'algèbre linéaire ont été démontrées. L'utilisation de ce formalisme permet par exemple de vérifier rapidement la cohérence d'observations ou de faire des analyses aux tendances.

En pratique, l'information très limitée contenue dans les signes s'avère souvent insuffisante car elle conduit à beaucoup d'indéterminations (*e.g.*, typiquement le cas d'une somme d'une influence positive avec une influence négative). C'est pourquoi des informations sur les **ordres de grandeurs** sont souvent ajoutées, conduisant à un raffinement de la partition de l'espace des réels (*cf.*, Figure 3-5). On quitte alors le qualitatif pur puisque des bornes numériques sont introduites. Une extension de l'algèbre des signes, appelée algèbre qualitative, a été proposée, mais avec des propriétés moins fortes (*e.g.*, manque d'associativité et de distributivité strictes des opérateurs somme et produit).

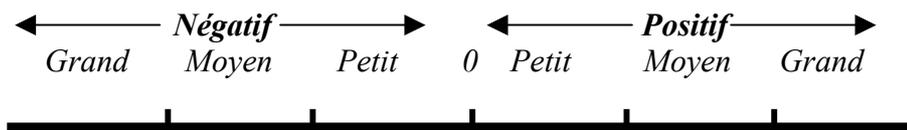


Figure 3-5 : exemple de partition selon les ordres de grandeur

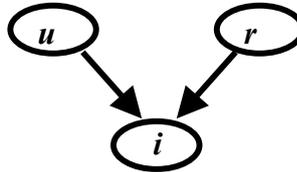
Enfin le **raisonnement sur les intervalles** numériques, qui n'est pas à proprement parlé du ressort du raisonnement qualitatif, peut toutefois s'interpréter comme une généralisation du raisonnement sur les signes et sur les ordres de grandeurs. Il permet de dépasser ces approches en levant certaines indéterminations. Prenons par exemple  $x = [10 ; 12]$  et  $y = [8 ; 9]$ . Dans l'algèbre des signes, la relation  $(x - y)$  est indéterminée. Dans l'algèbre des ordres de grandeurs, si l'on suppose que  $x$  et  $y$  appartiennent au même ordre (*e.g.*, PP), alors cette relation est encore indéterminée. Par contre dans l'algèbre des intervalles,  $(x - y) = [1 ; 4]$  permet de conclure sur la positivité de cette relation. De façon plus générale, le raisonnement sur les intervalles peut être résumé ainsi :

*Le raisonnement sur les intervalles consiste donc à associer à chaque variable du problème un ensemble de valeurs réelles, appelé son domaine. Ce domaine constitue donc un sur-ensemble du **domaine de variation** (effectif) de la variable. Étant donné un système de contraintes numériques (équations et inéquations), on souhaite déterminer le domaine de variation de chaque variable du modèle, c'est-à-dire calculer la projection de l'ensemble des solutions sur chacune d'entre elles. Les contraintes liant les variables sont utilisées pour détecter les valeurs **incohérentes** (ne satisfaisant pas les contraintes) et les supprimer des domaines initiaux (on parle de filtrage) [Travé-Massuyès et al., 1997].*

L'approche par **propagation de contraintes** sur les intervalles constitués des domaines de variation possibles des variables est la plus fréquente. Elle aboutit à la notion de propagation d'intervalles. L'intérêt de l'intervalle réside dans sa possibilité de représenter simplement et globalement l'ensemble des imperfections d'une grandeur. Comme les techniques associées à leur gestion sont spécifiques aux problèmes de résolution de systèmes de contraintes, un paragraphe entier y est dédié (*cf.*, § 3.4.2).

### 3.4.1.3. Graphes causaux

Un modèle est dit **causal** si le sens de propagation des influences ou des valeurs est explicite. Dans ce cas, il est généralement exprimé à l'aide d'un **graphe orienté** (ou **graphe causal**), dont les nœuds figurent les variables et les arcs les relations de cause à effet [Travé-Massuyès et al., 1997] (*cf.*, Figure 3-6).



*Figure 3-6 : graphe causal spécifiant que la différence de potentiel ( $u$ ) et la résistance ( $r$ ) déterminent causalement l'intensité ( $i$ ) dans la loi d'Ohm (in [Travé-Massuyès et al., 1997])*

La connaissance de ces relations de cause à effet est primordiale car elle permet **d'orienter la propagation** depuis les valeurs des causes (ici  $r$  et  $u$ ) vers les valeurs des effets (ici  $i$ ). L'exemple donné ci-dessus sur la loi d'Ohm montre l'ambiguïté du choix de la causalité dans certaine situation. Cependant l'opinion générale semble d'accord pour définir la causalité à partir des trois critères donnés par DE KLEER en 1979 [Travé-Massuyès et al., 1997] :

- ordre temporel : l'événement cause doit précéder l'événement effet ;
- localité : la cause n'agit que sur ses voisins directs ;
- nécessité : si l'événement cause est survenu, alors nécessairement l'événement effet doit apparaître, toutes choses restant égales par ailleurs.

*L'analogie de la rangée de dominos, tombant les uns à la suite des autres sous l'action du premier, illustre bien ces trois notions [Travé-Massuyès et al., 1997].*

### 3.4.2. Problèmes de satisfactions de contraintes (CSP)

De façon générale, un problème de satisfaction de contrainte a pour objet de résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire du type "Quel est le trajet le plus court pour relier un nombre  $N$  de villes ?". Ce genre de problème est souvent énoncé sous la forme d'une série de contraintes à satisfaire (*e.g.*, passer par toutes les villes) et d'un (ou plusieurs) critère(s) à optimiser (*e.g.*, minimiser la distance cumulée) traduit à son (ou leur) tour en contraintes sur les variables.

Ce paragraphe donne quelques notions et techniques de base du problème CSP de satisfactions de contraintes (CSP : Constraint Satisfaction Problem).

#### 3.4.2.1. Définitions

Une **contrainte** est une relation logique (*i.e.*, une propriété devant être vérifiée) entre différentes inconnues, appelées variables, chacune prenant ses valeurs dans un ensemble donné, appelé domaine. Ainsi, une contrainte restreint les valeurs que peuvent prendre les variables, en ce sens elle constitue un opérateur qui permet d'affiner le domaine des variables de manière à ce que le problème reste cohérent. Par exemple, la contrainte " $x^2 + y = 12$ " restreint les valeurs que l'on peut affecter simultanément aux variables  $x$  et  $y$ .

Une contrainte est dite **unaire** si elle agit sur une variable, **binaire** si elle agit sur deux variables ... et **globale** si elle agit sur toutes les variables. Par la suite le domaine de chaque variable est supposé **fini** et **discret** (*i.e.*, une variable ne peut prendre qu'une seule valeur parmi l'ensemble fini de valeurs constituant le domaine).

Un **CSP** est défini par la donnée d'un ensemble de variables, à chacune desquelles un domaine de valeurs est associé, et d'un ensemble de contraintes agissant sur ces variables. De façon plus formelle, un CSP est défini par un triplet  $(X, D, \zeta)$  tel que :

- $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$  est l'ensemble des variables (les inconnues) du problème ;
- $D$  est la fonction qui associe à chaque variable  $X_i$  son domaine  $D(X_i)$ , c'est-à-dire l'ensemble des valeurs que peut prendre  $X_i$  ;
- $\zeta = \{\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k\}$  est l'ensemble des contraintes. Chaque contrainte  $\zeta_j$  est une relation entre certaines variables de  $X$ , restreignant les valeurs que peuvent prendre simultanément ces variables.

Notons que  $D$  peut être défini par une série de contraintes unaires. Une "*instanciation*" est dite **totale** si toutes les variables du problème se voient affectées une valeur; elle est dite **partielle** dans le cas contraire. Une solution du CSP est une instanciation totale de l'ensemble des variables qui satisfait l'ensemble des contraintes énoncées. Un CSP qui admet au moins une solution est dit **consistant**, dans le cas contraire il est dit *inconsistant*. Dans le cas général, prouver la consistance d'un CSP est un problème NP-complet<sup>19</sup> [Collectif sur les CSP, 1995].

### 3.4.2.2. Recherche de solutions

Parmi les nombreuses techniques de recherche de solution d'un CSP, la plus simple consiste à énumérer et à tester la consistance de toutes les combinaisons possibles de variables. Cet algorithme naïf est connu sous le nom de "génère et teste". L'algorithme peut être stoppé à la première solution trouvée. Cette recherche "aveugle" dans l'espace de recherche du CSP devient vite irréaliste en temps de calcul lorsque le nombre de combinaisons augmente (ce qui est tout de suite le cas dans les problèmes distribués étant donné que chaque variable est différenciée pour chaque zone élémentaire de calcul). L'objectif des développements de recherche de solutions est de réduire le temps (et donc bien souvent l'espace) des recherches.

Une autre façon de procéder consiste à instancier les variables du problème dans un ordre prédéfini et de tester la consistance sur chaque instanciation même partielle. Dès lors qu'une instanciation partielle devient inconsistante, il est inutile de continuer en cherchant à l'étendre en une affectation totale. Dans ce cas, on "retourne en arrière" jusqu'à la plus récente instanciation partielle consistante que l'on peut étendre en affectant une autre valeur à la dernière variable affectée. Cette procédure est connue sous le nom de "*backtrack*" ou "**simple retour en arrière**". Elle peut être utilisée pour chercher une ou toutes les solutions d'un CSP. Des mémorisations d'ensemble d'instanciations ne participant à aucune solution sont parfois utilisées pour éviter la découverte redondante d'inconsistances locales. Le gain en temps de calcul est cependant souvent insuffisant.

Une des techniques les plus utilisées pour gagner du temps par rapport à l'algorithme précédent s'appelle le **filtrage par consistance partielle (ou locale)**. L'objectif est de réduire le domaine des variables en utilisant la **consistance d'arc**. Pour des contraintes binaires, cela signifie la suppression

<sup>19</sup> Un problème NP-complet est un problème qui n'est pas traitable en temps polynomial, mais en un temps exponentiel avec la taille des données. Un algorithme d'approximation est alors souvent recommandé.

des valeurs qui rendent impossible la satisfaction d'au moins une contrainte portant sur un couple de variables ; *i.e.*,

$$x \in \{1,7\}, y \in \{2,8\}, x = y + 1 \text{ est arc-consistant}$$

$$x \in \{1,7\}, y \in \{2,7\}, y = x + 1 \text{ n'est pas arc-consistant} \Rightarrow \text{réduction à } D(x) = \{1\} \text{ et } D(y) = \{2\}$$

Originellement développée sur des contraintes binaires, la vérification de la consistance d'arc permet donc de construire, à partir du CSP  $(X, D, \zeta)$ , un CSP  $(X, D', \zeta)$  avec  $D' \subseteq D$ . La consistance d'arc n'est cependant pas suffisante pour assurer la consistance d'un CSP. Elle est généralement utilisée en "anticipation" : pendant la génération d'instanciation partielle, il est possible de filtrer le domaine des variables pour ne garder que les valeurs "localement consistantes" avec l'instanciation en cours de construction. Dès que le domaine d'une variable devient vide, il est inutile d'étendre l'instanciation.

Une propriété plus forte que la consistance d'arc a été recherchée : la **consistance de chemin**. Pour des contraintes binaires, la définition informelle suivante peut lui être donnée :

*La consistance de chemin est une condition de cohérence entre deux variables pour un couple de valeurs qui sont compatibles au niveau de la contrainte qui les relie directement, et l'existence d'une suite de valeurs compatibles deux à deux le long de l'ensemble des chemins dans le graphe de contraintes qui peuvent relier les deux variables considérées [Würbel, 2000].*

Ce type de raisonnement déductif correspond à un mécanisme de **propagation** qui peut permettre de détecter rapidement une inconsistance ou de réduire les domaines des variables. Cette propagation peut également être vue comme l'ajout de contraintes unaires.

Une autre approche est l'établissement d'**heuristiques** qui sont des procédures qui exploitent au mieux la structure du problème considéré pour déterminer l'ordre dans lequel les variables et les valeurs doivent être considérées. Ce "guidage" dans l'ordonnancement (*e.g.*, choisir la variable dont le domaine est le plus petit et essayer de l'instancier à la valeur minimum de son domaine) a souvent pour objectif de trouver une solution de qualité raisonnable en un temps de calcul aussi faible que possible. Les heuristiques efficaces sont malheureusement dépendantes de l'application considérée et difficilement généralisables. L'expression explicite des relations de causalité peuvent permettre d'aiguiller ces heuristiques.

Enfin, il existe encore bien d'autres approches pour optimiser la recherche de solutions. Une grande partie de celles-ci est constituée d'algorithmes incomplets, dans le sens où l'on n'est pas sûr de trouver une solution même si le CSP est consistant.

### 3.4.2.3. *Prise en compte du temps*

La prise en compte du temps conduit à la gestion d'une séquence de CSP où chaque élément de la séquence diffère du précédent par l'ajout et/ou le retrait de certaines contraintes : on aboutit à la notion de **CSP dynamique**. Le mode de gestion le plus répandu est le **maintien de cohérence** par des algorithmes adaptés des filtrages de consistance d'arc. Leur objectif est d'éviter de refaire l'ensemble des filtrages après chaque modification du CSP [Würbel, 2000].

### 3.4.2.4. *Absence de solution*

Lorsque aucune instanciation ne satisfait l'ensemble des contraintes, le CSP est inconsistant. Le problème est alors sur-contraint, ce qui peut être mis en parallèle avec la fusion d'informations (*i.e.*, exprimées sous forme de contraintes) contradictoires. Il faut alors faire évoluer un état de croyance

(i.e., révision). En effet dans la pratique il est souvent utile, voire nécessaire, d'obtenir une solution, même approchée, au problème. Deux approches, très proches de la fusion/révision, se dégagent alors.

La première approche, la plus intuitive, cherche à maximiser le nombre de contraintes satisfaites [Freuder et Wallace, 1992] : on parle de **satisfaction partielle de contraintes** ou **PCSP** (Partial CSP). Cela revient à effectuer une **contraction** sous hypothèse de **changement minimum**. La difficulté devient alors de trouver le (ou les) sous-ensemble(s) minimal(aux) de contraintes à supprimer pour restaurer la consistance du CSP.

La seconde s'appuie sur la notion de valuation des CSP : on parle de **CSP valués**. Son originalité est d'autoriser la prise en compte de préférences graduelles entre instanciations (e.g., contraintes flexibles, contraintes floues), ou entre contraintes (e.g., priorités sur les contraintes). Cette prise en compte des préférences permet de **relâcher** certaines contraintes et de donner ainsi des solutions (celles qui sont jugées "les moins mauvaises"). Plutôt que de faire une partition de l'ensemble des instanciations en deux classes : celles qui sont effectivement solutions du problème et celles qui ne le sont pas, l'introduction de préférences permet de raffiner cet ordre en créant des classes intermédiaires. Cela permet d'ordonner totalement ou partiellement les solutions d'un problème, par exemple en départageant certains sous-ensembles minimaux résultant de l'approche par PCSP. On peut voir dans cet ordre une analogie avec l'enracinement épistémique qui ordonne les croyances d'un agent [Würbel, 2000]. Les modes de valorisation de la valuation sont très vastes (cf., [Schiex et al., 1997]) et viennent rejoindre à peu près tous les formalismes, énoncés en Annexe 6, de prise en compte de l'incertitude. La combinaison de valuation la plus utilisée se fait par l'opérateur *Maximum* : les "meilleures" solutions sont celles qui satisfont au mieux la contrainte la moins satisfaite (e.g., qui maximisent son degré de satisfaction). Cette classe regroupe les problèmes de satisfaction de contraintes floues (FCSP pour Fuzzy CSP) et possibilistes. L'utilisation majoritaire de cet opérateur s'explique par le fait que la plupart des algorithmes et propriétés issus des CSP classiques ont pu être adaptés.

Quelle que soit l'approche retenue, l'identification des contraintes non complètement satisfaites est importante pour pouvoir localiser et analyser les raisons des conflits [Amilhastre et al., 2002].

----- oOo -----



*crue de Mai 1983 (Moselle)*

## **PARTIE II :**

# **Sujet de thèse et sites d'étude**

**Chapitre 4 : Sujet de thèse**

**Chapitre 5 : Sites d'étude et données recueillies**

## Sommaire de la PARTIE II

<b>4. SUJET DE THÈSE .....</b>	<b>89</b>
4.1. Origine de cette recherche .....	89
4.2. Idées défendues dans ce travail .....	89
4.3. Proposition de sujet de recherche .....	91
4.4. Démarche retenue .....	91
<b>5. SITES D'ÉTUDE ET DONNÉES RECUEILLIES .....</b>	<b>93</b>
5.1. Site 1 : l'Hérault (site principal) .....	93
5.2. Site 2 : la Moselle .....	98
5.3. Site 3 : l'Aisne .....	102
5.4. Synthèse sur la diversité des trois sites d'étude .....	106

## 4. Sujet de thèse

### 4.1. Origine de cette recherche

Les deux premiers chapitres de la synthèse bibliographique font émerger les constats suivants :

Le *chapitre 1* a mis en avant 1) **des besoins croissants en terme de caractérisation de l'aléa** du fait d'exigences de plus en plus élevées de la société à l'égard du risque d'inondation ; 2) **un manque de données quantitatives spatialisées sur des événements historiques** qui pénalisent et limitent les approches existantes d'analyse de l'aléa, que ce soit pour caler et valider les schémas numériques (*e.g.*, la modélisation mathématique), ou pour consolider et affiner un zonage (*e.g.*, l'approche hydrogéomorphologique).

Le *chapitre 2* a montré, quant à lui, que la télédétection spatiale se révèle être une source d'informations spatialisées unique dont l'apport peut être substantiel. En effet, le potentiel de la télédétection apparaît fort utile à tous les stades de la caractérisation de l'aléa : les images hors crue permettent de caractériser physiquement la plaine et les images en crue d'accéder à de l'information spatialisée sur la crue observée. **L'intérêt des données de télédétection en crue pour leur potentiel d'observation à l'intérieur du champ d'inondation**, alors que les autres modes d'acquisitions d'informations sont très limités pendant la crue, apparaît comme un point particulièrement intéressant. Cependant la présence de fortes imperfections affectant la plupart des informations extraites de télédétection ne doit pas être occultée. En conséquence, les informations extraites apparaissent souvent inadéquates pour des approches déterministes comme la modélisation hydraulique. Des documents aussi riches d'informations que des photographies aériennes prises en crue se retrouvent de façon générale très sous-exploitées en regard de leur potentiel informatif.

La question suivante, à l'origine de ma question de recherche, découle de ces constats : ***Est-il possible de dépasser la faible valorisation actuelle des photographies aériennes prises en période de crue afin de rendre les nombreuses informations qu'elles contiennent intéressantes et accessibles pour les approches classiques d'analyse de l'aléa ?***

Le *Chapitre 3* a permis de montrer l'intérêt de plusieurs techniques permettant de faciliter l'exploitation de données spatiales entachées d'imperfections. En particulier, le SIG est confirmé être un outil central tant il facilite la gestion des données spatialisées. Pour le traitement des données imparfaites, de nouvelles pistes, tirées essentiellement de la communauté scientifique de l'intelligence artificielle, sont apparues comme très prometteuses. Elles concernent tout d'abord les techniques **de fusion et de révision de l'information** qui traitent des problèmes de gestion simultanée de grande quantité de connaissances. Elles sont ensuite relatives à l'exploitation de schémas d'analyse présentant un niveau d'abstraction plus adapté aux données localisées et imparfaites : techniques liées au **raisonnement qualitatif et aux problèmes de satisfaction de contraintes**.

### 4.2. Idées défendues dans ce travail

Ce travail est basé sur l'hypothèse qu'il est possible de répondre positivement à la question énoncée précédemment (*cf.*, § 4.1) en revisitant le mode d'exploitation des images de télédétection.

**L'idée fondamentale de ce travail est d'intégrer, dans le processus de traitement des images de télédétection, des relations spatiales déduites du fonctionnement hydraulique afin d'améliorer considérablement la valorisation des nombreuses informations contenues dans ces images.**

Cela revient à défendre l'idée qu'il est possible de surmonter certaines limites observées dans une télédétection de type cartographie descriptive statique et locale (*i.e.*, caractérisation des objets d'intérêt et de leurs attributs) par l'introduction d'éléments liés à la dynamique de fonctionnement du système étudié. **La démarche entreprise dans ce travail se focalise sur la composante spatiale. Elle est illustrée sur un cas d'application consistant à quantifier l'état de remplissage d'une plaine d'inondation à partir de photographies aériennes prises au cours de la crue. Elle s'insère dans une logique qui vise à rendre les techniques de télédétection plus efficaces par l'introduction de l'analyse spatiale.**

Les motivations principales de cette évolution sont multiples. Tout d'abord, il paraît évident que le découpage régulier en pixels carrés n'a, sauf exception, aucun sens thématique. Une mutation de traitements locaux de type classification automatique "pixel à pixel" à des approches de type "objet" ne peut être que profitable. Les approches de classification de l'occupation du sol à la parcelle sont les exemples les plus marquants de cette évolution (*cf.*, 2.2.2.1), puisque l'information radiométrique contenue dans chaque pixel n'est plus gérée de façon indépendante de celle des autres pixels. Cette tendance à prendre en compte des informations de texture et de structure, relativement récente dans le monde de la télédétection, reste cependant très marginale (en tout cas en sciences de l'environnement). Avec l'arrivée en masse des images de télédétection à très haute résolution spatiale, elle commence cependant à être fortement stimulée, puisque la diminution du rapport entre la taille des pixels et la taille des objets d'intérêt tend à rendre les approches classiques de traitement d'images peu performantes. Enfin, le développement des SIG, et des bases de données environnementales, participe pour beaucoup à cette évolution en permettant d'apporter des connaissances extérieures aux images.

**Ce travail propose d'illustrer, sur le cas d'application retenu, l'intérêt d'intégrer, non seulement des informations de structure, mais également des relations spatiales fonctionnelles entre ces objets.** On propose de dépasser la structuration "locale et statique" de l'espace en objet d'intérêt, pour définir une structure fonctionnelle qui intègre des relations spatiales déduites des interactions de fonctionnement entre les différents objets. Pour le problème traité, c'est l'hydraulique qui va guider le choix de la structure fonctionnelle à retenir. C'est pour cela qu'elle sera appelée **structure hydrodynamique fonctionnelle**, ou plus simplement **structure hydrodynamique**. Les réflexions sur la modélisation spatiale (*cf.*, § 3.3) seront très utiles pour retenir un "bon" niveau d'abstraction, véritable schéma (spatial) fonctionnel de la crue.

**La force de cette "télédétection fonctionnelle" est d'offrir un schéma qui permet de gérer conjointement l'ensemble des informations extraites des images de télédétection, mais également d'intégrer des informations exogènes complémentaires (topographie fine notamment).** Il est ainsi possible de prendre en compte la contribution de chaque information contenue dans les images, même si chacune d'entre elles a une si faible valeur informative qu'un schéma "local" conduirait à la laisser de côté. La faible valorisation des photographies aériennes prises en période d'inondation constatée actuellement en témoigne.

Cela nécessite, en contrepartie, de traiter, dans un même schéma d'analyse, des informations spatialisées de **qualité disparate** qui peuvent être de nature **qualitative** ou **entachées d'imperfections** (*i.e.*, imprécises et/ou incertaines et/ou incomplètes). Il apparaît alors très intéressant de se tourner vers des **techniques empruntées au domaine de l'intelligence artificielle (IA)** qui traitent des problèmes

de **fusion** et de **mise en cohérence** d'informations, ainsi que des **problèmes de satisfaction de contraintes**.

Ceci m'amène à mettre en avant l'intérêt d'une **approche multidisciplinaire** mêlant, sans aucune cassure, **hydraulique, techniques spatiales et techniques du type intelligence artificielle (IA)**.

### 4.3. Proposition de sujet de recherche

Pour illustrer les idées émises dans le paragraphe précédent, *ce travail propose, à travers la mise au point d'une méthodologie d'exploitation des photographies aériennes prises pendant une crue, de transformer la vision planimétrique (2D) offerte par ces clichés en une description spatialisée de la cote de l'eau sur l'ensemble de la plaine à l'instant de la prise de vue (caractérisation en 3 dimensions à un instant donné)*.

La cote de l'eau (ou la hauteur d'eau) étant le paramètre fondamental dans les différentes politiques de gestion du risque d'inondation (*cf.*, § 1.1.4), l'accès à des données quantitatives et distribuées de cette variable est un **gain substantiel par rapport à la simple extraction surfacique classiquement réalisée** (*i.e.*, uniquement limites gauche et droite de l'inondation).

Pour être pertinente, la méthodologie doit satisfaire aux exigences suivantes :

- être aussi **générale** que possible, *i.e.*, reproductible dans un panel le plus large possible de documents photographiques et de contextes morpho-hydro-dynamiques ;
- fournir des estimations de cote/hauteur avec une **précision de l'ordre de un à deux décimètres** afin de satisfaire les attentes en terme de gestion du risque d'inondation et rentrer dans des précisions compatibles avec les simulations hydrauliques numériques.

Bien que pouvant être directement utilisable dans la gestion du risque, l'approche développée ne veut en aucun cas se substituer aux approches traditionnelles de caractérisation de l'aléa. Elle doit plutôt être vue comme une méthode **complémentaire**.

### 4.4. Démarche retenue

Afin de développer, tester et valider une méthodologie qui soit aussi générique que possible, la démarche s'est basée sur une gamme de sites d'études couvrant une grande diversité à la fois de contexte morpho-hydro-dynamique et de géométrie de prises de vue disponibles pendant la crue étudiée.

L'exposé de la démarche commencera par la présentation des trois sites retenus (*cf.*, § 5) : la basse vallée de l'Hérault comme site principal, la moyenne vallée de la Moselle et la basse vallée de l'Aisne comme sites secondaires.

Il sera poursuivi par la présentation, à travers trois chapitres, de la méthodologie générale mise au point pour exploiter les photographies aériennes en crue (*cf.*, PARTIE III).

1. Le premier (*cf.*, chap.6) concerne l'**extraction** des informations jugées utiles et pertinentes pour la connaissance de la crue : **structure hydrodynamique** retenue et **indications de cotes relatives au niveaux atteints par l'eau**. L'environnement SIG et l'analyse spatiale sont mis à contribution pour extraire puis gérer ces informations qui proviennent des images de **télé-détection** en crue juxtaposées avec d'autres données environnementales.

2. La second (cf., chap.7), appelé le "flooding problem"<sup>20</sup>, expose la façon dont la structure hydrodynamique a été exploitée pour définir un système de contraintes traduisant la nécessaire cohérence hydraulique de la solution réelle recherchée. Le problème hydraulique, qui consiste à rechercher une estimation des cotes du toit de l'eau au moment de prise des clichés, est transformé en un problème qui peut être vu comme un problème de satisfaction de contraintes et/ou comme un problème de fusion/mise en cohérence.
3. Le troisième (cf., chap.8) concerne la **solution développée** pour résoudre le "flooding problem". Il rappelle quelques résultats obtenus par des techniques IA "généralistes" testées dans le cadre du projet REVIGIS, puis expose les différents critères et choix retenus pour arriver à une solution correcte et rapide.

L'étape suivante (cf., PARTIE IV) consiste à mettre en œuvre la méthodologie proposée, appelée "**approche photo**", sur les trois sites d'étude retenus. L'objectif est à la fois d'illustrer la démarche, mais également de tester son champ d'application. Pour plus de clarté, les démarches d'extraction des données de télédétection (cf., chap.9) et de mise en cohérence (cf., chap.10) sont bien séparées.

Une dernière partie (cf., PARTIE V) est entièrement consacrée à la discussion. Les délicats problèmes de **validation** et de l'analyse de **sensibilité** y sont abordés dans un premier temps (cf., chap.11 et 12). Le chapitre suivant (cf., chap. 13) s'intéresse à la **complémentarité** de "l'approche-photo" avec la **modélisation hydraulique** à travers la mise en œuvre d'un modèle bidimensionnel (logiciel rubar20 développé par le Cemagref de Lyon) sur la basse vallée de l'Hérault. Pour finir, le chapitre 14 tire un bilan des intérêts, limites et perspectives de "l'approche-photo" proposée.

La démarche générale retenue est donc bien une **approche multidisciplinaire** puisqu'elle fait appel :

- à l'**hydraulique**, qui guide les informations à extraire des images de télédétection, *i.e.*, **objets d'intérêt** (découpage de la plaine en entités élémentaires appelées compartiments), **attributs internes** (la cote du toit de l'eau est retenue comme variable de caractérisation de l'état de ces compartiments), et **relations spatiales de fonctionnement** entre compartiments (observations de circulations hydrauliques qui, pour des exigences de cohérence, vont être transcrites en contraintes numériques de type "inégalités" sur les estimations de cote de l'eau des compartiments connexes) ;
- aux **techniques spatiales** dont
  - la **télédétection**, et plus exactement la photo interprétation, pour extraire des clichés aériens les informations de base relatives à l'état et au fonctionnement de la plaine inondée ;
  - les **SIG**, base de stockage et de manipulation de toutes les informations spatialisées ;
  - l'**analyse spatiale**, pour choisir un schéma spatial de représentation de la plaine inondée adapté à son fonctionnement ;
- à des techniques empruntées à l'**intelligence artificielle (IA)** qui vont servir de sources d'inspiration pour formaliser et résoudre efficacement le système de contraintes traduisant la mise en cohérence hydraulique.

----- oOo -----

---

<sup>20</sup> Cette terminologie anglaise fait référence à la dénomination retenue dans le cadre du projet européen REVIGIS (<http://www.cmi.univ-mrs.fr/REVIGIS/>) pour lequel mon travail sur la basse vallée de l'Hérault a servi de jeu de données central, permettant à plusieurs équipes de tester et comparer des techniques du domaine IA sur un cas d'application réel.

## 5. Sites d'étude et données recueillies

Trois sites d'étude ont été retenus (*cf.*, Figure 5-1) pour développer la méthodologie d'exploitation de photographies aériennes prises en crue : la basse vallée de l'Hérault (site principal n°1), la moyenne vallée de la Moselle (site 2) et la basse vallée de l'Aisne (site 3). Leur choix s'est appuyé sur trois critères fondamentaux :

1. présence d'un champ d'inondation de plusieurs centaines de mètres ;
2. existence de photographies aériennes prises au cours d'au moins une crue;
3. représentativité d'une certaine diversité en terme de contexte morfo-hydro-dynamique en France, ceci dans une optique de généralisation de la méthode développée.



Figure 5-1 : les trois sites d'étude

### 5.1. Site 1 : l'Hérault (site principal)

#### 5.1.1. Caractéristiques du bassin versant

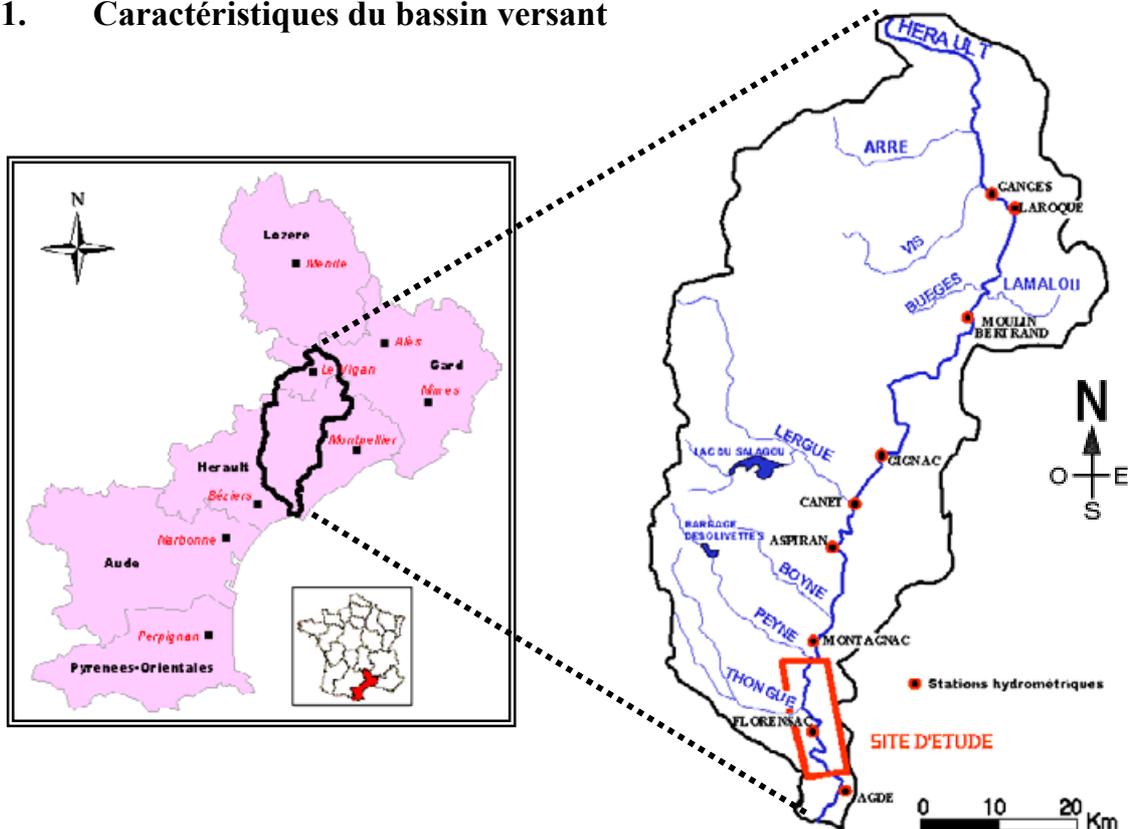


Figure 5-2 : bassin versant de l'Hérault, site d'étude et stations hydrométriques

### 5.1.1.1. Contexte géographique

Le fleuve côtier Hérault prend naissance sur le flanc méridional de l'Aigoual, dans les Cévennes (Gard) à 1288 m d'altitude. De sa source à la mer, il parcourt une distance de 150 km et draine un bassin d'alimentation superficiel de 2550 km<sup>2</sup> (cf., Figure 5-2). La pente du fleuve est forte dans la haute vallée (5 % à 2 %), diminue dans la moyenne vallée (0,8 %) pour atteindre 0,2 % dans la basse vallée. Son débit moyen annuel est légèrement inférieur à 50 m<sup>3</sup>/s au voisinage de l'embouchure. Ses principaux affluents sont l'Arre, la Vis (12.5 % du bassin versant), la Buèges, la Lergue (21 %), la Boyne, la Peyne et la Thongue (11 % à elles deux) en rive droite; le Lamalou en rive gauche.

### 5.1.1.2. Contexte climatologique et hydrologique

Le bassin versant de l'Hérault, situé à un carrefour d'influence dû à la combinaison de conditions orographique et aérologique particulières (cf., Fig. A8\_ 1), est soumis à un climat méditerranéen. Son régime pluviométrique est très hétérogène avec des valeurs moyennes annuelles très fortes (plus de 2200 mm/an) sur les sommets contrastant avec des valeurs inférieures à 600 mm/an dans la partie la plus méridionale (cf., Fig. A8\_ 2). Si l'été et l'hiver constituent des périodes de moindre abondance, le printemps et surtout l'automne s'avèrent être les saisons propices aux pluies extrêmes.

Deux grandes catégories de crues peuvent être distinguées : les crues de type amont et celles de type aval. Les crues de type amont sont issues de violentes averses sur le haut relief. Des débits très élevés générés dans le nord de la vallée sont laminés en aval avec stockage dans le lit majeur. Les crues de type aval résultent de fortes précipitations sur les affluents les plus méridionaux de l'Hérault (la Lergue, le Peyne, la Boyne, et la Thongue en rive droite ainsi que le Lamalou en rive gauche). Dans tous les cas, les crues sont très *rapides* et engendrent fréquemment des dégâts importants.

### 5.1.1.3. Aménagements du bassin et réseau de mesures en hauteur/débit

#### 5.1.1.3.1 Les barrages et seuils

Deux barrages sont situés sur le bassin versant. Ils interceptent à eux-deux moins de 5 % du bassin versant Héraultais à Agde (*i.e.*, 76 km<sup>2</sup> pour le barrage du Salagou et 30 km<sup>2</sup> pour celui des Olivettes), ce qui rend négligeable leur impact potentiel en terme de régulation hydrologique.

De nombreux seuils ont été édifiés dans le lit mineur de l'Hérault pour stabiliser le profil en long de la rivière et/ou permettre le captage d'eau potable et/ou produire de l'énergie hydroélectrique. Plusieurs d'entre eux ont été reconstruits ou réparés ces dernières années (*e.g.*, celui de Saint-Thibéry).

#### 5.1.1.3.2 Les digues

Dans ce mémoire, on appelle *digue tout obstacle topographique linéaire* (surélévation brusque de la cote terrain), d'origine naturelle (*e.g.*, bourrelet de berge) ou anthropique (*e.g.*, remblai pour les routes, muret entourant une parcelle). Le fonctionnement hydraulique de la basse vallée de l'Hérault, qui en présente un nombre stupéfiant dans des orientations aussi bien transversales que longitudinales, est de ce fait rendu très complexe en période de submersion. Les digues sont de deux types :

- les digues d'agglomérations (digue "ceinture"), construites à proximité immédiate de villages (*e.g.*, Saint-Thibéry et Florensac), dont l'objectif est de protéger les habitations contre les inondations. Souvent érigées ou renforcées à la suite de crues importantes, elles sont dimensionnées pour rester insubmersibles à des événements rares (*i.e.*, crue centennale au minimum).
- les digues de protection des terres agricoles, construites pour une grande partie du moyen-âge au XIX<sup>ème</sup> siècle, puis pour le reste dans la deuxième moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle afin de combattre les

crises de Phylloxéra (par submersion hivernale des vignes) dans une région de monoculture de la vigne [S.I.E.E., 1997]. De construction rustique, ces digues sont beaucoup plus basses que les précédentes et sont submersibles pour des périodes de retour allant de 5 à 15 ans. Elles soulèvent la délicate question de leur gestion en terme de coût d'entretien par rapport à leur rôle effectif mal connu.

### 5.1.1.3.3 Le réseau de mesures

La Figure 5-2 indique l'ensemble des neuf échelles limnimétriques placées sur le fleuve Hérault. Concernant les affluents, seules la Lergue et la Vis en sont équipées. Les courbes de tarage associées ne sont pas toujours fiables, particulièrement pour les débits débordants, et peuvent même être indisponibles (e.g., station de Florensac). Les stations les plus sûres sont celles de Lodève et Aspiran.

## 5.1.2. Caractéristiques du site d'étude "Hérault"

La zone étudiée a été restreinte à un secteur situé le plus à l'aval possible afin de représenter au mieux les inondations de plaine. Elle représente un linéaire de rivière avoisinant 18 km (cf., Figure 5-3) compris entre Pézenas et Agde. Les derniers kilomètres ont été exclus car très artificialisés. Sur ce secteur, la largeur du lit majeur dépasse un, voire deux kilomètres. La pente moyenne longitudinale avoisine 0,5 ‰. La densité moyenne de digues dépasse largement 2 km / km<sup>2</sup>.

La Peyne, juste à l'amont (Pézenas), et la Thongue (Saint-Thibéry) sont les deux affluents importants, mais non mesurés, pour le site d'étude. Leurs crues, souvent concomitantes avec celle de l'Hérault (e.g., 1907, 1964, 1982, 1986), peuvent constituer des apports non négligeables, surtout en cas de crue aval [Pons, 1991].

La vigne constitue la culture principale en représentant environ 50 % de la surface du site d'étude.

La couche superficielle, constituée de limons d'inondation, recouvre une couche d'alluvions récentes principalement formées de sables et de graviers. S'appuyant sur un substratum de grès, de molasses, de marnes et d'argiles du tertiaire, la puissance aquifère atteint environ 10 mètres et croît vers l'aval. Pendant les crues, il semblerait que ce soit le fleuve qui alimente la nappe [Rieu, 1985].

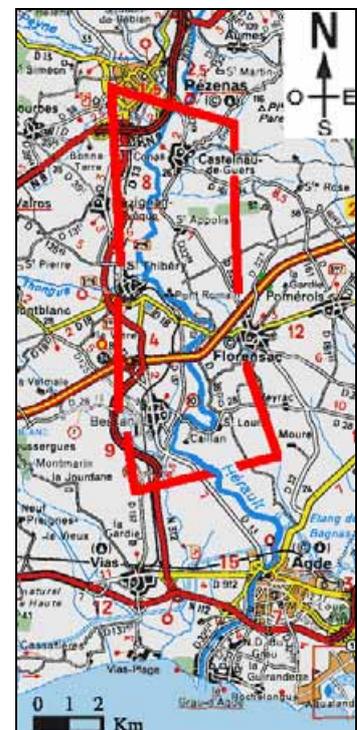


Figure 5-3 : délimitation du site d'étude "Hérault"

## 5.1.3. Crue étudiée : crue de début novembre 1994

La crue de début novembre 1994 fait suite à deux mois très pluvieux pendant lesquels la totalité du bassin versant est affectée par d'importantes précipitations (cumul entre le 8 septembre et le 11 octobre de 480 mm au Mont Aigoual et de 240 mm à Florensac), saturant sols et nappes. Le site d'étude subit alors une première submersion importante suite aux nouvelles pluies du 18 au 20 octobre, avec des débits estimés supérieurs à 1200 m<sup>3</sup>/s à Agde (le limnigraphe de Florensac tombe alors en panne !).

Début novembre, un nouvel épisode pluvieux intense touche préférentiellement les zones de relief (Mont Aigoual et grands Causses), créant un cumul de précipitations entre le 2 et le 6 novembre de 450 mm au Mont Aigoual contre moins de 50 mm à Florensac et une crue de type amont (i.e., les

affluents aval comme la Lergue, la Peyne ou même le Lamalou ont peu contribué). Les deux pics, caractéristique des hydrogrammes de ce type de crue, sont passés à Ganges et Laroque le 4 vers 16 h et le 5 vers 6h, le second étant plus violent que le premier. A Agde ces deux pics n'en ont fait plus qu'un (cf., Figure 5-4). Une estimation rapide permet de situer la période de retour de cette crue entre 10 et 15 ans en terme de débit maximal. A titre indicatif, la durée séparant les pointes de crue est de 5 h entre Ganges (640 km<sup>2</sup>) et Gignac (1350 km<sup>2</sup>) ; de 41 h pour le premier pic et de 29 h pour le second entre Ganges et Agde (2550 km<sup>2</sup>). L'examen des limnigraphes encadrant le site d'étude "Hérault" permet de situer le pic de crue (au niveau du lit mineur) dans les dernières heures de la journée 5 novembre dans le secteur amont du site d'étude (pic observé le 5 entre 15 et 20 h à Montagnac) et dans les premières heures du 6 novembre dans le secteur aval (pic observé le 6 à 11 h à Agde).

#### 5.1.4. Clichés photographiques disponibles pour la crue

Commanditée par le Service hydraulique du Conseil général de l'Hérault (CG 34), une couverture aérienne de la basse et moyenne vallée de l'Hérault (constituée au total de 58 clichés verticaux noir et blanc au 18000<sup>ème</sup>) a permis de saisir l'état de la totalité de la plaine inondée le 6 novembre 1994 vers 13h00, soit 2 h après le passage du pic de crue en lit mineur à Agde (aval immédiat du site). Le site d'étude est entièrement couvert par douze clichés (avec zone de recouvrement).

Par ailleurs, une quarantaine de clichés obliques couleur pris par ULM le 5 novembre entre 14 et 15 h, *i.e.*, au passage du pic de crue à Montagnac (amont immédiat du site) ont pu être récupérés auprès de la DDE 34. Cette campagne n'offre pas une vue continue de la plaine (seule 30 % est couverte), mais se focalise sur telles ou telles zones du site d'étude jugées intéressantes par le preneur de clichés.

La Figure 5-4 permet de repositionner l'instant des prises de vue par rapport aux estimations de débits (estimation issues de mesures de hauteur d'eau en lit mineur et de courbes de tarage débit/hauteur). Les photos obliques apparaissent concomitantes avec le pic de crue à l'amont du site d'étude alors que les photos verticales représentent le pic de crue à l'aval du site.

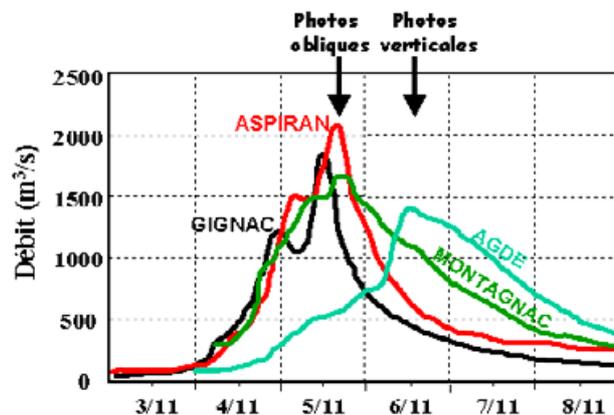


Figure 5-4 : hydrogrammes de la crue de nov. 1994 (Hérault) et date des campagnes photos

Les photographies aériennes verticales prises en crue ont été scannées, orthorectifiées (cf., Annexe 4, § A4\_4) et mosaïquées pour être superposables aux autres données recueillies.

Un exemple de cliché vertical et oblique est présenté en Figure 5-5.

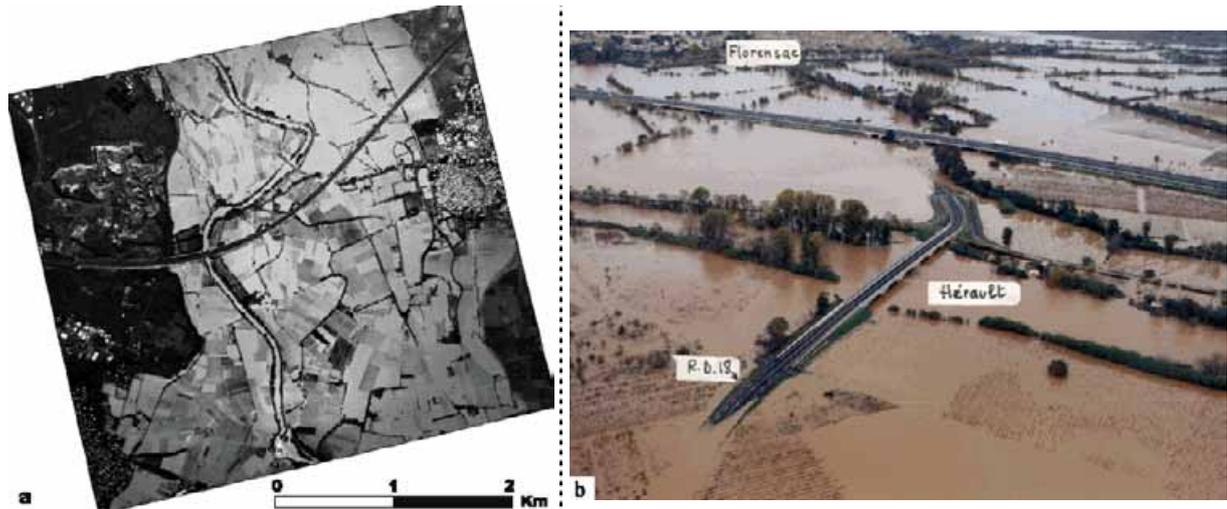


Figure 5-5 : exemple de cliché vertical (a) et oblique (b) disponible sur l'Hérault pour la crue de novembre 1994

### 5.1.5. Liste des principales données recueillies sur le site "Hérault"

Outre des informations hydrologiques, les principales données recueillies et utilisées pour ce travail sont recensées dans le Tableau 5-1. Toutes les données cartographiques ont été prétraitées et intégrées dans un système d'information géographique (SIG). L'accès aux photos obliques a été facilité par la création d'un plan vecteur de l'emprise géographique de chaque photo, objet linéaire relié dynamiquement à la photographie concernée.

Sujet	Format d'acquisition	Couverture p/r au site d'étude	Date de réalisation	Créateur
Photos aériennes verticales d'inondation	Photos papier N&B au 1/18000	Totale	06/11/1994 à 13H00	Focalis pour CG34
Photos aériennes obliques d'inondation	Photos papier couleur	Totale	05/11/1994 entre 14 et 15H00	DDE34
Carte topographique IGN	Carte papier 1/25000	Totale	Édition de 1990	IGN
Repères de crue	Plan SIG	Ponctuelle	Mise à jour régulière	DDE34
BD TOPO	Plans SIG	Totale	1991	IGN CG34
Localisation des digues	Plan SIG	Totale	1997	SIEE/ Strategis pour CG34
Orthophotoplan couleur (hors inondation)	Plan raster SIG (pixel à 1 m)	Totale	12/04/1995	DDE34
Topographie_1995 (semis de points cotés + structures linéaires)	Plan SIG	Totale	Photogrammétrie basée sur clichés au 1/18000 du 12/04/1995	S.C.P. RICHER-LAURENT pour DDE34
Topographie_1985 (semis de points cotés)	Plan SIG	Partielle	Photogrammétrie basée sur clichés pris en 1985 (échelle ?)	?

Tableau 5-1 : liste des principales données recueillies sur le site "Hérault"

## 5.2. Site 2 : la Moselle

### 5.2.1. Caractéristiques du bassin versant

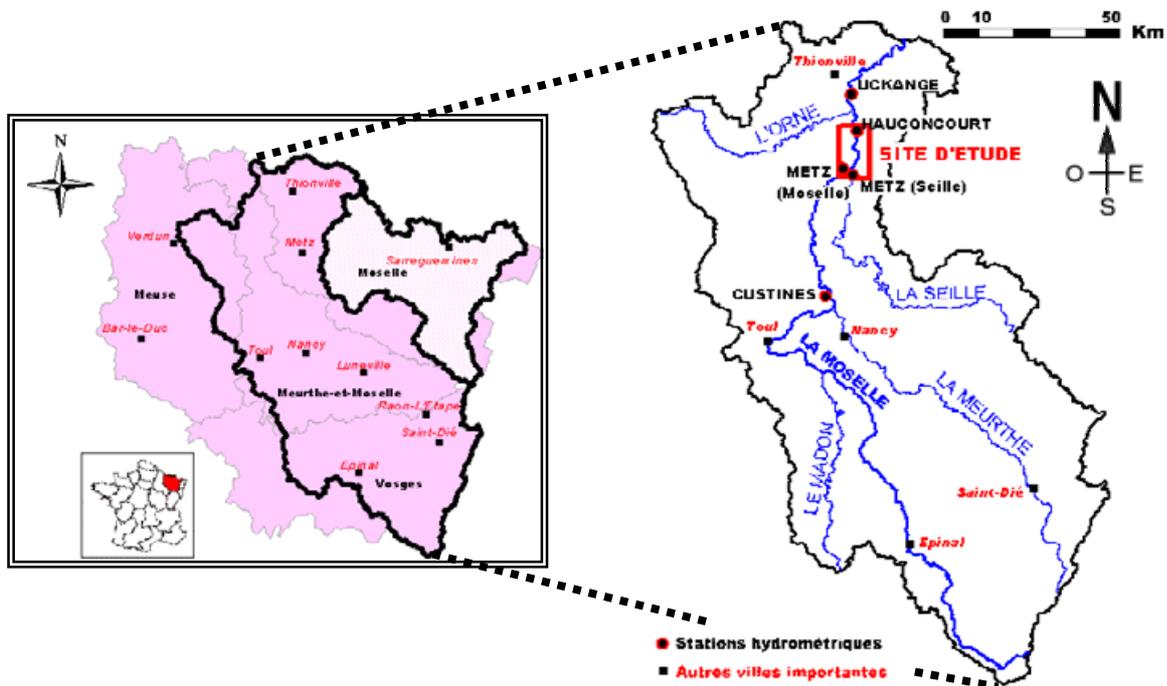


Figure 5-6 : bassin versant français de la Moselle, site d'étude et stations hydrométriques

#### 5.2.1.1. Contexte géographique

La Moselle prend sa source en France au Col de Bussang à 735 m d'altitude dans les montagnes vosgiennes, puis traverse le Luxembourg et l'Allemagne où elle se jette dans le Rhin à Coblenche après avoir parcouru environ 550 km et drainée plus de 28200 km<sup>2</sup>. A l'amont, elle traverse le massif des Vosges, cristallin ou sédimentaire ancien (principalement, schistes primaires et permien) puis gréseux où elle est établie en fond de vallées profondes. Elle présente alors sur une quarantaine de kilomètres un caractère torrentueux avec de forte pente (0,4 à 0,9 %). Autour d'Épinal, sa pente se stabilise à 0,2 %. La Moselle rencontre alors le plateau lorrain constitué essentiellement de calcaires et de marnes, et commence à divaguer naturellement dans un vaste lit majeur, formant bras morts et étangs. Sa pente moyenne passe alors à 0,075 % en amont de Metz et à 0,033 % en aval. Elle rejoint alors le massif schisteux rhénan en reprenant un lit encaissé et sinueux aux pentes abruptes, avant de couler dans une vallée plus large jusqu'au Rhin. La forêt couvre près de 35 % du bassin versant et est majoritaire dans les massifs vosgiens et ardennais. Les plateaux et les zones montagneuses sont voués majoritairement à l'élevage, les vallées aux céréales (culture de printemps), plantes sarclées et à l'élevage. En France, la Moselle draine environ 11500 km<sup>2</sup>, traverse les départements des Vosges, de la Meurthe-et-Moselle et de la Moselle atteignant ainsi un linéaire de plus de 310 km (*cf.*, Figure 5-6). Ses principaux affluents sont la Meurthe et la Seille en rive droite ; le Madon et l'Orne en rive gauche.

#### 5.2.1.2. Contexte climatologique et hydrologique

Le climat est de type continental avec des étés chauds et des hivers précoces et rudes. La pluie annuelle sur la partie Vosgienne (culminant à 1300 m) varie entre 1000 à 2500 mm suivant l'altitude et l'orientation des versants. Les perturbations viennent principalement d'ouest, et peuvent se traduire par de fortes chutes de neige en hiver. Sur le plateau lorrain, constitué de plaines et de collines culminant

entre 300 et 400 m, les précipitations annuelles varient de 700 à 800 mm, avec une distribution mensuelle peu contrastée. Les précipitations journalières sont "normales" pour le nord de la France, leur valeur décennale ne dépassant 50-60 mm que dans le haut massif des Vosges [SOGREAH., 2000].

Malgré l'artificialisation du milieu, la Moselle connaît une variabilité de débits avec des crues en hiver et des étiages en été. Les crues exceptionnelles présentent soit une pointe de crue simple, soit des pointes de crue multiples mais bien dissociées. Elles apparaissent principalement de décembre à mars suite à une série de perturbations océaniques dans des flux d'ouest à sud-ouest, ou d'Avril à Mai en période de fin de hautes eaux suite à des flux de Sud-Ouest ou à un retour d'Est [SOGREAH., 2000]. Parmi les crues importantes de ce siècle, on peut citer : décembre 1919, 1947 (crue du siècle en Lorraine) et 1982, février 1990, avril et mai 1983. A Hauconcourt, une étude hydrologique récente [SOGREAH., 2000] donne un débit centennal compris entre 2200 à 2460 m<sup>3</sup>/s, un débit décennal de 1580 m<sup>3</sup>/s et un débit bi-annuel de 960 m<sup>3</sup>/s.

### 5.2.1.3. Aménagements du bassin et réseau de mesures en hauteur/débit

La Moselle est canalisée pour permettre un trafic fluvial de haute capacité de Neuves-Maisons, près de Nancy jusqu'à Coblence mais les débordements restent cependant possibles. De nombreux ouvrages linéaires situés dans la plaine forment alors des obstacles qui viennent limiter la libre expansion des eaux. Des extractions importantes de graviers ont également déstabilisé certains tronçons de rivière.

Les stations hydrométriques d'intérêt pour le site d'étude (cf., Figure 5-6) sont situées sur la Moselle à Custines (6829 km<sup>2</sup>), Metz (7886 km<sup>2</sup>), Hauconcourt (9400 km<sup>2</sup>) et Uckange (10770 km<sup>2</sup>) ; et sur la Seille à Metz (1269 km<sup>2</sup>).

## 5.2.2. Caractéristiques du site d'étude "Moselle"

La zone d'étude représente un linéaire de rivière avoisinant 13 km (cf., Figure 5-7) commençant dans Metz jusqu'à l'aval de la commune de Hauconcourt. Secteur à la fois urbain et rural, le champ d'expansion des eaux dépasse par endroit 2 km de large. Cependant des zones de stockage (*i.e.*, vitesse quasiment nulle) constituées en grande partie de plans d'eau permanents (anciennes gravières) apparaissent sur chaque rive au cours des crues. Ainsi seul le couloir central de l'inondation participe réellement au transfert.

À l'amont du site d'étude, la Moselle reçoit la Seille ; affluent drainant environ 1300 km<sup>2</sup>, dont les crues sont fréquemment décalées avec celles de la Moselle.

La pente moyenne longitudinale est de l'ordre de 0,45 ‰. La prairie et les cultures de printemps occupent les zones hors eau non urbanisées.

Enfin le secteur est très artificialisé avec un canal de dérivation pour la navigation, un port industriel à la sortie de Metz et une usine hydroélectrique à l'amont du village d'Argancy

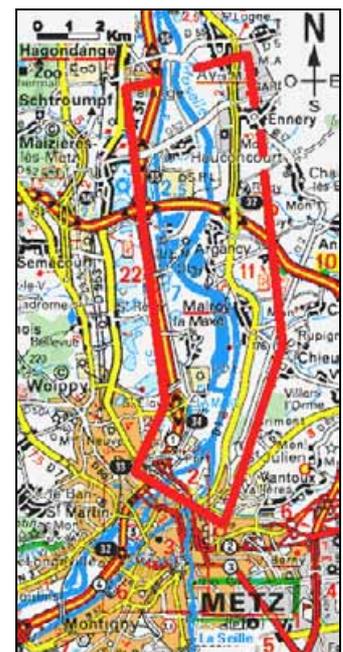


Figure 5-7 : délimitation du site d'étude "Moselle"

### 5.2.3. Crues étudiées : décembre 1982 et mai 1983

Les caractéristiques principales des deux crues étudiées sont recensées dans le Tableau 5-2. Ces informations ont en grande partie été extraites de [SOGREAH., 2000].

Caractéristiques des crues	Décembre 1982 (cf., Figure 5-8 a)	Mai 05/1983 (cf., Figure 5-8 b)
Origine	<i>Pluviale uniquement</i>	<i>Pluviale uniquement</i>
Pluie	<i>2,2 fois la normale</i>	<i>3 fois la normale, bien répartie</i>
Durée	<i>Environ une semaine</i>	<i>Environ une semaine</i>
Type de propagation Temps entre Toul et Hauconcourt	<i>Lente avec double pic 29 h</i>	<i>Lente avec pic simple 32 h</i>
Débit et date de pointe à Metz Période de retour estimé	<i>1380 m<sup>3</sup>/s le 19/12 à 7 h 10 ans</i>	<i>1640 m<sup>3</sup>/s le 28/05 à 1 h 20 ans</i>
Débit et date de pointe à Hauconcourt	<i>1580 m<sup>3</sup>/s le 19/12 à 8H00</i>	<i>1990 m<sup>3</sup>/s le 28/05 à 3 h</i>

Tableau 5-2 : principales caractéristiques des deux crues étudiées sur le site "Moselle"

### 5.2.4. Clichés photographiques disponibles pour les crues

Pour chaque crue importante, l'équipe du Service de la Navigation du Nord-Est (SNNE, Nancy) essaie de lancer une campagne photographique sur la Moselle, démarche intéressante dans le but de traiter deux crues différentes sur un même site. Les deux vols qui intéressent ce travail ont été réalisés à bord d'un avion léger et ont débouché sur des clichés couleur fortement obliques.

Pour la crue de décembre 1982, 15 clichés provenant d'un seul passage rive droite le 19 décembre vers midi, soit au maximum de la crue sur le site d'étude, sont disponibles (cf., Figure 5-8). La prise systématique des clichés jointifs permet une vision de la majeure partie de la zone inondée, la rive droite ayant malheureusement parfois été délaissée.

Pour la crue de mai 1983, le jeu de photos constitué de 34 clichés résulte de trois vols successifs ce qui explique quelques hétérogénéités d'angle et d'azimut de prise de vue, de niveau de zoom. En conséquence, certaines zones sont non représentées alors que d'autres le sont sous plusieurs angles de vue. Par contre, comme ces trois vols ont été réalisés dans la même journée du 28/05/83 entre 9H00 et 15H00, ce jeu sera supposé traduire le même état hydrologique (dynamique assez lente de la crue), soit l'amorce de décrue pour le site d'étude (cf., Figure 5-8).

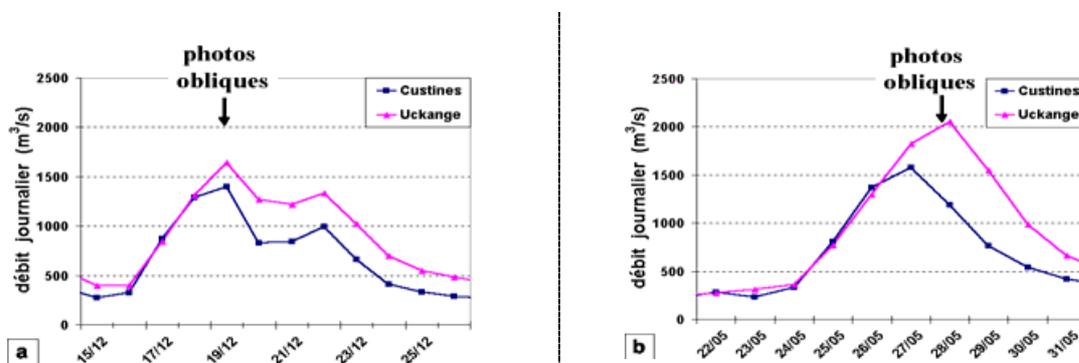


Figure 5-8 : débits journaliers (Moselle) pour les crues de (a) décembre 1982, (b) mai 1983

Un exemple de photographie de chaque date est donné en Figure 5-9.



**a. crue de décembre 1982**



**b. crue de mai 1983**

*Figure 5-9 : exemples de clichés obliques disponibles sur la Moselle*

### 5.2.5. Liste des principales données recueillies sur le site "Moselle"

Outre des informations hydrologiques, les principales données recueillies et utilisées pour ce travail sont recensées dans le Tableau 5-3. Toutes les données cartographiques ont été prétraitées et intégrées dans un système d'information géographique (SIG).

Pour chaque crue, l'accès aux photos obliques a également été facilité par la création d'un plan vecteur de l'emprise géographique de chaque photo, objet linéaire relié dynamiquement à la photo concernée.

Sujet	Format d'acquisition	Couverture p/r au site d'étude	Date de réalisation	Créateur
Photos aériennes obliques inondation décembre 82	Photos papier couleur	Quasi-totale	19/12/1982 vers 12 h	SNNE Nancy
Photos aériennes obliques inondation mai 83	Photos papier couleur	Quasi-totale	28/05/1983 entre 09 et 15 h	Cabinet Schmidt pour SNNE Nancy
Orthophotoplan noir et blanc (hors inondation)	Plan raster SIG (pixel à 2m)	Totale	1999	pour SNNE Nancy
Cartes topographiques IGN	Carte papier 1/25000	Totale	Révisées en 1988	IGN
Semis de points cotés + polygones 3D	Plan SIG	Totale	Photogrammétrie basée sur clichés pris en 1999	? pour SNNE Nancy
Laisses de crue	Fichier (X,Y,Z)	Ponctuelle	Actualisées à chaque crue	? pour SNNE Nancy

*Tableau 5-3 : liste des principales données recueillies sur le site "Moselle"*

### 5.3. Site 3 : l'Aisne

#### 5.3.1. Caractéristiques du bassin versant

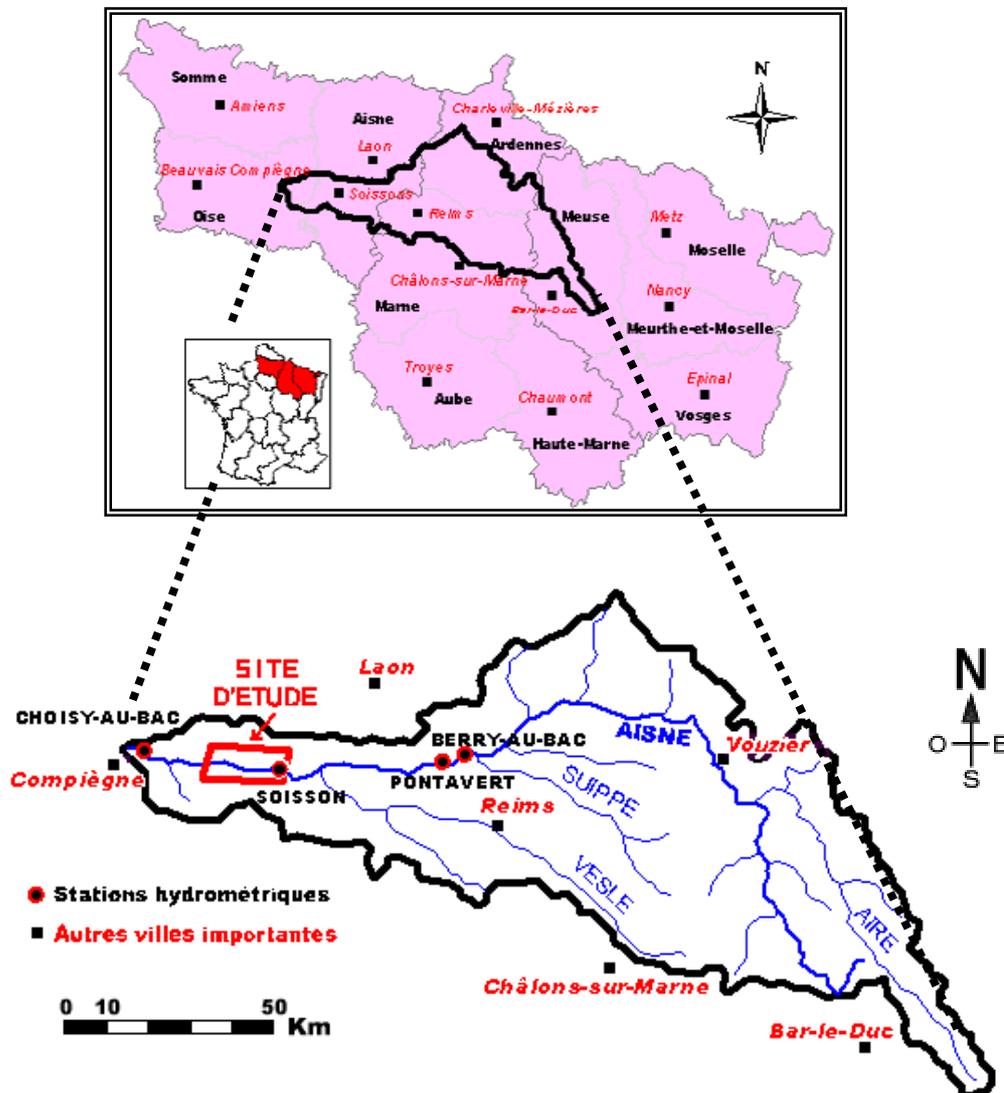


Figure 5-10 : bassin versant de l'Aisne, site d'étude et stations hydrométriques

##### 5.3.1.1. Contexte géographique

L'Aisne parcourt une distance de 375 km et traverse cinq départements (*i.e.*, la Meuse, la Marne, les Ardennes, l'Aisne et l'Oise) depuis sa source en Argonne (à une altitude de 283 m dans une zone plutôt imperméable de schistes et d'argiles) jusqu'à sa confluence avec l'Oise en amont de la ville de Compiègne (*cf.*, Figure 5-10). Son bassin couvre une surface proche de 8000 km<sup>2</sup>. Dans sa partie aval, elle présente de nombreux méandres et de nombreux plans d'eau bordent son tracé.

Le fond de vallée de la plaine alluviale de l'Aisne présente en général une largeur variable de 500 m à 2 km alors que la largeur de la rivière varie de 50 à 100 m. Les coteaux avoisinants dominent la vallée de 20 à 45 m. La pente moyenne du cours d'eau est de l'ordre de 1 ‰. Elle reçoit de nombreux affluents dont les principaux sont la Suipe et la Vesle en rive gauche ; l'Aire en rive droite.

L'occupation du sol dominante est formée de cultures de printemps et d'été dans la vallée, de zones boisées sur les versants. L'essentiel de l'activité industrielle et commerciale est concentrée dans les agglomérations de plus de 10 000 habitants situées dans les grandes vallées (e.g., Soissons).

### 5.3.1.2. *Contexte climatologique et hydrologique*

Le climat qui régit le bassin versant de l'Aisne est un climat de transition entre le climat breton et le climat lorrain. Le climat breton se caractérise par des pluies de front d'ouest, des hivers doux où l'on enregistre le maximum des précipitations et des étés tempérés par la masse océanique. Le climat lorrain se définit par une assez bonne répartition de ces pluies tout au long de l'année, pluie venant également du front de l'ouest et, une amplitude thermique plus contrastée. Cependant, dans le climat lorrain, la hausse des températures s'accompagne d'une hausse des précipitations. Les pluies sont donc de faible intensité, et par conséquent les crues sont le résultat de longues périodes pluvieuses.

L'examen des crues historiques sur l'Aisne et l'Oise fait apparaître trois types de crues: celles dues aux orages de printemps ou d'été, celles consécutives à de longs épisodes pluvieux d'hiver doux (les plus fréquentes), enfin celles résultant du dégel et de la fonte des neiges (Rapport Dunglas<sup>21</sup>). La faible pente et la forme allongée du bassin versant expliquent la propagation lente des crues (3 à 4 jours entre Vouziers et le confluent) et la forme plutôt aplatie des limnigrammes (cf., Figure 5-13).

### 5.3.1.3. *Aménagements du bassin et réseau de mesures en hauteur/débit*

Dans le but de la rendre navigable, l'Aisne a été fortement aménagée. De Vouziers jusqu'à la confluence avec la Vesle, elle a été doublée par un canal latéral appelé "canal des Ardennes". Ailleurs, les bateaux empruntent le lit mineur de la rivière fortement stabilisé par la construction d'écluses situées au droit d'un seuil. Un canal partant de Berry-au-Bac la relie également à la Marne.

Seules les stations hydrométriques intéressantes pour le site d'étude sont ici mentionnées (cf., Figure 5-10) : celles de Berry-au-Bac (5230 km<sup>2</sup>) et de Pontavert (5340 km<sup>2</sup>) en amont, et de Choisy-au-Bac (7940 km<sup>2</sup>) en aval. La ville de Soissons (7350 km<sup>2</sup>) est quant à elle équipée d'une échelle limnimétrique, mais aucune courbe de tarage ne lui est associée. De même les éclusiers relèvent quotidiennement les hauteurs d'eau en amont et en aval des écluses.

## 5.3.2. **Caractéristiques du site d'étude "Aisne"**

La zone d'étude représente un linéaire de rivière avoisinant 14 km (cf., Figure 5-11) commençant à l'aval immédiat de Soissons jusqu'à l'aval de la commune de Vic-sur-Aisne. Sur ce secteur, la largeur du lit majeur est comprise entre 200 m et un kilomètre. La pente moyenne longitudinale est légèrement inférieure à 0,2 ‰ et les cultures de printemps occupent la plus grande surface du site d'étude. Hormis les trois axes routiers de communications traversant la vallée (i.e., pont de Pommiers, Fontenoy et Vic-Sur-Aisne), les obstacles linéaires à l'écoulement sont peu nombreux dans le lit majeur. Enfin le site d'étude comporte trois écluses, associées avec un seuil modulable en dérivation : les écluses de Vauxrot (commune de Cuffies, à l'amont immédiat du site d'étude), de Fontenoy et de Vic-sur-Aisne.

<sup>21</sup> accessible sur <http://www.environnement.gouv.fr/actua/COMINFOS/DOSDIR/Dunglas/dunglas.htm>

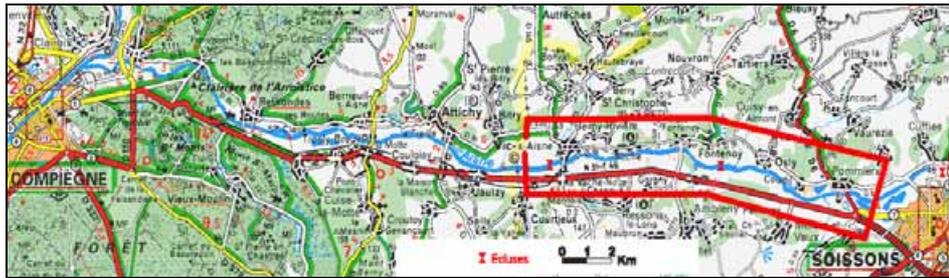


Figure 5-11 : délimitation du site d'étude "Aisne"

### 5.3.3. Crue étudiée : décembre 1993

Cette crue est la conséquence de pluies soutenues pendant tout le mois de décembre. Si un premier pic pluvieux (8, 9, 10 décembre) a eu peu d'effets sur le débit (cf., Figure 5-12), les conséquences des pluies du 18 et 19 décembre sur les débits se font sentir quelques jours après, les sols et la nappe ne pouvant plus emmagasiner d'eau. Ainsi le débit de la rivière a dépassé 450 m<sup>3</sup> dans la nuit du 27 au 28 décembre 1993 à Choisy au Bac. Pour cette crue, la période de retour estimée sur le site d'étude en terme de débit maximal est de l'ordre de 30 à 40 ans.

### 5.3.4. Clichés photographiques disponibles pour la crue

Dans le cadre d'une collaboration avec le Centre d'Études Techniques, Maritimes Et Fluviales (CETMEF) de Compiègne, 27 photographies obliques couleur ont été mises à notre disposition. Ce jeu de photographies a été réalisé le 26 décembre 1993 entre 13h00 et 15h00, soit très près du maximum de crue (cf., Figure 5-13) puisque l'heure observée pour le maximum est le 26/12/93 à 9 h pour Soissons et 18 h pour Fontenoy,

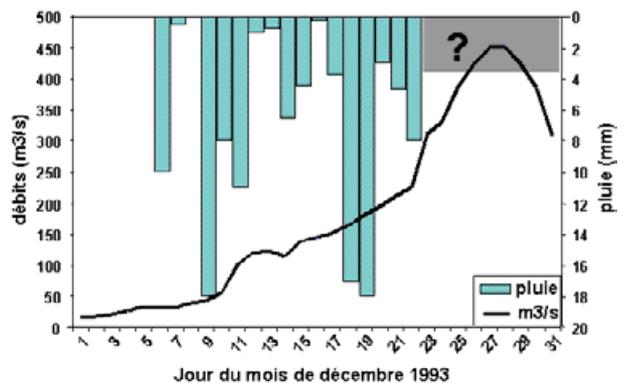


Figure 5-12 : pluviométrie à Soissons et débits à Choisy-au-Bac

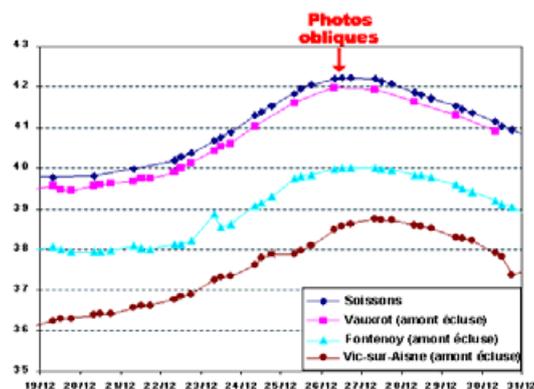


Figure 5-13 : cote NGF (en m) en différents endroits du site d'étude et date des clichés

Ces clichés sont issus d'une mission ULM constitué d'un seul passage réalisé rive gauche et d'aval en amont. Pris à partir d'un appareil photographique classique, la succession des clichés représentent la quasi-totalité de la plaine inondée. Leur caractère oblique très prononcé (écart à la verticale de l'ordre de 45 degrés) confère une vision privilégiée de la rive gauche (cf., Figure 5-14).



Figure 5-14 : exemples de clichés obliques disponibles sur l'Aisne, crue de décembre 1993

Mentionnons que des photographies verticales noir et blanc au 1/10000 ont été acquises sur l'ensemble de la basse vallée le 31 décembre 1993 entre 12 et 13 h, soit 5 jours après le passage de la pointe de crue. Malgré une dynamique de crue faible, l'eau avait eu le temps de se retirer dans le lit mineur.

### 5.3.5. Liste des principales données recueillies sur le site "Aisne"

Outre des informations hydrologiques, les principales données recueillies et utilisées pour ce travail sont recensées dans le Tableau 5-4. Toutes les données cartographiques ont été prétraitées et intégrées dans un système d'information géographique (SIG). En particulier, 17 photos aériennes verticales hors crue ont été scannées, orthorectifiées (*cf.*, Annexe 4, § A4\_4) et mosaïquées pour être superposables aux autres données recueillies et servir de référentiel cartographique image.

L'accès aux photos obliques a également été facilité par la création d'un plan vecteur de l'emprise géographique de chaque photo, objet linéaire relié dynamiquement à la photo concernée.

Sujet	Format d'acquisition	Couverture p/r au site d'étude	Date de réalisation	Créateur
Photos aériennes obliques inondation décembre 93	Photos papier couleur	Quasi-totale	26/12/1993 entre 13 et 15 h	Cabinet Houdry pour Service Navigation
Photos aériennes verticales post-inondation	Photos papier 1/10000	Totale	31/12/1993 à 13 h	IGN pour Cctmef Compiègne
Carte topographique IGN	Carte papier 1/25000	Totale	-	IGN
Semis de points cotés	Plan SIG	Totale	Photogrammétrie basée sur clichés au 1/ 8000 (date ?)	Cabinet DEPOND pour Cctmef Compiègne
Points cotés issus de levés de terrain (21 profils transversaux)	Plan SIG	-	?	COGERAT pour Cctmef Compiègne

Tableau 5-4 : liste des principales données recueillies sur le site "Aisne"

#### 5.4. Synthèse sur la diversité des trois sites d'étude

Les trois sites retenus pour développer une méthodologie d'analyse de photographies aériennes prises en période d'inondation présentent une certaine diversité, tant du point de vue du contexte morpho-hydro-dynamique que du type de données photographiques disponible. La recherche de cette diversité, synthétisée dans le Tableau 5-5, résulte d'une volonté de construire une méthodologie la moins restrictive possible.

	Site 1 : "Hérault"	Site 2 : "Moselle"	Site 3 : "Aisne"
Morphologie	Très structurée (digues et fossés...)	Moyennement structurée	Peu structurée
Milieu concerné	Rural à péri-urbain	Rural à urbain	Essentiellement rural
Occupation du sol agricole majoritaire pendant la crue étudiée	Vigne	Sol nu ou céréales en début de levée (mai 83)	Sol nu
Nombre de crue étudiée	1	2	1
Type de propagation de crue	Rapide	Lentes	Lente
Forme du pic de crue	Étroite	Aplaties	Aplatie
Type de photos en crue	Verticale (+ oblique)	Obliques	Obliques
Vecteurs de prise de vue	Avion équipé d'une trappe et d'une chambre métrique (+ avion léger)	Avion léger	ULM (Ultra Léger Motorisé)

*Tableau 5-5 : tableau synthétique de la diversité des sites d'étude.*

----- oOo -----



Dessin de M.C. Escher (1961)

# **PARTIE III :**

## **Méthodologie générale d'exploitation des photographies aériennes prises en crue**

**Avant-propos**

**Chapitre 6 : Extraction des informations de Télédétection**

**Chapitre 7 : Le "flooding problem"**

**Chapitre 8 : Mise en cohérence hydraulique**

## Sommaire de la PARTIE III

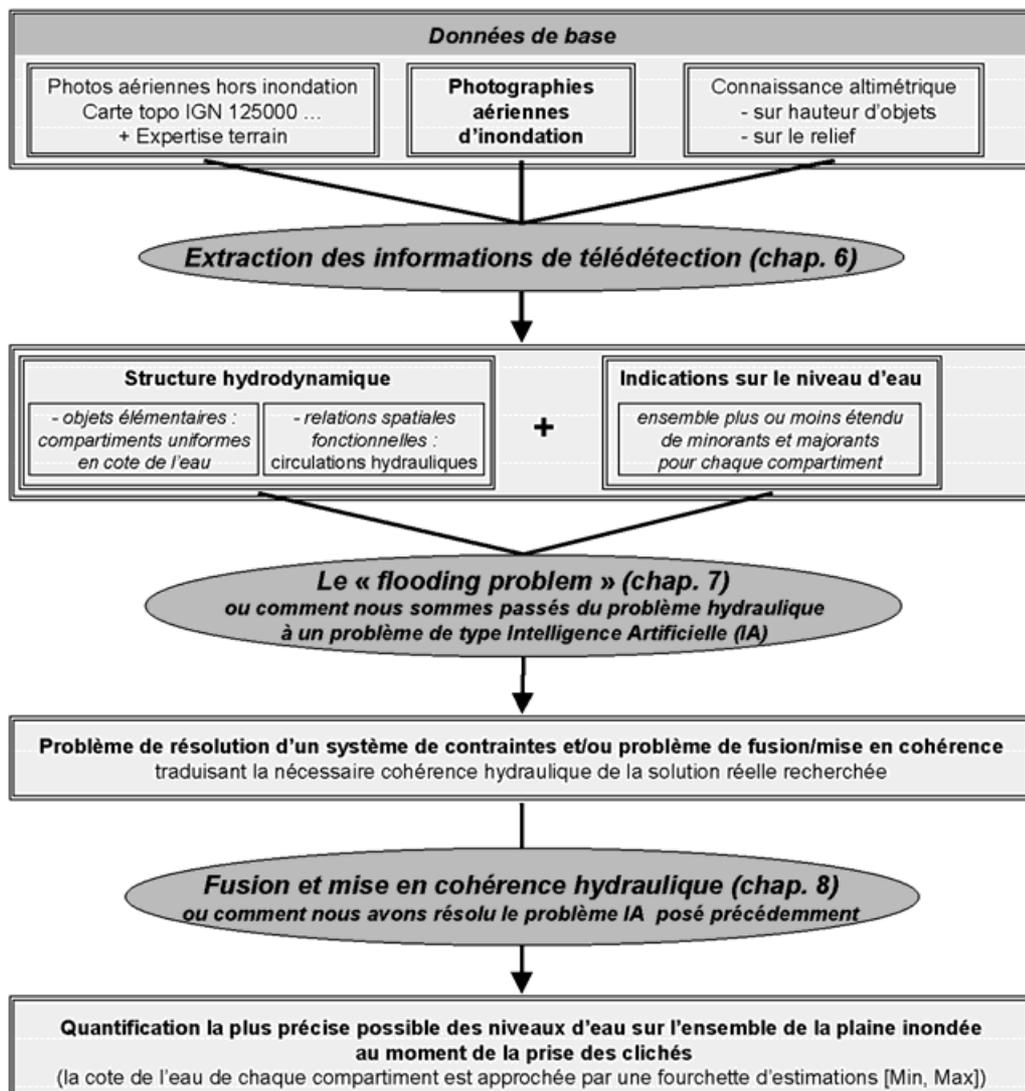
<b>AVANT-PROPOS</b> .....	<b>109</b>
<b>6. EXTRACTION DES INFORMATIONS DE TÉLÉDÉTECTION</b> .....	<b>111</b>
6.1. Introduction .....	111
6.2. Phase préalable : une référence géométrique appropriée .....	111
6.3. Phase 1 : définition d'une structure hydrodynamique .....	112
6.4. Phase 2 : informations altimétriques sur le toit de l'eau .....	116
6.5. Synthèse et formalisation de cette première étape .....	120
6.6. Premières estimations de la cote de l'eau et perspectives .....	122
<b>7. LE "FLOODING PROBLEM"</b> .....	<b>123</b>
7.1. Introduction .....	123
7.2. Base de la méthode .....	123
7.3. Des implications hydrauliques au système de contraintes .....	124
7.4. Réflexions sur la résolution du CSP .....	128
7.5. Discussion sur la validité de la démarche .....	130
7.6. Conclusion sur le flooding problem .....	131
<b>8. MISE EN COHÉRENCE HYDRAULIQUE</b> .....	<b>133</b>
8.1. Introduction .....	133
8.2. Illustration de la démarche .....	133
8.3. Réflexions sur la résolution du problème de mise en cohérence .....	134
8.4. Démarche générale retenue .....	136
8.5. choix retenus dans l'étape de gestion des conflits .....	138
8.6. stratégie de mise en cohérence hydraulique .....	140
8.7. Algorithme général proposé pour la résolution du CSP .....	147
8.8. Conclusion .....	149

# Avant-propos

Rappelons que l'objectif de la méthode est de caractériser l'état de remplissage d'une plaine d'inondation à partir de photographies aériennes prises pendant la crue. Cette caractérisation passe par la quantification numérique des niveaux d'eau sur l'ensemble du champ d'inondation au moment de la prise des clichés aériens, la composante spatiale étant privilégiée sur la composante temporelle.

Pour présenter un intérêt hydraulique, cette caractérisation doit être aussi précise que possible autour des valeurs réelles, la précision souhaitée étant de l'ordre de un à deux décimètres [Puech et Raclot, 2002].

Pour des questions de clarté de l'exposé, la méthodologie générale retenue (*cf.*, § 4.4) est décomposée en trois chapitres comme l'illustre l'organigramme suivant :



Puis Validation - Étude de sensibilité  
Complémentarité avec les approches existantes ...

## ORGANIGRAMME GÉNÉRAL DE LA MÉTHODE



## 6. Extraction des informations de Télédétection

### 6.1. Introduction

Cette première grande étape de la méthode consiste à extraire de nombreuses informations contenues dans les images de télédétection et à les structurer au sein d'un environnement SIG avec d'autres données de type "base de données environnementales". Le SIG va également faciliter l'exploitation des images de télédétection en permettant de replacer les photographies dans un contexte général de connaissance favorable à leur interprétation (*e.g.*, la superposition des photographies avec une carte IGN 1/25000 facilite grandement leur interprétation).

Les données que l'on cherche à rassembler sont entièrement guidées par l'objectif thématique qui est la connaissance de la crue au moment de la prise des clichés. Il s'agit tout d'abord de définir une **structure hydrodynamique** appropriée, *i.e.*, des objets d'intérêt et des relations fonctionnelles entre ces objets. La définition de cette structure est très importante car elle est la base du schéma général pour valoriser conjointement l'ensemble des informations acquises sur la crue. Il s'agit ensuite d'extraire le maximum **d'informations concernant le niveau de l'eau atteint**, même si ces informations ne sont que des estimations imparfaites (imprécises et/ou incertaines et/ou incomplètes).

Pour accéder à ces deux ensembles, il est proposé de rassembler des données concernant :

1. *les structures linéaires pouvant jouer un rôle actif pendant une crue ;*
2. *les limites d'inondation et les circulations hydrauliques ;*
3. *les informations de hauteur ou de cote du toit de l'eau.*

Après une phase préliminaire visant à régler des questions de référentiel géométrique, les données des points 1 et 2 permettent d'accéder à la définition d'une **structure hydrodynamique** appropriée pour l'étude de la crue au moment de la prise des clichés (*cf.*, phase 1). Les données du point 3 fournissent quant à elles un premier **lot d'estimations brutes et grossières (*i.e.*, imprécises) de la hauteur d'eau et/ou de la cote de l'eau en de multiples points de la plaine** (*cf.*, phase 2).

### 6.2. Phase préalable : une référence géométrique appropriée

La spécificité des SIG par rapport au système de gestion de bases de données classiques repose sur la gestion de la localisation des informations dans l'espace planimétrique X, Y voire dans l'espace tridimensionnel X, Y et Z. Ceci sous-entend que toute structuration de données au sein d'un SIG requiert une phase importante de pré-traitement géométrique des données afin que toutes les informations soient superposables dans un référentiel cartographique commun. L'absence d'une bonne localisation pénalise les possibilités de superposition et donc tous les bénéfices que l'on peut tirer d'un SIG (*e.g.*, analyse croisée de données entre deux plans d'informations). C'est pourquoi la précision de la localisation des objets est une composante importante de la qualité des données spatiales.

Seuls les problèmes liés au positionnement X, Y des informations extraites des photographies aériennes sont abordés ci-après.

Ont été exploitées, dans ce travail, des photographies aériennes en crue (cf., § 5 et A4\_2) :

1. **verticales**, prises à partir d'avions équipés d'une chambre métrique ;
2. **obliques**, prises à partir d'avions légers ou d'ULM avec un appareil traditionnel.

### 6.2.1. Photographies verticales

Pour les photographies aériennes verticales prises à partir d'une chambre métrique, le pré-traitement géométrique retenu pour repositionner l'image dans le référentiel cartographique choisi est la procédure d'orthorectification (cf., A4\_4). Si le tableau Tab. A4\_1 donne une idée de la qualité du positionnement théoriquement accessible par un professionnel de la photogrammétrie, l'expérience montre que les précisions planimétriques effectivement obtenues sont plutôt de l'ordre de 1 à 5 m dans les zones de plaine qui ont un relief peu marqué. Les interprétations sont alors immédiatement localisées avec cette gamme de précision.

### 6.2.2. Photographies obliques

Dans le cas de photographies obliques, la procédure de rectification géométrique est beaucoup plus délicate et laborieuse<sup>22</sup>, les déformations étant plus importantes, plus hétérogènes et moins bien contrôlées (e.g., conditions de prises de vue mal maîtrisées, appareillage moins performant, échelle non-homogène, forte distorsions dues au relief). C'est pourquoi un simple report des informations photo-interprétées sur un référentiel cartographique commun a été retenu. Si les cartes IGN numériques au 1/25000 offrent une solution intéressante pour ce référentiel (la base de données Scan25® de l'IGN étant disponible sur l'ensemble du territoire), un fond de plan formé par des photographies verticales (prises hors inondation) orthorectifiées est préférable. Le report géométrique des informations extraites des photographies aériennes obliques en crue (e.g., limites d'inondation) sur un tel référentiel est en effet énormément facilité et amélioré du fait de la similarité du contenu sémantique. Pour cela la date de prise de vue du jeu de photographies verticales doit être la plus proche possible de celle de l'événement de crue étudié. Si le milieu n'a pas trop évolué, la couverture nationale d'orthophotographies numériques couleur à résolution de 50 cm (i.e., BD ORTHO®) en cours de réalisation par l'IGN peut constituer une source intéressante. En plus des orthophotographies numériques, il est conseillé d'utiliser le format analogique (i.e., papier ou mieux positif) qui permet une vision du relief par stéréoscopie très utile pour l'identification des structures linéaires importantes en hydraulique (cf., phase 1 ci-dessous).

## 6.3. Phase 1 : définition d'une structure hydrodynamique

### 6.3.1. Objectif et méthode générale

L'objectif de cette première phase est d'extraire, par une analyse morfo-dynamique de la plaine d'inondation, une structure de modèle adéquate avec le fonctionnement hydrodynamique de la crue au moment de la prise des photographies aériennes. La "**structure hydrodynamique**" s'entend comme :

---

<sup>22</sup> Un module de calcul de transformation géométrique adapté aux photographies obliques est en cours de développement à l'UMR3S sur le logiciel Arc-Info 8.2. Il devrait apporter une aide et un confort non négligeable pour la localisation, sur un référentiel cartographique, des informations extraites des photographies obliques. La procédure, en fin d'implémentation, permet d'élaborer le système de passage entre le référentiel oblique et le référentiel cartographique, la digitalisation directe sur la photographie oblique est alors automatiquement transformée dans le référentiel cartographique.

- une partition de la plaine en entités surfaciques (appelées **compartiments**) à l'intérieur desquelles la cote de l'eau peut être considérée comme constante, à la précision attendue près. Ce sont les **objets élémentaires d'intérêt** pour la connaissance de la cote de l'eau, établis sur **un critère de cote uniforme**.
- une description des **circulations hydrauliques** entre compartiments au moment de la prise des clichés en crue. Ces circulations forment les **relations spatiales fonctionnelles**, véritable "topologie" du modèle spatial de fonctionnement.

Le schéma général pour définir une structure hydrodynamique appropriée au moment de la prise de vue aérienne est explicité en Figure 6-1.

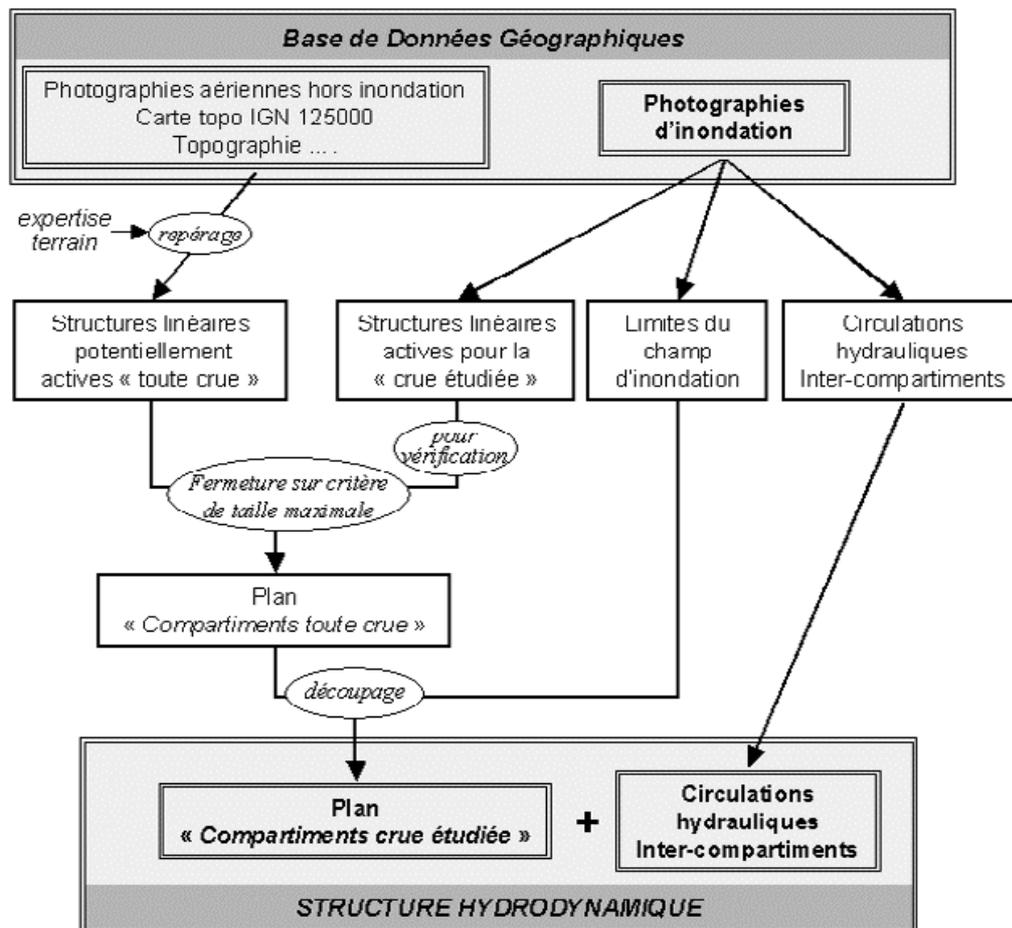


Figure 6-1 : schéma général de définition d'une structure hydrodynamique appropriée à l'étude du fonctionnement de la crue au moment de prise de vue des clichés aériens

### 6.3.2. Constitution des compartiments

Le compartiment est une entité surfacique dont la signification est guidée par la thématique hydraulique : le compartiment doit respecter le **critère de cote uniforme**, *i.e.*, la cote de l'eau peut y être supposée uniforme à la précision recherchée près. Dans chaque compartiment, le niveau de l'eau est donc considéré horizontal et constant. Le concept de compartiment est donc très proche du concept de casier utilisé par les hydrauliciens (*cf.*, § 1.2.5.2.3).

La construction d'un tel découpage sur la plaine est intéressante car il suffit alors d'estimer une unique cote de l'eau dans chaque compartiment pour caractériser les niveaux d'eau sur la totalité de la plaine.

### 6.3.2.1. Repérage de l'ensemble des structures linéaires

Des différentes informations hors crue à disposition (photographies hors inondation valorisées par interprétation et/ou stéréoscopie, carte IGN 1/25000, topographie, visite terrain ...) on extrait l'ensemble des structures linéaires pouvant jouer un rôle hydraulique important au cours des crues (quelle que soit l'intensité de la crue), *i.e.*, susceptibles de créer localement une différence de cote supérieure à la précision recherchée. Les structures linéaires les plus répandues sont :

- les obstacles topographiques (*e.g.*, digues, fossés, bâtiments, murs) ;
- les obstacles pouvant créer un frein hydraulique (pertes de charge) (*e.g.*, haies denses).

Ce plan d'information des structures linéaires est avantageusement constitué sur l'ensemble du lit majeur sans référence à la crue étudiée. Ainsi élaboré sous SIG pour couvrir toutes la gamme des intensités possibles de crue, il est directement réutilisable pour l'étude d'autres crues. Seul un travail de mise à jour est alors nécessaire pour prendre en compte les changements survenus sur la plaine.

Il est important de noter que la richesse des photographies aériennes hors inondation, et de certaines bases de données environnementales (*e.g.*, la BD TOPO® de l'IGN), permet de limiter fortement le travail d'investigation de terrain. Ce dernier se restreint alors essentiellement à un travail de vérification et éventuellement de mise à jour.

À ce stade, il peut être utile de vérifier que chaque structure linéaire réellement active pour la crue étudiée (identifiable sur les photographies aériennes en crue) appartient à ce recensement.

### 6.3.2.2. Fermeture des entités linéaires en compartiments

La définition du plan de compartiments, *i.e.*, des entités surfaciques pouvant être caractérisées par une seule cote du toit de l'eau, va s'appuyer sur l'ensemble des structures linéaires repérées précédemment. Afin d'assurer au mieux le respect du **critère de cote uniforme**, la taille des compartiments est limitée de telle façon que la dénivelée  $\Delta z$  de la cote de l'eau entre l'amont et l'aval du compartiment soit inférieure à la précision  $p$  recherchée sur les cotes de l'eau. Pour calculer la taille maximale  $t_{max}$  des compartiments, la pente du toit de l'eau est approchée par la pente longitudinale moyenne de la vallée  $i$ , ce qui conduit au **critère de taille maximale suivant** :

<b>critère de taille maximale</b>	$\Delta z < p$ , soit $t_{max} < p / i$	<b>Eq. 6-1</b>
-----------------------------------	-----------------------------------------	----------------

Cette taille limite, calculée sur la dimension longitudinale de la plaine, est également utilisée sur la dimension transversale et conduit au rajout de "limites de fermeture".

*Exemple : pour une précision  $p$  de 10 cm, et une pente  $i$  de 2/10000, la taille maximale  $t_{max}$  des compartiments a été estimée à 500 m.*

Les "limites de fermeture" s'appuient, autant que possible, sur des limites naturelles (route, limite de champ ...). La nature de chaque interface entre compartiments (*e.g.*, digues, haies, fossés...) est conservée car elle va constituer une aide importante pour la caractérisation des circulations hydrauliques inter-compartiments (*e.g.*, blocage, frein, déversement).

Un plan SIG d'objets surfaciques (*i.e.*, topologie polygonale) représentant les compartiments utilisables quelque soit la crue, appelé plan "*Compartiments toute crue*", est ainsi créé.

### 6.3.2.3. Passage au plan "Compartiments crue étudiée"

Les compartiments actifs (*i.e.*, effectivement inondés) dépendent de la crue étudiée. Ils sont donc déterminés à partir des photographies de chaque crue.

La voie pour les obtenir consiste à extraire, le plus précisément possible, les limites droite et gauche du champ d'inondation. Le croisement de ces limites avec le plan "Compartiments toute crue" permet, sous SIG, d'extraire un nouveau plan d'information "Compartiments crue étudiée", représentant l'ensemble, noté  $\{C\}$ , des  $N_c$  compartiments actifs.

### 6.3.3. Caractérisation des circulations hydrauliques

Il s'agit ici d'établir, entre chaque couple de compartiments contigus, la nature de la circulation hydraulique au moment de la prise de vue des photographies en crue. L'idée est de différencier, autant que possible, les circulations ayant un comportement hydraulique tranché :

- **flux** : connexion hydraulique visible avec sens d'écoulement déterminé (symbolisé par  $\rightarrow$ ) ;
- **équilibre** : connexion hydraulique visible sans écoulement apparent (symbolisée par  $\leftrightarrow$ );
- **indéterminé** : pas de connexion hydraulique ou connexion hydraulique indéterminée (*e.g.*, interface masquée sur les photographies par de la végétation).

Comme, de plus, l'information interprétée sur photographie en crue est de nature qualitative, la seule différenciation entre **flux**, qui indique un sens d'écoulement de l'eau et donc une décroissance du niveau de l'eau, et **équilibre**, qui indique un niveau quasiment identique, paraît un bon compromis.

Leur identification s'appuie avant tout sur les photographies aériennes en crue qui permettent d'interpréter l'existence ou non :

- de connexions hydrauliques entre compartiments ;
- de panaches de turbidité et zones de remous, indicateurs nets d'un écoulement et de son orientation.

Ce travail d'identification est consolidé par la connaissance de la nature des interfaces entre compartiments, ainsi que par la valorisation d'informations externes sur la crue (*e.g.*, ruptures de digues relevées après une crue sur le terrain). Le positionnement des prises de vue par rapport à la dynamique générale de la crue (*i.e.*, montée des eaux, stabilisation ou récession) permet également de conforter, voire de compléter, certaines interprétations par recours au "bon sens".

L'ensemble de ces éléments permet de constituer le schéma général d'écoulement des eaux sur la plaine ; *i.e.*, la nature des échanges hydrauliques noté  $\{H\}$  entre compartiments contigus.

Notons que la différenciation entre flux et équilibre est parfois délicate, surtout en cas d'inondation lente en milieu peu structuré car les déversements et les panaches de turbidité sont alors peu présents. Dans ce cas cependant, le schéma général d'écoulement des eaux est plus simple : s'il y a connexion hydraulique, on peut privilégier l'affectation de flux de l'amont vers l'aval, et l'affectation d'équilibres dans la dimension transversale.

## 6.4. Phase 2 : informations altimétriques sur le toit de l'eau

### 6.4.1. Objectif

Une fois définie la structure hydrodynamique de la plaine d'inondation, la seconde phase de télédétection vise à extraire le maximum d'informations internes aux photographies aériennes susceptibles de fournir des **indications de hauteurs de submersion ou de cote du toit de l'eau**. L'idée est d'utiliser toute connaissance altimétrique exogène aux images qui, croisée avec un état de submersion déterminé sur photographie en crue, va fournir une indication sur le niveau d'eau.

L'identification sur photographie en crue du degré de submersion d'**objets internes** au champ d'inondation, dont on connaît la hauteur, donne des indications sur l'épaisseur d'eau, *i.e.*, sur la **hauteur de submersion**. *Pour les besoins ultérieurs, cette hauteur d'eau est transformée en cote du toit de l'eau en faisant appel à une référence altimétrique du terrain naturel.*

L'identification sur photographie en crue de la localisation de **points cotés** (sous l'eau ou hors eau) fournit quant à elle aussi une indication directe de **la cote du toit de l'eau**.

Les informations extraites des images de télédétection étant souvent imprécises et/ou incertaines, les indications sont de type : "le niveau d'eau est **supérieur à, inférieur à ou compris entre**".

Le résultat attendu à l'issue de cette phase est donc, **pour chaque compartiment, une liste plus ou moins importante (éventuellement vide) de minorants et majorants de la cote du toit de l'eau au moment de la prise des clichés.**

### 6.4.2. Méthode

Pour fournir les indications altimétriques sur le toit de l'eau, la valorisation de deux grands types d'informations a été envisagée (*cf.*, Figure 6-2) :

- la **valorisation d'objets plus ou moins émergents** qui fournit **des indications de type minorant/majorant de la hauteur de submersion**. Son principe s'appuie sur l'identification du caractère plus ou moins émergé d'objets internes au champ d'inondation dont on connaît la hauteur (*e.g.*, vigne, maison, clôture, voiture). Un objet de hauteur  $H$ , complètement immergé signifie que la hauteur de submersion à cet endroit est supérieure à  $H$  :  $H$  est un minorant de la hauteur d'eau à l'emplacement de l'objet. Le passage d'une signification locale à une signification sur l'ensemble d'un compartiment de cette information est discuté ci-dessous (*cf.*, § 6.4.2.1).
- la **valorisation de "points cotés"** qui fournit **des indications de type minorant/majorant de la cote du toit de l'eau**. Son principe s'appuie sur le croisement entre le positionnement des limites du champ d'inondation et une base de données topographiques. Un point interne au champ d'inondation fournit un minorant de la cote de l'eau, un point externe un majorant. Le compartiment étant construit pour avoir une cote de l'eau uniforme, ces indications locales peuvent directement être rattachées à l'ensemble du compartiment.

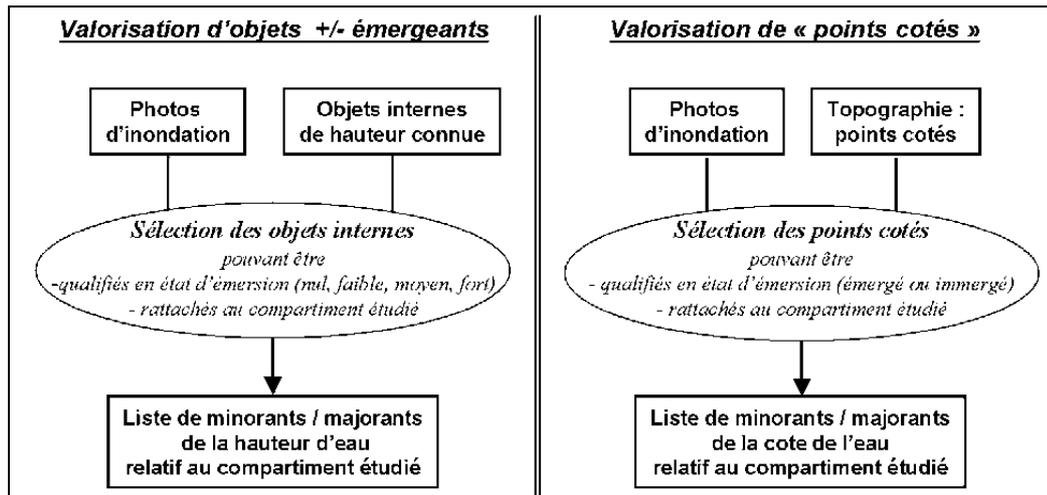


Figure 6-2 : les deux types d'informations valorisés pour extraire des informations altimétriques sur le toit de l'eau

Même si le contexte de chaque étude peut amener à privilégier la valorisation d'un type d'informations plutôt que l'autre, ces deux modes ne sont en rien exclusifs. Ils apparaissent au contraire tout à fait complémentaires puisqu'ils apportent des informations de nature et de source différentes (cf., § 3.2.2.1).

**6.4.2.1. Mode de valorisation des objets plus ou moins émergents**

La **sélection** des objets "informatifs" repose sur les critères suivants : l'objet doit être interne au champ d'inondation ; sa hauteur doit être connue (même de façon imprécise) et de préférence proche de la hauteur de submersion. A ce stade aucune donnée topographique n'est nécessaire.

La **qualification** de l'état d'émergence de l'objet à partir de photographies aériennes en crue peut être plus ou moins fine selon la prise de vue. Elle est typiquement exprimée à travers des ordres de grandeur : nul (*i.e.*, objet immergé), faiblement, moyennement ou fortement émergé.

Le **rattachement** à un compartiment est simple : soit l'objet appartient à un compartiment et l'attribution est évidente ; soit l'objet est à l'interface de 2 compartiments (*e.g.*, cas d'une digue) et son attribution peut se faire à l'un et/ou à l'autre des compartiments, selon la connaissance de la hauteur de l'objet suivant ses différents côtés. Le passage de l'information locale de hauteur d'eau  $H_{loc}$  à une estimation de hauteur d'eau  $H_{comp}$  pour l'ensemble du compartiment est plus délicat. Il est régi par l'équation **Eq. 6-2** :

$H_{comp} = H_{loc} + (Z_{TN}^{loc} - \hat{Z}_{TN}^{comp})$	<b>Eq. 6-2</b>
-------------------------------------------------------------	----------------

Où  $Z_{TN}^{loc}$  est la cote locale du terrain naturel à la base de l'objet considéré  
 $\hat{Z}_{TN}^{comp}$  est la cote moyenne du terrain naturel dans le compartiment

Cette transformation requiert la connaissance d'une topographie locale. Si la cote du terrain naturel à l'intérieur d'un compartiment peut être supposée uniforme, alors l'équation **Eq. 6-2** se simplifie en

$H_{loc} = H_{comp}$	<b>Eq. 6-3</b>
----------------------	----------------

Le **résultat** de la valorisation d'objets plus ou moins émergents est une définition, pour chaque compartiment, **d'un ensemble plus ou moins étendu de minorants et de majorants de la hauteur de submersion.**

Notons toutefois que la valorisation ultérieure (*cf.*, § 8) demande des estimations en cote (et non en hauteur). Une référence altimétrique du terrain naturel est donc nécessaire, permettant au moins d'estimer la cote moyenne du terrain naturel  $Z_{TN}^{loc}$  dans chaque compartiment. **Dans la suite, les indications de hauteurs d'eau sont supposées avoir été traduites en indications de cotes.**

#### 6.4.2.2. Mode de valorisation des points cotés

La **sélection** des points cotés englobe a priori tous les points cotés disponibles sur la plaine d'inondation. Ce sont les contraintes de qualification et de rattachement à un compartiment qui conduisent à restreindre la liste des points cotés "utiles" à l'intérieur de zones dites "informatives". J'appelle **zone informative** tout secteur dont la qualification du terrain naturel en inondé/exondé est possible sans ambiguïté à partir des photographies aériennes en crue (les secteurs masqués par de la végétation en sont exclus par exemple).

La **qualification** de l'état d'immersion (inondé ou exondé) des points cotés à partir de photographies aériennes est immédiate étant donné le mode de sélection des points dans les zones informatives.

Le **rattachement** à un compartiment dépend des cas. Si le point coté est à l'intérieur d'un compartiment (ce point est donc sous l'eau), l'attribution de l'altitude du point coté comme minorant de la cote de l'eau est évidente. Par contre si le point coté est exondé (*i.e.*, hors compartiment), l'attribution de l'altitude comme majorant de la cote du toit de l'eau dans un compartiment doit vérifier un critère de régularité topographique: la pente de la zone émergée doit être constamment positive entre la limite de ce compartiment et la position du point coté. Pour détecter ces changements de pente et éviter de falsifier cette hypothèse, les zones informatives en zone exondée sont systématiquement délimitées par les structures linéaires repérées en § 6.3.2.1 et leur extension est limitée par une distance maximale à la limite d'inondation (*e.g.*, 100 m). La Figure 6-3 illustre le fait que la zone située au-delà d'une structure linéaire n'est pas exploitable.

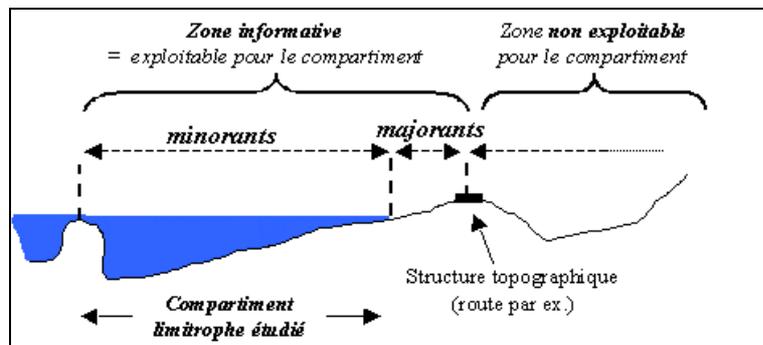


Figure 6-3 : délimitation des zones informatives

L'information, a priori locale, exprimée sous forme de minorant ou majorant de la cote de l'eau peut directement être attribuée au compartiment puisque la cote de l'eau y est supposée uniforme.

Le **résultat** de la valorisation des points cotés est une définition pour chaque compartiment **d'un ensemble**, plus ou moins nombreux, **de minorants et de majorants de la cote du toit de l'eau.**

Cette méthode consistant à repérer les points cotés informatifs et à les discriminer en minorant et majorant a été préférée à l'interpolation généralisée des points cotés, très sensible à l'échantillonnage spatial des points cotés (*i.e.*, granularité exposée en § 2.2.1.2).

### 6.4.2.3. Association d'un degré de préférence

Comme toute donnée extraite d'images de télédétection, les indications de niveaux d'eau présentent intrinsèquement des imperfections dont l'ampleur est directement liée à leur mode d'extraction. Les **imperfections étant difficiles à quantifier**, leur prise en compte est effectuée à travers un unique estimateur global de confiance appelé **degré de préférence**. Défini en classes de fiabilité (*e.g.*, très fiable, moyennement fiable, ...), il doit être interprété en terme d'ordre de grandeur (*cf.*, § 3.4.1.2).

*Pour la valorisation des objets plus ou moins émergents*, la source des différenciations peut être multiple : observations de différentes classes d'objets, précision non homogène de la connaissance altimétrique selon les objets observés (hauteur de l'objet et cote du terrain naturel à sa base) ...

*Pour la valorisation des points cotés*, la différenciation peut s'appuyer sur la qualité altimétrique intrinsèque des points cotés (mais une telle différenciation est rarement connue). La position du point coté par rapport à la limite d'inondation semble quant à elle un critère incontournable puisque la qualification en inondé ou exondé, et donc en minorant ou majorant, en dépend. Pour traiter ce problème, il faut estimer l'imprécision relative entre la limite d'inondation et la position planimétrique du point coté. Sachant que l'imprécision sur le positionnement absolu (*i.e.*, par rapport au référentiel cartographique retenu) des points cotés peut en général être négligée (imprécision très faible inférieure au mètre), seule l'imprécision du positionnement absolu des limites d'inondation peut être prise en compte. Dépendant du contexte local (*e.g.*, position dans la photographie, qualité de discernement de la limite inondée/non inondée, présences d'obstacles ou de repères de localisation), cette estimation  $\epsilon$  va permettre, grâce à une zone tampon ("buffer"), de différencier les points cotés en deux groupes selon qu'ils sont situés ou non dans la zone d'imprécision du positionnement des limites d'inondation. Les points cotés situés dans cette zone d'imprécision se verront accordés une confiance plus faible que les autres. Deux degrés de préférence  $P_1$  et  $P_2$ , avec  $P_1 > P_2$ , sont ainsi constitués. En se déplaçant du centre de la plaine inondée vers les rives, 4 groupes de points informatifs peuvent être distingués (*cf.*, Figure 6-4) :

- points immergés hors zone d'imprécision, soit **minorants  $P_1$  qualifiés de "sûrs"** ;
- points immergés dans la zone d'imprécision, soit **minorants  $P_2$  qualifiés de "moins sûrs"** ;
- points émergés dans la zone d'imprécision, soit **majorants  $P_2$  qualifiés de "moins sûrs"** ;
- points émergés hors zone d'imprécision, soit **majorants  $P_1$  qualifiés de "sûrs"**.

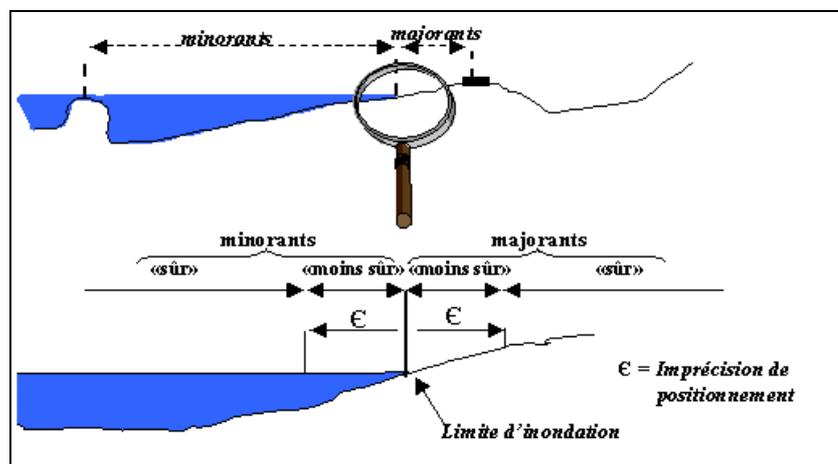


Figure 6-4 : proposition de prise en compte de l'imprécision du positionnement des limites d'inondation en terme de degrés de préférence

#### 6.4.2.4. Conclusion de la phase 2

A l'issue de cette seconde phase, de nombreuses sources d'informations altimétriques sur le toit de l'eau ont été répertoriées et cartographiées sous SIG. Elles deviennent alors facilement accessibles ce qui facilite un éventuel retour en cas de besoin ultérieur (*i.e.*, notion de traçabilité). Ces informations relatives aux niveaux d'eau, notées  $\{NE\}$ , sont exploitées sous la forme de cotes du toit de l'eau et qualifiées en terme de degrés de préférence. **Le résultat** est donc, pour chaque compartiment, **une liste plus ou moins étendue (éventuellement vide) de minorants  $\{m\}$  et de majorants  $\{M\}$  de la cote de l'eau différenciés selon une hiérarchie de  $n$  degrés de préférence ( $P_1 > P_2 > \dots > P_n$ ).**

### 6.5. Synthèse et formalisation de cette première étape

#### 6.5.1. Données extraites

Cette étape, qui nécessite le recours à des données de nature géométrique, altimétrique et événementielle (*i.e.*, photographie aérienne en crue), permet d'extraire et de structurer au sein d'un SIG un grand nombre d'informations jugées utiles et pertinentes pour la connaissance de la crue.

Même si l'analyse des images en crue est au centre de l'extraction de ces informations, des données hors crue (*e.g.*, données altimétriques) et une expertise terrain sont également fortement valorisées.

Le choix des informations extraites est entièrement **guidé par le fonctionnement hydraulique** de la plaine inondée puisque ces informations concernent :

- des compartiments, entités surfaciques basées sur des frontières fixes et à l'intérieur desquelles la cote de l'eau est supposée uniforme;
- des indications de niveau d'eau, attribut renseignant l'état hydraulique des compartiments;
- des circulations inter-compartiments, transcrivant des relations spatiales fonctionnelles.

A l'issue de cette étape, ces trois types d'informations ont été rendus accessibles. Pour la suite, l'écriture suivante est retenue :

1. l'ensemble  $\{C\}$  des  $N_c$  **compartiments** en eau pour la crue étudiée

$$\{C\} = \bigcup_{1 \leq i \leq N_c} C_i$$

2. l'ensemble  $\{H\}$  des circulations hydrauliques entre les compartiments contigus, différenciées en flux  $F$ , équilibre  $E$  ou de type inconnu  $I$

$$\{H\} = \{F\} \cup \{E\} \cup \{I\}$$

3. l'ensemble  $\{NE\}$  d'indications de niveau d'eau, chacune étant exprimée en cote sous la forme d'un minorant  $m$  ou d'un majorants  $M$ , rattachée à un compartiment et qualifiée par un degré de préférence  $P_j$  ( $1 \leq j \leq n$ ). Ainsi  $\{M_{C_i}\}$  représente la liste des majorants rattachées au compartiment  $C_i$  et  $\{M_{C_i}^{P_j}\}$  représente la liste  $\{M_{C_i}\}$  restreinte aux majorants ayant un degré de préférence  $P_j$ .

$$\{NE\} = \bigcup_{(1 \leq j \leq n)} \left\{ \bigcup_{(1 \leq i \leq N_c)} \{M_{C_i}^{P_j}; m_{C_i}^{P_j}\} \right\}$$

### 6.5.2. Un schéma spatial intégrant le fonctionnement hydraulique

Ces informations correspondent à un schéma d’appréhension de l’espace basé sur le fonctionnement hydraulique : la **structure hydrodynamique**. Celle-ci permet de lier efficacement les trois échelles spatiales emboîtées identifiées dans notre problème : par ordre croissant du local au global, on trouve le grain, l'unité de calcul et la zone d’étude.

- Le **grain** ou observation élémentaire correspond aux estimations locales {NE} issues des photos.
- Les **unités élémentaires de calcul** sont les compartiments {C}, sur lesquels vont se faire les estimations de cote sous la forme [Min(Ci) ; Max(Ci)]. Chaque compartiment peut avoir de zéro à plusieurs grains d’information donc un ensemble de valeurs de type Minorant et Majorant qu’il va falloir gérer. Si aucune information n’est disponible sur un compartiment Ci donné, on peut toujours lui associer des informations de ce type en écrivant :

- $Min(Ci) = \hat{Z}_{TN}^{comp}$  (rappel :  $\hat{Z}_{TN}^{comp} = cote\ moyenne\ du\ terrain\ naturel$ )
- $Max(Ci) = \hat{Z}_{TN}^{comp} + \Omega$  (avec  $\Omega = grande\ valeur\ forfaitaire, e.g., 5\ ou\ 10\ m$ )

- La **zone d’étude** est la plaine d’inondation sur laquelle est définie une structure hydrodynamique formée de Nc compartiments reliés hydrauliquement par les circulations {H} entre compartiments connexes. Ce lien hydraulique entre les compartiments va former le véritable ciment de l’analyse spatiale du phénomène hydraulique.

Ce schéma spatial constitue une adaptation guidée par l’hydraulique des concepts plus généraux de description de l’espace, *i.e.*, un contenant et un contenu auxquels on a ajouté le concept de relation spatiale fonctionnelle. Le contenant est traduit par les compartiments, le contenu par la cote de l’eau dans chaque compartiment et les relations spatiales par les circulations hydrauliques (*cf.*, Tableau 6-1). La prise en compte des circulations, transcription des échanges (d’énergie ou de matière) propres à chaque phénomène naturel, permet de dépasser le schéma descriptif statique classique en télédétection (*i.e.*, le contenant est le pixel et le contenu la radiométrie) pour aller vers un schéma spatial plus adapté au fonctionnement du phénomène observé. Autrement dit, la description statique "objets + attributs" classiquement réalisée en télédétection, *i.e.*, {C}+{NE}, est complétée par la prise en compte de relations spatiales fonctionnelles entre objets, *i.e.*, {C}+{NE}+{H}.

	Description de l’espace	Correspondance hydraulique
<b>contenant</b>	segmentation en objets "homogènes" (support de l’information)	compartiments hydrauliques (uniforme en cote de l’eau)
<b>contenu</b>	Attribut(s) interne(s)	cote de l’eau intra-compartiment
<b>Relation spatiale</b>	Relations fonctionnelles de connexité (échange)	circulations inter-compartiments

Tableau 6-1 : description de l’espace orientée par l’hydraulique

## 6.6. Premières estimations de la cote de l'eau et perspectives

La nature des informations altimétriques  $\{NE\}$  extraites des images de télédétection amène à caractériser "la" cote du toit de l'eau de chaque compartiment sous la forme d'une plage  $[Min; Max]$  dont on cherche à minimiser l'amplitude. Si les indications  $\{NE\}$  sont globalement exactes (comme supposées ci-dessus), la cote de l'eau réelle recherchée dans chaque compartiment peut être estimée localement avec ces informations. Cette première estimation correspond à la démarche de "télédétection descriptive statique".

Pour cela il suffit de considérer individuellement chaque compartiment et de lui assigner les valeurs suivantes (la notion de degré de préférence n'est pas prise en compte à ce stade pour faciliter la compréhension) :

$$\text{Min}(Ci) = \text{SUP} \{ m_{Ci} \} \text{ et } \text{Max}(Ci) = \text{INF} \{ M_{Ci} \}$$

*SUP étant l'opérateur maximum, INF l'opérateur minimum*

Cette estimation sous forme de plage  $[\text{Min}(Ci) ; \text{Max}(Ci)]$ , que l'on veut la plus restreinte possible, n'est valide que si les valeurs trouvées respectent la condition  $\text{Min}(Ci) \leq \text{Max}(Ci)$ . Or, si il est légitime de supposer que les informations  $\{NE\}$  sont très majoritairement exactes (ou correctes), il est impossible de supposer qu'elles le sont toutes sans exception, ne serait-ce que pour des questions d'erreurs humaines. Les minorants et majorants rattachés à  $Ci$  ne doivent être pris en compte que s'ils conduisent à une estimation  $[\text{Min}(Ci) ; \text{Max}(Ci)]$  respectant  $\text{Min}(Ci) \leq \text{Max}(Ci)$ .

Ces contraintes numériques de type inégalité sont la transcription d'une première notion de cohérence hydraulique locale que l'on appellera **cohérence INTRA** (pour intra-compartiment puisqu'elle concerne chaque compartiment considéré indépendamment des autres). Pour valoriser pleinement le schéma spatial fonctionnel décrit précédemment, il est proposé de traduire également les circulations hydrauliques en contraintes sur les estimations de cotes dans chaque compartiment, afin d'accéder à une cohérence hydraulique globale sur la plaine d'inondation. Cette partie originale est largement décrite dans les deux chapitres suivants.

----- oOo -----

## 7. Le "flooding problem"

### 7.1. Introduction

L'étape d'exploitation des données de télédétection a permis d'extraire trois groupes d'informations de base pour la suite de notre travail : des compartiments comme support de l'information, des indications altimétriques sur le toit de l'eau et des circulations hydrauliques entre compartiments.

L'objectif de ce chapitre est de montrer le processus qui permet de gérer conjointement ces trois types d'informations pour atteindre l'objectif que l'on s'est fixé, *i.e.*, une quantification la plus précise possible de la cote de l'eau en tout point inondé de la plaine au moment de la prise des clichés.

Ce chapitre expose comment la prise en compte des relations spatiales fonctionnelles contenues dans la structure hydrodynamique conduit à transformer le problème d'une caractérisation d'un état hydraulique à partir d'informations issues de télédétection en un problème de **mise en cohérence** d'informations. Ce dernier peut être vu à la fois comme un **problème de satisfaction de contraintes (CSP)** ou comme un problème de **fusion/révision** d'informations.

La communauté scientifique traitant de la **révision de connaissances** s'est vivement intéressée à ce travail, trouvant là un cas d'application réel tout à fait en phase avec les théories qu'elle développe. La formalisation du problème sur la basse vallée de l'Hérault a ainsi fourni une application centrale au **projet européen REVIGIS** (Revision of the Uncertain Geographic Information, <http://www.cmi.univ-mrs.fr/REVIGIS/>), lui permettant de tester et comparer différentes techniques développées dans le domaine de l'intelligence artificielle (IA). La terminologie anglo-saxonne de "**flooding problem**" est issue de ce projet.

### 7.2. Base de la méthode

Étant donné que l'on cherche à caractériser l'état d'une **inondation réelle**, les niveaux d'eau recherchés respectent nécessairement certaines "implications" liées au fonctionnement hydraulique. Ces implications traduisent le fait que les deux informations de **circulations hydrauliques** et **d'indications de cote de l'eau**, établies de façon **indépendante**, sont en réalité intimement liées d'un point de vue fonctionnel puisque les deux relations suivantes (*cf.*, Tableau 7-1), que l'on appellera **relations de cohérence hydraulique**, doivent être satisfaites :

RELATIONS DE COHÉRENCE HYDRAULIQUE		
pour un flux :	"la cote de l'eau baisse dans le sens de l'écoulement"	$\mathfrak{R}_1$
pour un équilibre :	"le niveau d'eau est très proche dans les deux compartiments concernés"	$\mathfrak{R}_2$

Tableau 7-1 : les deux relations de cohérence hydraulique qui doivent être satisfaites

*L'idée centrale de ce travail est de faire profiter la procédure de quantification des niveaux d'eau de ces relations induites par le fonctionnement hydraulique. Celles-ci vont en effet former un véritable liant qui va permettre de traiter simultanément l'ensemble des données recueillies dans un même schéma fonctionnel.*

Concrètement, on s'attend à ce que les relations de cohérence hydraulique émanant des observations de circulations permettent de propager et contraindre les connaissances locales  $\{NE\}$  sur l'ensemble de la plaine et ainsi de s'approcher le plus précisément possible de la solution réelle. Cette démarche repose sur l'hypothèse fondamentale que les informations issues de télédétection sont très majoritairement exactes et fiables, sans quoi tout traitement ultérieur de ces informations est à proscrire. On revient plus en détail sur ce point au § 7.5.

Les implications fonctionnelles font donc apparaître des contraintes de cohérence hydraulique qui peuvent s'exprimer sous la forme d'inégalités numériques. Chaque contrainte locale émanant du groupe  $\{NE\}$  de minorant/majorant (donc également de type inégalité numérique) va ainsi être "connectée" avec celles des autres compartiments par les contraintes de cohérence hydraulique, le tout formant un véritable **système de contraintes**.

Ce schéma peut être vu sous un éclairage "**système de contraintes**" puisque les informations indépendantes  $\{NE\}$  et  $\{H\}$  sont toutes deux transcrites en **contraintes** sur les bornes Min et Max de l'estimation recherchée de la **cote de l'eau** dans chaque compartiment. En effet, les informations  $\{NE\}$  de type minorant et majorant contraignent **localement** les estimations  $[Min ; Max]$  de chaque compartiment (on parlera de **contrainte intra-compartiment**) alors que les informations de circulations  $\{H\}$  définissent des relations entre les estimations des compartiments directement ou indirectement interconnectés (par le chaînage hydraulique) qui deviennent alors dépendantes les unes des autres (on parlera de **contrainte inter-compartiments**).

Ce schéma peut également être vu sous un éclairage **fusion/révision** d'informations qui exprime le fait que la structure hydrodynamique permet d'intégrer conjointement, sur le support d'informations  $\{C\}$ , les circulations hydrauliques  $\{H\}$  et les indications de niveaux d'eau  $\{NE\}$ . L'originalité de notre approche est d'orienter cette fusion par rapport au fonctionnement hydraulique. Le mode de valorisation recherché s'apparente tout à fait à une procédure de **fusion** d'informations hétérogènes, noté  $\{C\} \oplus \{NE\} \oplus \{H\}$ . La prise en compte du groupe d'information  $\{H\}$  permet de renforcer et consolider la caractérisation de l'état hydraulique de la plaine rendue possible par la "simple" description statique  $\{C\} \oplus \{NE\}$ .

### 7.3. Des implications hydrauliques au système de contraintes

Pour ne pas surcharger la présentation de ce paragraphe, toutes les indications de niveaux d'eau  $\{NE\}$  sont supposées être de même degré de préférence  $P_1$ .

#### 7.3.1. Nature des implications hydrauliques

Les implications hydrauliques mettent en jeu le lien existant entre les estimations  $[Min(C_i) ; Max(C_i)]$  de cote de l'eau pour chaque compartiment et les circulations hydrauliques. Ce lien fort se traduit par les relations du Tableau 7-1 et est appelé **cohérence hydraulique**.

7.3.1.1. **Implications INTER (pour inter-compartiments)**

Pour expliciter les relations de cohérence hydraulique intervenant **entre compartiments**, trois concepts seront utilisés : la **cohérence (hydraulique) INTER**, la **compatibilité (hydraulique) INTER** et le **conflit (hydraulique) INTER**.

Le terme "**instanciation**" est employé pour désigner une affectation, réalisée parmi la plage  $[\text{Min}(C_i) ; \text{Max}(C_i)]$ , d'une cote de l'eau pour chaque compartiment  $C_i$ . Une instanciation est appelée **instanciation solution** si elle satisfait les relations  $\mathfrak{R1}$  et  $\mathfrak{R2}$ .

<p>La <b>cohérence INTER</b> est la stricte satisfaction des relations <math>\mathfrak{R1}</math> et <math>\mathfrak{R2}</math> induites par l'observation des circulations sur les estimations des compartiments concernés : les plages <math>[\text{Min}(C_i) ; \text{Max}(C_i)]</math> sont telles que tout niveau d'eau compris dans une plage <math>[\text{Min}(C_i) ; \text{Max}(C_i)]</math> rentre dans une instanciation solution.</p>	<p><b>COHÉRENCE</b> = <b>CONFIGURATION "OPTIMALE" DES PLAGES [MIN ; MAX]</b> (tout niveau rentre dans une instanciation solution)</p>
<p>La <b>compatibilité INTER</b> exprime la non contradiction des observations indépendantes de circulations <math>\{H\}</math> et d'indications altimétriques <math>\{NE\}</math> : les plages <math>[\text{Min}(C_i) ; \text{Max}(C_i)]</math> sont telles qu'il existe au moins une instanciation solution. Par contre il peut exister des niveaux ne rentrant dans aucune instanciation solution.</p>	<p><b>COMPATIBILITÉ</b> = <b>EXISTANCE D'AU MOINS UNE INSTANCIATION SOLUTION</b></p>
<p>Lorsque des observations <math>\{H\}</math> et <math>\{NE\}</math> ne présentent pas de compatibilité inter, on dit qu'il y a <b>incompatibilité INTER</b> ou encore <b>conflit INTER</b> dans la base de connaissances initiale : les plages <math>[\text{Min}(C_i) ; \text{Max}(C_i)]</math> sont telles qu'il n'existe aucune instanciation solution.</p>	<p><b>CONFLIT</b> = <b>AUCUNE INSTANCIATION SOLUTION</b></p>

La Figure 7-1 illustre ces trois concepts pour un flux. Le cas *a* montre une configuration compatible et cohérente, le cas *b* une configuration compatible mais non cohérente (puisque une portion  $P_i$  et une portion  $P_j$  des plages d'estimation des compartiments  $C_i$  et  $C_j$  ne rentrent dans aucune solution), et le cas *c* une configuration de conflit.

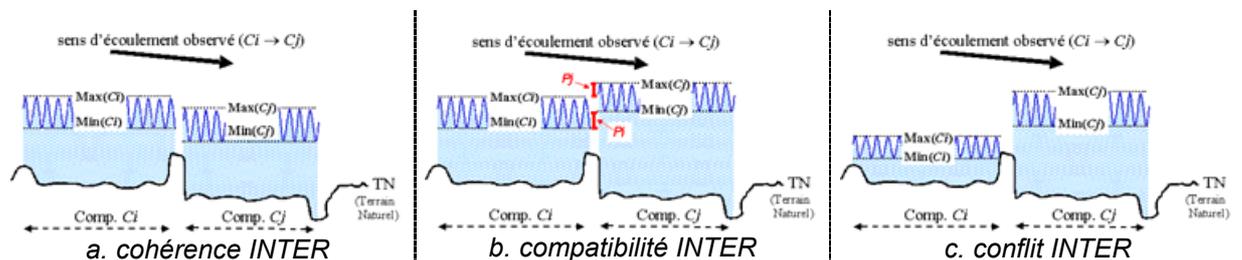


Figure 7-1 : illustration pour une relation de flux des concepts de cohérence INTER (a), de compatibilité INTER (b) et de conflit INTER (c)

Ces trois notions sont intimement liées : le conflit INTER est la négation de la compatibilité INTER, et la compatibilité INTER est une condition nécessaire, mais non suffisante, de la cohérence INTER.

7.3.1.2. **Implications INTRA (pour intra-compartiment)**

Pour des raisons de commodités, ces notions sont étendues à la cohérence hydraulique interne à chaque compartiment (et seront qualifiées de INTRA). Elles sont alors beaucoup plus simples

puisqu'elles sont uniquement relatives à l'estimation  $[\text{Min}(C_i) ; \text{Max}(C_i)]$  du compartiment  $C_i$  considéré individuellement, sans faire intervenir de relations de circulation. De ce fait, elle correspondent à la fusion  $\{C\} \oplus \{NE\}$ , équivalent d'une description statique et locale de télédétection.

- La **cohérence INTRA** (pour intra-compartiment) traduit le fait que, pour chaque compartiment  $C_i$  considéré individuellement, la liste de minorants et majorants rattachée à ce compartiment ne conduit pas à imposer une valeur de Min supérieure à celle de Max.
- La **compatibilité INTRA** correspond exactement à la cohérence INTRA.
- Le **conflit INTRA**, négation de la compatibilité et de la cohérence intra, traduit le fait que les estimations  $\{NE\}$  rattachées à  $C_i$  conduisent à un minorant supérieur à un majorant.

### 7.3.2. Transcription mathématique de ces concepts

Étant donné que la compatibilité hydraulique est l'opposé du conflit hydraulique, seuls les concept de cohérence et de conflit sont transcrits sous forme mathématique. On pourra remarquer que la cohérence hydraulique INTER (et les actions de rectification associées) met en relation des bornes de même nature (Min avec Min, ou Max avec Max) alors que le conflit hydraulique met en relation des bornes de nature différentes (Min avec Max).

#### 7.3.2.1. Au niveau INTRA

La **cohérence INTRA** (ou compatibilité INTRA), négation du **conflit INTRA**, est la transcription de l'existence d'une plage non nulle dans l'estimation de la cote de l'eau de chaque compartiment. Elle sous-entend donc, compartiment par compartiment, une compatibilité des seules indications de niveaux d'eau  $\{NE\}$  rattachées au compartiment  $C_i$  : un majorant du niveau d'eau ne peut pas être inférieur à un minorant du niveau d'eau pour le même compartiment.

<b>Cohérence INTRA</b>	$\forall i \in [1 ; Nc] \text{ alors } \text{Max}(C_i) \geq \text{Min}(C_i)$	<b>Eq. 7-1</b>
<b>Conflit INTRA</b>	$\exists i \in [1 ; Nc] \text{ tq } \text{Max}(C_i) < \text{Min}(C_i)$	<b>Eq. 7-2</b>

Rappel : au départ  $\text{Max}(C_i) = \text{INF} \{M_{C_i}\}$  et  $\text{Min}(C_i) = \text{SUP} \{m_{C_i}\}$

#### 7.3.2.2. Au niveau INTER

##### 7.3.2.2.1 Cohérence INTER

L'observation d'un **flux** ( $C_i \rightarrow C_j$ ) définit un compartiment amont  $C_i$ , un compartiment aval  $C_j$  ainsi qu'une diminution de la charge hydraulique (cf., **Eq. 7-3** provenant de l'équation de Bernouilli). En cas de vitesse du même ordre ou de faible vitesse (hypothèse bien respectée en lit majeur), la diminution de charge se simplifie en diminution de cote de l'eau de l'amont vers l'aval (i.e.,  $Z_{C_i} \geq Z_{C_j}$ ).

$Z_{C_i} + \frac{V_{C_i}^2}{2g} \geq Z_{C_j} + \frac{V_{C_j}^2}{2g}$	<b>Eq. 7-3</b>
----------------------------------------------------------------------	----------------

L'observation d'un **équilibre** impose une quasi-égalité de cote de l'eau entre les deux compartiments concernés. Un équilibre peut s'exprimer à l'aide de deux flux en sens inverse, moyennant la prise en compte d'un écart que l'on accepte entre la cote de l'eau dans les deux compartiments concernés. Pour un équilibre ( $C_i \leftrightarrow C_j$ ) entre les compartiments  $C_i$  et  $C_j$ , on observe donc, par rapport au flux, un doublement des inéquations définissant les relations numériques de cohérence hydraulique INTER.

<b>COHÉRENCE INTER</b>		
flux ( $C_i \rightarrow C_j$ )	$\forall i, j \in [1 ; Nc]^2$ tq $C_i \rightarrow C_j$ <b>alors</b> $Min(C_j) \leq Min(C_i)$ <b>et</b> $Max(C_j) \leq Max(C_i)$	Eq. 7-4
équilibre ( $C_i \leftrightarrow C_j$ )	$\forall i, j \in [1 ; Nc]^2$ tq $C_i \leftrightarrow C_j$ <b>alors</b> $Min(C_j) \leq Min(C_i) + \delta$ <b>et</b> $Max(C_j) \leq Max(C_i) + \delta$ $Min(C_i) \leq Min(C_j) + \delta$ <b>et</b> $Max(C_i) \leq Max(C_j) + \delta$	Eq. 7-5

où  $\delta$  représente l'écart accepté entre deux plans d'eau en équilibre (cet écart dépend des contextes mais peut être estimé en première approximation à 10 cm)

### 7.3.2.2 Conflit INTER

Le conflit INTER correspond à l'absence de solution possible. Il apparaît pour un flux dans le cas de non recouvrement des plages d'estimation (avec des estimations aval plus élevées que les estimations amont) et pour un équilibre dans le cas de non recouvrement des plages d'estimation, moyennant la prise en compte de l'écart accepté  $\delta$ .

<b>CONFLIT INTER</b>		
flux ( $C_i \rightarrow C_j$ )	$\exists i, j \in [1 ; Nc]^2$ tq $C_i \rightarrow C_j$ <b>et</b> $Min(C_j) > Max(C_i)$	Eq. 7-6
équilibre ( $C_i \leftrightarrow C_j$ )	$\exists i, j \in [1 ; Nc]^2$ tq $C_i \leftrightarrow C_j$ <b>et</b> ( $Min(C_j) > Max(C_i) + \delta$ <b>ou</b> $Min(C_i) > Max(C_j) + \delta$ )	Eq. 7-7

### 7.3.3. Système de contraintes équivalent

La transcription numérique des relations de cohérence hydraulique fait apparaître le système de contraintes ( $X, D, \zeta$ ) suivant :

- $X = \left\{ \bigcup_{1 \leq i \leq Nc} \{Min(C_i); Max(C_i)\} \right\}$ , ensemble des variables du problème ;
- $D = [\hat{Z}_{TN}^{comp} ; \hat{Z}_{TN}^{comp} + \Omega]$ , domaine de variation associé à chaque variable ( $\Omega$  étant une grande valeur forfaitaire jamais atteinte)
- $\zeta = \{\zeta_{intra} \cup \zeta_{inter}\}$  ; avec  $\zeta_{intra}$  l'ensemble des contraintes unaires de cohérence hydraulique INTRA (i.e., Eq. 7-1) et  $\zeta_{inter}$  l'ensemble des contraintes binaires de cohérence hydraulique INTER (i.e., Eq. 7-4 et Eq. 7-5).

Rq : la définition du domaine peut s'exprimer en terme de contraintes unaires (cf. § 3.4.2.1) du type :

$\forall i \in [1 ; Nc]$ <b>alors</b> $Min(C_i) \geq \hat{Z}_{TN}^{comp}$ <b>et</b> $Max(C_i) \leq \hat{Z}_{TN}^{comp} + \Omega$	Eq. 7-8
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------

### 7.3.4. Conclusion

Assurer la cohérence hydraulique (INTRA et INTER) sur la plaine d'inondation revient à résoudre un problème de satisfaction de contraintes (CSP, cf., § 3.4.2) sur des intervalles numériques (cf., 3.4.1.2). La compatibilité hydraulique correspond alors à la consistance du CSP, tandis que le conflit hydraulique, à son inconsistance. La cohérence hydraulique correspond quant à elle au cas particulier de consistance du CSP où les portions des plages d'estimation ne rentrant dans aucune solution du CSP ont été éliminées.

## 7.4. Réflexions sur la résolution du CSP

### 7.4.1. Schéma général de résolution

Afin de résoudre le CSP précédemment défini et parvenir à la cohérence hydraulique (INTRA et INTER), deux problèmes doivent être réglés :

1. **assurer la compatibilité hydraulique** pour éliminer les conflits potentiels et ainsi accéder à la consistance du CSP ;
2. **assurer la cohérence hydraulique** pour éliminer toute portion des plages d'estimation ne rentrant dans aucune instanciation du CSP.

Chercher à résoudre ces problèmes successivement relève d'une démarche intuitive classique en **révision** de connaissances (*cf.*, § 3.2.2 et tout particulièrement l'identité de LEVI au § 3.2.2.3.2) : une première étape de **contraction** permet d'éliminer tout conflit potentiel, alors qu'une seconde étape **d'expansion** de la base de connaissances permet d'incorporer les informations nouvelles. Ce schéma général a été retenu pour essayer de venir à bout du "flooding problem".

La Figure 7-2 illustre ces différentes étapes chronologiques :

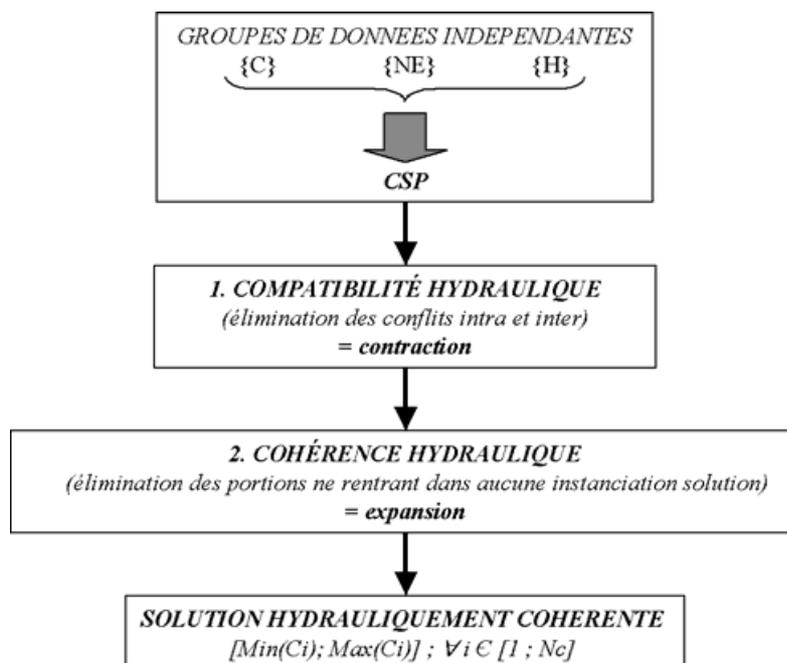


Figure 7-2 : schéma général de résolution du CSP calqué sur un processus de fusion/révision

### 7.4.2. Accès à la compatibilité hydraulique

Établir la compatibilité hydraulique revient à assurer la consistance du CSP (*i.e.*, existence d'au moins une solution). Cette première étape, qui consiste à **contracter** la base de connaissances initiales pour éliminer toute source de **conflit**, nécessite de définir une **stratégie de révision** permettant de :

- localiser les informations incompatibles à la source des conflits ;
- choisir, parmi ces informations incompatibles, celles qui sont jugées responsables du conflit ;
- définir une méthode **de relâchement** pour modifier ces informations et rétablir la consistance du CSP (cette phase est appelée relâchement de contraintes dans le domaine CSP).

La localisation des sources de conflit est l'étape la plus délicate, notamment pour les conflits INTER. En effet la localisation des sources de conflit INTRA est relativement simple puisqu'elle ne met en jeu que des informations de type {NE} et peut être réalisée localement, *i.e.*, compartiment par compartiment. Par contre, celle des conflits INTER est autrement plus délicate puisqu'elle fait intervenir l'ensemble des informations {NE} et {H} concernant des compartiments interconnectés par le schéma de flux. Le problème devient vite très difficile à gérer puisque le nombre de cas à tester croît grossièrement de façon exponentielle avec le nombre d'informations en interaction.

### 7.4.3. Accès à la cohérence hydraulique

Une fois tous les conflits éliminés, une solution sans conflit est définie pour l'ensemble des compartiments de la plaine, mais avec une plage d'estimation  $[Min(C_i), Max(C_i)]$  dont l'amplitude s'est agrandie chaque fois qu'un relâchement a dû être mis en place pour résoudre un conflit. La seconde étape s'attache alors à éliminer les portions des plages d'estimation ne rentrant dans aucune solution du CSP et ainsi obtenir une **solution hydrauliquement cohérente**.

L'élimination des portions de plages ne rentrant dans aucune solution correspond à l'application d'**actions de rectification** découlant des circulations hydrauliques {H} :

<b>ACTIONS DE RECTIFICATION</b>		
flux ( $C_i \rightarrow C_j$ )	$\forall i, j \in [1 ; Nc]^2 \text{ tq } C_i \rightarrow C_j \text{ alors}$ $Min(C_i) = SUP\{Min(C_i) ; Min(C_j)\}$ <b>et</b> $Max(C_j) = INF\{Max(C_i) ; Max(C_j)\}$	<i>Eq. 7-9</i>
équilibre ( $C_i \leftrightarrow C_j$ )	$\forall i, j \in [1 ; Nc]^2 \text{ tq } C_i \leftrightarrow C_j$ <b>si</b> $ Min(C_i) - Min(C_j)  > \delta$ <b>alors</b> $INF\{Min(C_i) ; Min(C_j)\} = SUP\{Min(C_i) ; Min(C_j)\} - \delta$ <b>si</b> $ Max(C_i) - Max(C_j)  > \delta$ <b>alors</b> $SUP\{Max(C_i) ; Max(C_j)\} = INF\{Max(C_i) ; Max(C_j)\} + \delta$	<i>Eq. 7-10</i>

L'application de ces **actions de rectification** peut être comparée à une opération d'**expansion** qui conduit à **resserrer** les estimations et s'approcher ainsi d'une estimation hydrauliquement cohérente des niveaux d'eau dans la plaine la plus resserrée possible (*cf.*, Figure 7-3). Ces actions permettent en effet de propager les connaissances locales {NE} sur la cote du toit de l'eau sur l'ensemble des compartiments interconnectés par le schéma de circulations hydrauliques.

La difficulté de cette étape consiste à trouver un moyen efficace pour propager effectivement ces actions sur l'ensemble des compartiments interconnectés, puisque l'application d'une action est susceptible de modifier une ou plusieurs estimations  $Min(C_i)$  ou  $Max(C_i)$ , ce qui nécessite d'appliquer à nouveau les autres contraintes liées à ce compartiment.

On peut remarquer toutefois que ces actions de rectification ont "l'agréable" propriété de mettre en relation uniquement **des bornes de même nature** (Min avec Min ou Max avec Max).

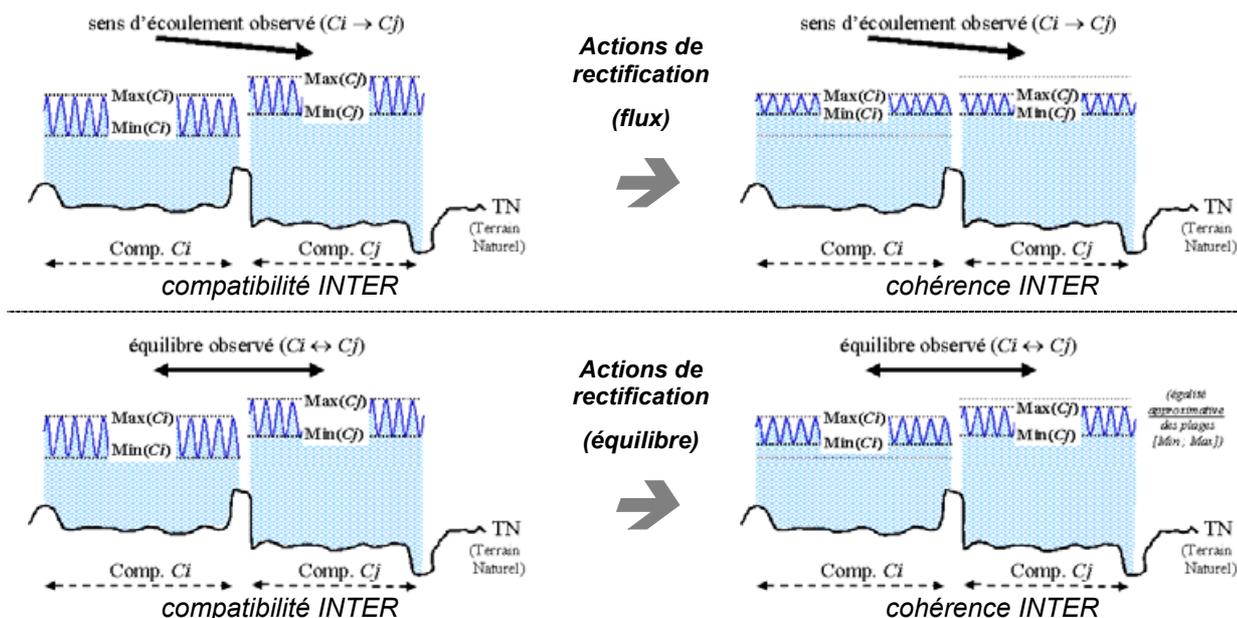


Figure 7-3 : de la compatibilité à la cohérence, illustration du resserrement des estimations lors de l'élimination des portions de plage ne rentrant dans aucune solution

### 7.5. Discussion sur la validité de la démarche

Rappelons que la démarche a pour objectif de définir, à partir des données extraites de télédétection, une estimation de la cote de l'eau en tout point du champ d'inondation qui soit la plus resserree autour des valeurs réelles. Les deux objectifs suivants doivent être satisfaits 1) la précision ; 2) l'exactitude.

Si les actions de rectification ont été écrites pour resserrer les estimations (des actions d'élargissement menant à l'effet inverse, et donc sans intérêt pour notre travail, auraient également pu être retenues), elles n'améliorent que la précision des estimations mais ne garantissent en aucun cas l'exactitude de la solution obtenue. Pour cela il est indispensable de faire *l'hypothèse que les informations issues de télédétection sont majoritairement exactes et fiables*. Autrement dit, les informations erronées sont supposées être en faible nombre, correspondant essentiellement à des aberrations liées au processus d'interprétation d'images et à la donnée d'origine (e.g., information altimétrique de relief ou de hauteur d'objets internes). Si tel est le cas, les éventuels conflits existants dans la base de connaissances peuvent être imputés à ces seules informations erronées qui seront remises en cause et modifiées par la démarche d'élimination des conflits. Le déclenchement des actions de rectification pour resserrer les estimations devient alors tout à fait légitime, puisque seules des informations exactes vont être propagées. La cote de l'eau de certains compartiments interconnectés dans le schéma de circulations se retrouve ainsi estimée, même si ces compartiments n'avaient aucune information locale {NE} au départ.

L'hypothèse émise est donc **fondamentale** pour la validité de la démarche et doit de ce fait absolument être vérifiée sans quoi la méthode n'est plus justifiée. La première vérification consiste à s'assurer que seul un faible pourcentage des informations initiales (extraites des images de télédétection) est concerné par les conflits. Le nombre de conflits initiaux et/ou de relâchements nécessaires pour établir la compatibilité hydraulique constitue donc une première garantie de la qualité des résultats qui seront obtenus. Cette phase constitue une sorte de validation "interne" qui amène à penser que le resserrement des estimations de cote réalisé par les actions de rectification conduit au maximum de

précision sans s'éloigner de la valeur réelle. La solution établie est donc bien, en fonction des données à disposition, la solution la plus resserrée possible autour de la valeur réelle .

Il est bien évident cependant que cette validation "interne" n'est pas suffisante et qu'une étape de validation avec des données extérieures (*e.g.*, observations réalisées sur le terrain) est essentielle pour vérifier l'exactitude de la solution trouvée. Elles devra être entreprise chaque fois que l'existence de telles données le permet. Cette phase de validation "externe" est discutée au chapitre 11.

## 7.6. Conclusion sur le flooding problem

Pour accéder à une estimation la plus resserrée possible des cotes de l'eau dans chaque compartiment, notre démarche cherche à **mettre en cohérence hydraulique** (INTRA et INTER) les informations indépendantes recueillies dans l'étape d'extraction des informations de télédétection.

La transcription mathématique de cette mise en cohérence a fait apparaître un problème de CSP dont la résolution est abordée selon une décomposition en deux étapes successives : *1) gestion des conflits pour accéder à la compatibilité hydraulique, 2) application des actions de rectification pour accéder à la cohérence hydraulique.*

Ce traitement, qui a fait l'objet de plusieurs publications [Raclot et Puech, 1998; Raclot et Puech, 2003], est détaillée dans le chapitre suivant.

----- oOo -----



## 8. Mise en cohérence hydraulique

### 8.1. Introduction

En exposant notre démarche **de mise en cohérence hydraulique**, le chapitre précédent (*cf.*, chap. 7) a fait apparaître le "flooding problem" comme un **problème de satisfaction de contraintes** (établi au § 7.3.3) dont la résolution peut s'inspirer d'une démarche de **fusion/révision de connaissances** (exposé au § 7.4).

Quel que soit l'éclairage retenu, deux difficultés majeures apparaissent. La première est **la détection et l'élimination des conflits** pour établir la compatibilité hydraulique. La seconde est l'application des **actions de rectification** pour finalement accéder à la cohérence hydraulique.

Après avoir illustré l'objectif de la démarche et montré quelques tests de techniques IA généralistes (réalisés par des partenaires dans le cadre du projet REVIGIS), ce chapitre présente la solution développée pour venir à bout de ces deux difficultés et ainsi résoudre le "flooding problem".

### 8.2. Illustration de la démarche

Pour bien montrer la philosophie et l'intérêt de la démarche de mise en cohérence, la Figure 8-1 illustre sur le site Aisne le point de départ et le point d'arrivée de l'algorithme développé.

Le **point de départ** de la démarche de mise en cohérence est une série d'indications altimétriques sur le toit de l'eau, chacune étant extraite des photographies en crue, qualifiée par un degré de préférence et rattachée à un compartiment. Par ailleurs, un schéma de circulations hydrauliques sur la plaine est également connu. La Figure 8-1a synthétise les informations disponibles sur la rive gauche de la rivière Aisne. Le cas de l'Aisne a été retenu car il est celui qui permet le mieux une représentation simplifiée en une dimension. On peut en effet considérer que l'axe des abscisses (point kilométrique) représente relativement bien le schéma de circulations amont-aval.

Le **point d'arrivée** de la mise en cohérence est une caractérisation des niveaux d'eau que l'on veut la plus précise possible autour de la valeur réelle. La Figure 8-1b illustre la nature des résultats recherchés à travers les estimations obtenues sur le site de l'Aisne. Les quelques valeurs qui ne respectent pas la décroissance des Max ou des Min sont dues au fait que, même sur une plaine très régulière comme celle de l'Aisne, le point kilométrique ne permet pas toujours de bien rendre compte de l'organisation amont-aval.

D'une information "brouillon", la mise en cohérence permet d'établir une caractérisation des niveaux d'eaux tout à fait intéressante.

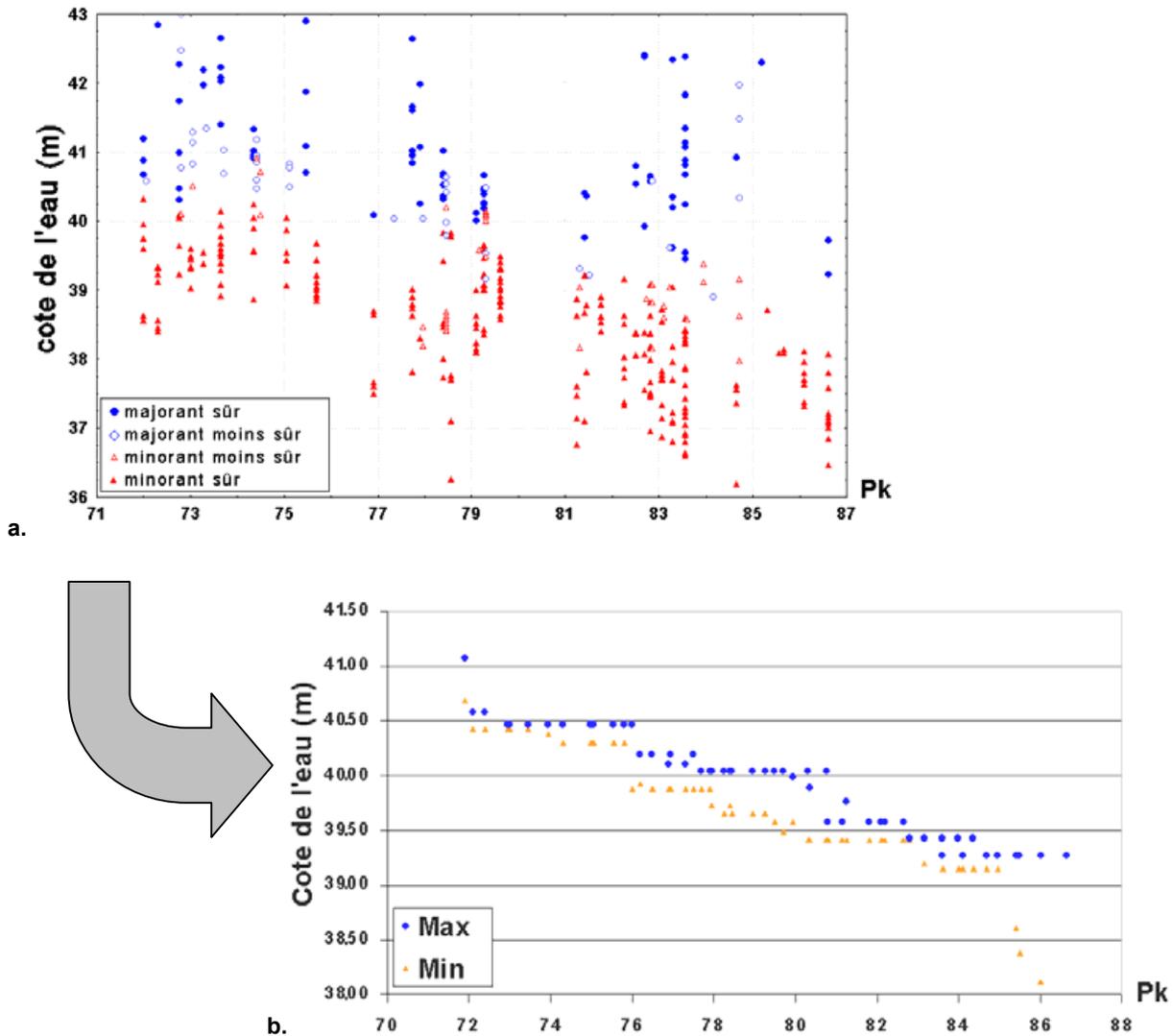


Figure 8-1 : point de départ et point d'arrivée de l'algorithme de mise en cohérence  
 a. indications altimétriques (rive gauche) extraites des photographies, b. estimations finales  
 (application sur la crue de décembre 1993 sur l'Aisne)

### 8.3. Réflexions sur la résolution du problème de mise en cohérence

#### 8.3.1. Difficultés rencontrées par les techniques généralistes

Dans le cadre du projet européen REVIGIS, des techniques aussi diverses que les CSP flexibles (*CON'FLEX* développé par l'INRA), les ROBDD (Reduced Ordered Binary Decision Diagrams), le KCA (Kernel Computational Algorithm) ou l'approche par ATMS (Assumption Truth Maintenance System) ont été testées sur un jeu de données extrait du site d'étude Hérault. Mais de fortes difficultés sont vite apparues du fait du nombre élevé de variables et de contraintes mises en jeu : sur un Pentium II avec 256Mo de RAM, les techniques *CON'FLEX* et ATMS ont dû être stoppées au bout de quinze jours de calcul et les techniques KCA et ROBDD ont avorté pour cause de saturation de RAM [Würbel et al., 2000]. Le revers de la portée généraliste de ces techniques semble bien résider dans la faiblesse de leur heuristique : le nombre de tests à effectuer, et donc le temps de calcul, croît de façon exponentielle avec le nombre de compartiments (*cf.*, Figure 8-2, cas du CSP flexible *CON'FLEX* avec plusieurs variantes de résolution).

Pour lever cette contrainte, ces mêmes auteurs ont proposé diverses adaptations, la principale étant de diviser le secteur d'étude en sous-secteurs sur lesquels les temps de calcul deviennent acceptables [Würbel et al., 2001]. Le bon fonctionnement de cette technique repose sur l'hypothèse d'une localité des sources de conflit, *i.e.*, les sources de conflit doivent appartenir au même sous-secteur. Bien qu'intéressante, cette approche pose le délicat problème du choix adéquat du découpage minimal permettant de circonscrire un conflit.

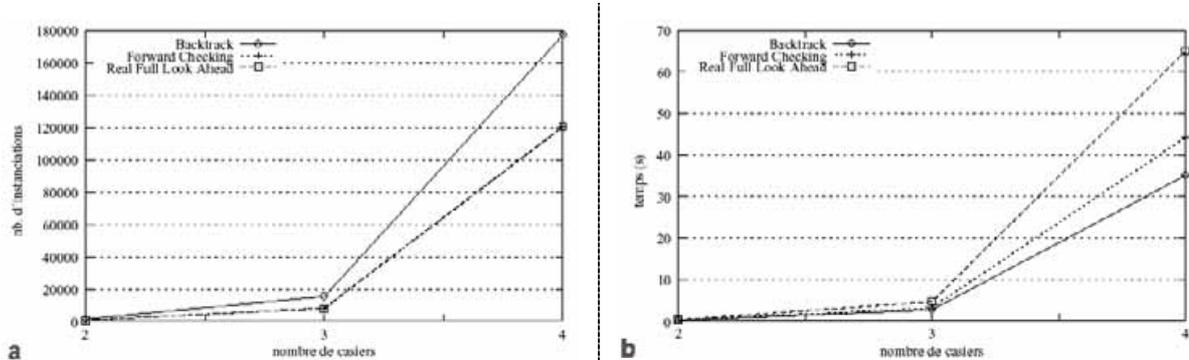


Figure 8-2 : illustration de la croissance de type exponentielle du nombre de tests à effectuer (a) et du temps de calcul (b) avec le nombre de compartiments (appelés ici casiers) (cas de CON'FLEX tiré de [Würbel, 2000])

Pour des raisons de capacité informatique et de temps de calcul, les techniques généralistes semblent aujourd'hui peu adaptées pour répondre aux problématiques environnementales dans lesquelles le nombre de variables et de contraintes mises en jeu est très important.

### 8.3.2. Vers un algorithme spécialisé

Pour contourner les limites des techniques généralistes, le développement d'un **algorithme spécialisé** a été privilégié. L'idée sous-jacente est de s'appuyer sur les spécificités de notre problème pour déterminer une heuristique permettant de ne pas passer en revue toutes les possibilités. L'objectif recherché est de trouver un ordonnancement des calculs qui permette d'appliquer chaque contrainte une fois et une seule afin de rendre linéaire (et non plus exponentielle) la croissance du temps de calcul avec le nombre de compartiments.

Le caractère **orienté** des contraintes INTER déduites des circulations hydrauliques de **flux** peut être retranscrit en terme de **causalité** (*cf.*, § 3.4.1.3). Cette constatation est extrêmement importante car la causalité permet d'orienter la propagation et donc **d'ordonner** l'application des différentes contraintes dans le temps. Lorsque le schéma de liaisons hydrauliques entre compartiments se limitent à des flux, il est possible de transformer le schéma de circulations hydrauliques en un **graphe orienté** ayant les mêmes caractéristiques qu'un **graphe causal** et donc d'établir un ordre partiel amont-aval sur les compartiments : pour cela chaque nœud est introduit uniquement lorsque tous les nœuds situés à son amont ont déjà été introduits. Un **ordre total**<sup>23</sup> stable (non unique) sur la séquence d'applications des contraintes liées aux flux peut finalement être déduit (*cf.*, Figure 8-3).

<sup>23</sup> les notions d'ordre partiel et total sont rappelées en Annexe 7

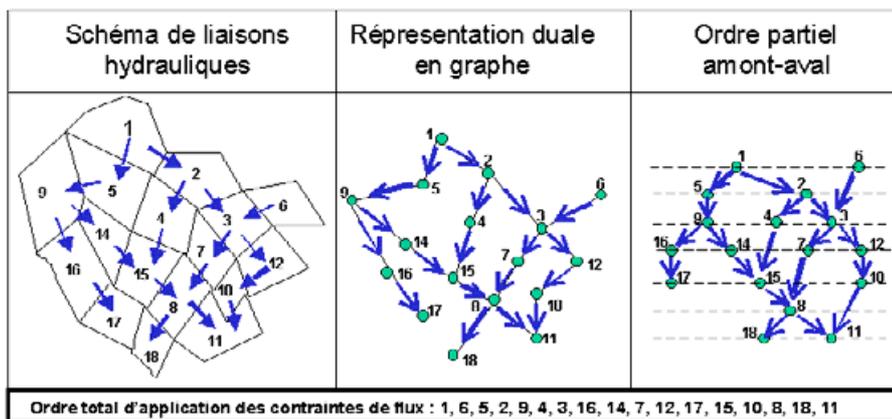


Figure 8-3 : création d'un ordre total d'application des contraintes, cas des flux

Malheureusement cet ordre total est perdu dès que les **équilibres**, relations non orientées, sont injectés dans le schéma d'analyse. Le problème est alors rendu nettement plus complexe. Une réflexion importante a donc porté sur la reconstruction d'un ordre adéquat d'application des contraintes qui permette d'appliquer chaque contrainte une fois et une seule, même en présence de relations d'équilibre.

## 8.4. Démarche générale retenue

### 8.4.1. Philosophie

La résolution du "flooding problem", *i.e.*, l'accession à la cohérence hydraulique, s'appuie sur les deux phases suivantes : **phase 1**) gestion des conflits ; **phase 2**) application des actions de rectification et resserrement des estimations issues de la cohérence hydraulique INTRA. Ce schéma général de résolution en deux étapes successives (*cf.*, Figure 7-2) constitue le fil directeur de la démarche.

La première étape cherche donc à éliminer les conflits INTRA ET INTER par l'application d'actions de relâchement sur les informations identifiées comme source des conflits. La gestion des conflits INTRA, qui est relativement simple puisque chaque conflit est localisé et indépendant des autres, est supposée réglée dans une première étape. Ensuite la gestion des conflits INTER, et notamment la **localisation** des sources d'informations de {Ne} et {H} incompatibles, est nettement plus délicate.

L'idée générale retenue est de s'appuyer sur les actions de rectification (*cf.*, § 7.4.3) pour aider la détection des compartiments contenant les sources d'informations {NE} incompatibles avec les circulations hydrauliques. Puisque ces actions de rectification agissent sur des bornes de même nature (Min ou Max), il est possible de les scinder en deux groupes : des "**actions Min**" et des "**actions Max**". L'application "brutale" de ces deux groupes d'actions permet d'établir, **de façon indépendante**, une cohérence hydraulique INTER pour les bornes Max appelée **enveloppe MAX** et une cohérence hydraulique INTER pour les bornes Min appelée **enveloppe Min**. Le résultat de l'application des actions Min (*resp.* actions Max) est une nouvelle estimation notée ENVMIN(*Ci*) (*resp.* ENVMAX(*Ci*)) pour chaque compartiment *Ci*. Deux cas peuvent se produire :

1. les estimations ENVMIN(*Ci*) sont inférieures à ENVMAX(*Ci*) pour chaque compartiment (*i.e.*, il n'y a pas apparition de conflit INTRA) ce qui signifie que les estimations enveloppes sont à la fois hydrauliquement cohérente INTRA et hydrauliquement cohérente INTER : il n'existait donc pas de sources de conflit INTER. Les estimations enveloppes forment donc la solution recherchée.

2. Il y a apparition de conflits INTRA ce qui signifie qu'il y avait des informations en conflit INTER. Il faut localiser les sources de conflit et les relâcher jusqu'à faire disparaître les conflits. Il est alors proposé de s'appuyer sur les enveloppes, résultat des actions de rectification, pour localiser les compartiments contenant les sources de conflit INTER, et ceci par l'étude des compartiments où sont apparus des conflits INTRA (démarche détaillée au § 8.6.3.1).

Puisque la détection de conflits INTRA (qui sont locaux) est triviale, l'efficacité de cette démarche repose essentiellement sur la définition d'un algorithme permettant de construire les enveloppes MIN et MAX.

Une fois les compartiments contenant les sources de conflit INTER détectés, il reste à **identifier**, au sein de ces compartiments, **les informations à relâcher effectivement** pour atteindre la cohérence hydraulique. Cela passe d'abord par l'identification des informations intervenant activement dans les conflits INTER. Parmi ces informations, seul le relâchement des informations jugées erronées (et donc responsable des conflits) est souhaité.

La Figure 8-4 illustre la démarche générale finalement utilisée. Son efficacité repose sur l'étroit entremêlement entre gestion des conflits et actions de rectification.

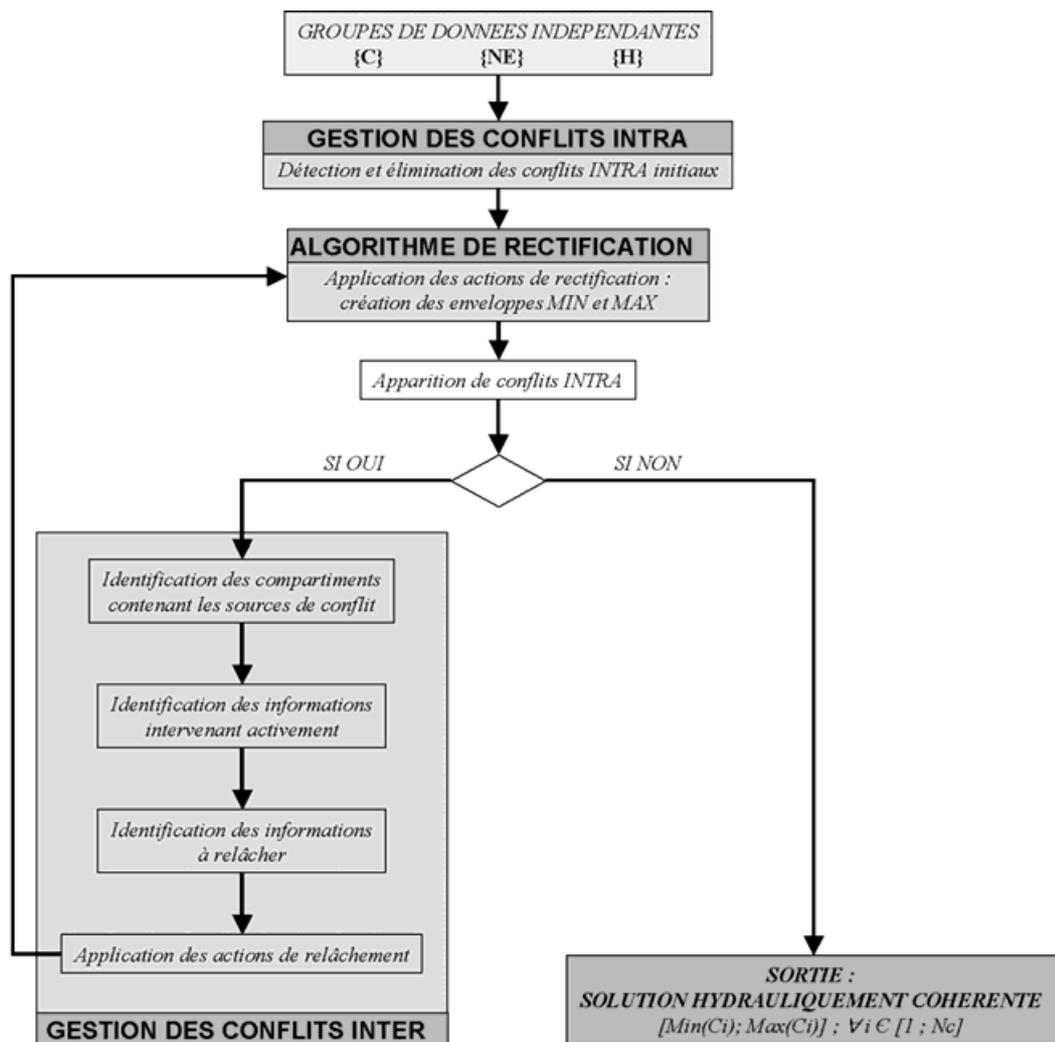


Figure 8-4 : stratégie de mise en cohérence hydraulique

### 8.4.2. Plan de présentation de cette démarche

Après avoir exposé les *différents choix retenus dans l'étape de gestion des conflits* dans un paragraphe préliminaire (cf., § 8.5), nous détaillons ensuite la *stratégie de mise en cohérence hydraulique* (cf., § 8.6) en séparant :

1. la gestion des conflits INTRA (cf., § 8.6.1) ;
2. l'algorithme de rectification (cf., § 8.6.2) ;
3. la gestion des conflits INTER (cf., § 8.6.3).

## 8.5. choix retenus dans l'étape de gestion des conflits

le propos de ce paragraphe est d'exposer et discuter les différents choix retenus dans l'étape de gestion des conflits :

- **choix du groupe d'informations modifiables** (et donc les contraintes associées) en cas de conflits. Pour rendre ce choix le moins subjectif possible, il est proposé d'étayer son jugement sur des considérations liées à la qualité des différents groupes d'informations. Ceci permet d'établir une hiérarchie de préférence entre ces groupes d'informations et de transformer ainsi le problème de fusion en un problème de révision.
- **choix du critère d'optimisation** pour orienter le choix de l'information à relâcher en cas de conflit. Il doit permettre de détecter et supprimer les seules informations erronées.
- **choix de la méthode de relâchement** pour éliminer les conflits. Ce choix repose sur l'analyse de la nature des imperfections de l'information révisable (cf., § 8.5.2).

### 8.5.1. Choix du groupe d'informations révisables

En cas de conflits, il est impératif de réviser, *i.e.*, remettre en cause la validité de certaines informations. Pour rendre le **choix des informations** (et donc les contraintes associées) qui seront modifiées le moins subjectif possible, des considérations liées à la qualité des différents groupes d'informations sont prises en compte. L'établissement d'une hiérarchie de qualité permet d'établir une préférence sur ces informations et de transformer ainsi le problème de fusion en un problème de révision.

#### 8.5.1.1. Hiérarchie de qualité des groupes de données

##### Le découpage de la plaine en compartiments {C}

Obtenu à partir de l'analyse de cartes, de visites de terrain et d'images de télédétection (pendant la crue et hors crue), ce groupe d'informations est censé ne pas présenter d'imperfections majeures. {C} est donc supposé **non révisable**, *i.e.*, ces informations ne seront pas remises en question.

##### Le schéma de connexions hydraulique entre compartiments {H}

Résultat de l'interprétation des photos aériennes de crue (et donc propre à la crue étudiée et à l'instant même de la prise de vue), éventuellement conforté par une analyse "logique" d'expert, ce groupe d'informations est supposé peu sujet à erreur. {H} est donc supposé suffisamment exact et fiable pour être considéré comme **non révisable**.

### Les indications de niveaux d'eau {NE}

Elles proviennent du mélange de données altimétriques et d'informations extraites des photographies en crue. Globalement, elles sont sensibles à deux types principaux d'imperfections. Le premier concerne la précision des données altimétriques (estimée de l'ordre du décimètre), sauf en de rares zones localisées où l'on peut observer des aberrations dues à des erreurs grossières (*e.g.*, erreur de saisie, mesure de l'altitude du sursol et non du sol lors de techniques par auto-corrélation automatique). Mais la majeure partie de l'imperfection est supposée provenir des données extraites des photos aériennes en crue. Pour la valorisation d'objets plus ou moins émergents, les sources d'imperfections peuvent venir de la connaissance approximative de la hauteur de l'objet, de la détermination du degré de submersion et du passage de l'information locale à une information concernant l'ensemble du compartiment. Pour la valorisation des points cotés, les imperfections peuvent provenir de l'imprécision sur la valeur altimétrique, et de l'imprécision sur la position des limites qui se retranscrit sur l'affectation en point immergé ou point émergé. Du fait de ces différentes considérations, les informations issues de cette source, bien que très majoritairement exactes, apparaissent les plus prédisposées à présenter des inexactitudes. Au final, {NE} constitue la seule source d'information **révisable**. Une information de ce groupe peut d'autant plus être remise en question que le degré de préférence qui la qualifie est faible.

#### 8.5.1.2. Conséquences en terme de révision

Cette présentation très rapide de la qualité des données utilisées amène à considérer comme exact et stable la délimitation en compartiment, et à préférer (dans le sens d'accorder plus de confiance) le schéma de circulations hydrauliques par rapport aux indications de niveaux d'eau. De ce fait, lorsqu'un conflit INTER sera détecté, la révision portera uniquement sur les indications de niveaux d'eau. Bien entendu, le conflit INTRA sera également résolu par relâchement des indications de niveaux d'eau. La hiérarchie ainsi définie entre les différents groupes d'informations peut être interprétée comme un enracinement épistémique (*cf.*, 3.2.2.3.4) où seule la couche superficielle constituée des informations {NE} peut être remise en cause. Si l'on intègre le degré de préférence attribué à chaque information de {NE}, on obtient l'enracinement épistémique illustré par la Figure 8-5 : le cœur constitué de {C} et {H} (*i.e.*, structure hydrodynamique) se voit attribuer un degré de préférence absolue et un caractère non révisable, puis différentes couches d'informations {NE} présentent des degrés de préférence qui décroissent du centre vers la périphérie.

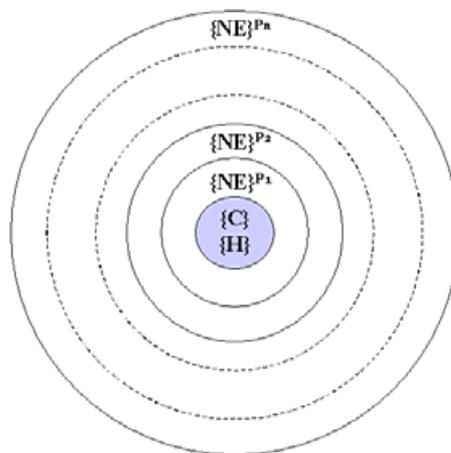


Figure 8-5 : enracinement épistémique de la base de connaissances

### 8.5.2. Choix de la méthode de relâchement

Une étude sommaire de la qualité des groupes de données rentrant dans le schéma de fusion (cf., 8.5.1.1) a conduit à considérer révisables les seules informations {NE}. En cas de présence de conflits, des actions de révision appelées relâchement (pour relâchement de contraintes) doivent être menées pour ramener la compatibilité hydraulique, *i.e.*, rendre le CSP équivalent consistant.

Deux méthodes de relâchement des données {NE} ont été envisagées :

1. **relâchement par valeur fixe** ; l'information jugée erronée est modifiée d'une valeur fixe  $\Delta Z$ , par addition pour un majorant (*i.e.*,  $M$  dévient  $M + \Delta Z$ ) et par soustraction pour un minorant (*i.e.*,  $m$  dévient  $m - \Delta Z$ ), jusqu'à élimination du conflit ;
2. **relâchement par retrait** ; l'information jugée erronée est retirée de la liste des minorants/majorants, le processus étant réitéré jusqu'à ce que le nouveau couple  $[\text{Min}(Ci) ; \text{Max}(Ci)]$  ne soit plus à l'origine d'un conflit.

Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes doit être orienté par la nature des imperfections de l'information que l'on considère comme révisable (ici {NE}) :

- si elle est soupçonnée être uniquement entachée d'imprécision, alors il "suffit" de rendre un peu moins forte la contrainte associée et la première méthode est préférée ;
- si elle est soupçonnée comporter des erreurs grossières (*i.e.*, aberrations), alors il est alors préférable de retirer complètement la contrainte associée (ou éventuellement la placer dans un degré de préférence plus faible).

Dans les deux cas, l'ensemble des minorants et majorants associés à chaque compartiment doit être conservé et géré, puisque le relâchement, même par valeur fixe, peut modifier l'affectation des Min et Max réalisée par les équations  $\text{Max}(Ci) = \text{INF} \{ M_{Ci} \}$  et  $\text{Min}(Ci) = \text{SUP} \{ m_{Ci} \}$ .

*Les deux méthodes ont été programmées dans l'algorithme final, laissant le choix à l'utilisateur. La sensibilité du résultat à ce choix est abordée § 12.2 après les avoir tester toutes les deux sur le site de l'Aisne.*

### 8.5.3. Choix du critère d'optimisation

La stratégie retenue pour éliminer les conflits se base sur le critère, classique en révision de connaissances, de **changement minimal de la base d'informations** (économie d'informations).

Le choix de ce critère s'explique par le fait que :

- les informations erronées que l'on souhaite éliminer par cette procédure sont en faible nombre (hypothèse que les informations sont très majoritairement exactes) ;
- les estimations recherchées doivent être les plus précises possibles (donc le nombre de relâchement doit être aussi limité que possible).

Il constitue donc le **critère d'optimisation** que la stratégie de gestion des conflits doit vérifier.

## 8.6. stratégie de mise en cohérence hydraulique

Ce paragraphe expose la **stratégie générale déployée pour atteindre la cohérence hydraulique**, valable quelle que soit l'alternative retenue pour la méthode de relâchement.

Pour faciliter la compréhension de la démarche retenue, les différents degrés de préférence (*i.e.*,  $P_j$  ;  $1 \leq j \leq n$ ) qualifiant les informations  $\{N_e\}$  sont supposés tous identiques (cas  $n = 1$ ). Leur prise en compte est clairement explicitée au § 8.6.5 sous forme de deux degrés de préférence (*i.e.*,  $n = 2$ ) facilement généralisables à un nombre  $n$  quelconque.

### 8.6.1. Gestion des conflits INTRA initiaux

Le conflit INTRA étant localisé, sa détection est facile et se fait compartiment par compartiment par le test de l'équation *Eq. 7-2*. Pour cette raison, la procédure de gestion des conflits INTRA initiaux est présenté pour un seul compartiment  $C_i$ .

Les informations intervenant activement dans le conflit sont le (ou les) plus petit(s) majorant(s) et le (ou les) plus grand(s) minorants(s) rattachés au compartiment  $C_i$  concerné. Leur identification est aisée puisqu'elle ne nécessite qu'une procédure de tri.

L'identification des informations à relâcher effectivement est par contre plus délicate puisqu'aucune indication ne permet de favoriser une information  $\{NE\}$  par rapport à l'autre (il est rappelé que seules les indications  $\{NE\}$  appartenant au même degré de préférence sont considérées à ce stade). Il a donc été choisi de les relâcher toutes, et de chercher à les récupérer par la suite.

Le relâchement est réitéré jusqu'à disparition du conflit dans le compartiment (*cf.*, *Figure 8-6*). Rappelons que le nombre de conflits total (donc INTRA) est supposé être faible.

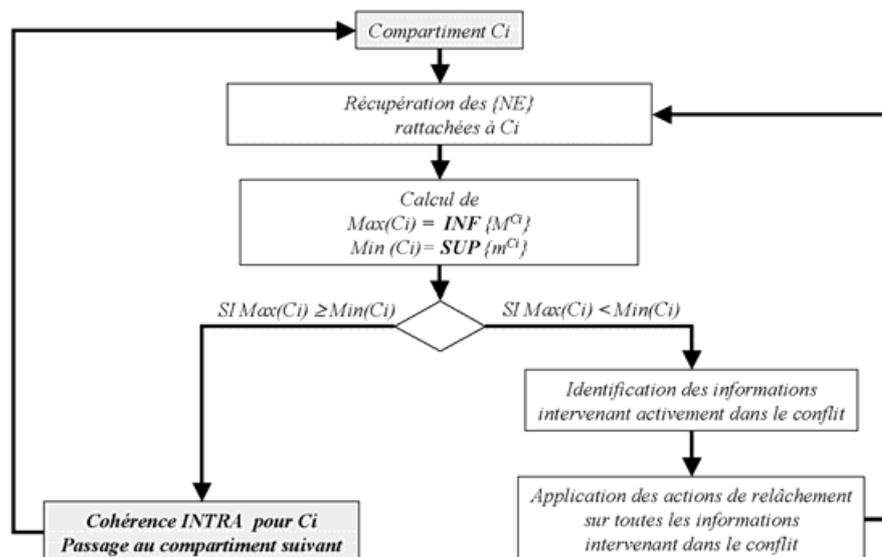


Figure 8-6 : organigramme de gestion des conflits INTRA initiaux

Dans la suite, la gestion des conflits INTRA initiaux est supposée achevée. La cohérence INTRA initiale est donc acquise.

### 8.6.2. Algorithme(s) de rectification

La propagation de l'ensemble des actions Min (*resp.* actions Max) de rectification pour déterminer l'enveloppe Min (*resp.* l'enveloppe Max) n'est pas une tâche facile puisque ces actions sont toutes inter-dépendantes. La définition d'un algorithme efficace (appelé **algorithme de rectification**) permettant de réaliser cette tâche est cependant primordiale dans notre stratégie puisqu'il conditionne,

non seulement le passage de la compatibilité hydraulique à la cohérence hydraulique, mais également l'efficacité de l'étape de gestion des conflits INTER.

*Les algorithmes présentés ci-dessous répondent à ce besoin en permettant d'ordonnancer les actions de rectification afin que chaque action puisse être appliquée une fois et une seule.*

La prise en compte de deux cas, correspondant à une graduation dans la complexité du problème, a été jugée utile.

#### 8.6.2.1.1 Cas 1 : simplification des équilibres ( $\delta = 0$ )

Supposons que les relations d'équilibre puissent être simplifiées par des relations d'égalité stricte et non plus approximative (*i.e.*,  $\delta = 0$  dans les équations *Eq. 7-5*, *Eq. 7-7* et *Eq. 7-10*). La simplification peut être plus ou moins justifiée selon le type de crue étudiée, le nombre maximum de compartiments connexes directement interconnectés par des relations d'équilibre, la précision recherchée...

Les compartiments interconnectés par des relations d'équilibre, regroupés dans des "**blocs d'équilibre**", peuvent alors être gérés comme des entités à cote unique, appelées "**super-compartiments**".

Ainsi le schéma de circulations ne comporte plus que des flux ce qui permet de retrouver un graphe causal et de créer un **ordre total stable** tout au long du calcul (*cf.*, *Figure 8-3*) pour l'organisation de l'application des contraintes INTER. Les actions de rectification se limitent alors à l'équation *Eq. 7-9*. Le calcul des enveloppes MAX (*resp.* MIN) se fait ensuite par une unique **propagation de l'amont vers l'aval** (*resp.* de l'aval par l'amont) comme l'illustre la Figure 8-7.

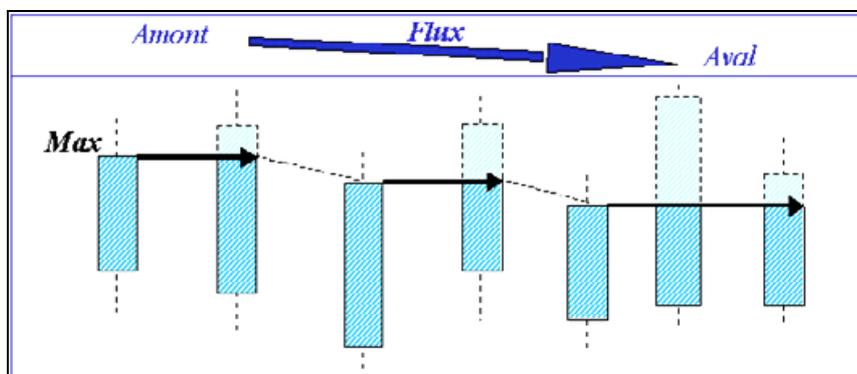


Figure 8-7 : construction de l'enveloppe MAX (3 rectifications de Max sur 7 compartiments)

Cette technique d'application des actions de rectification fait appel à un **algorithme de balayage** qui sera utilisé **d'amont en aval pour les bornes Max** et **d'aval en amont pour les bornes Min**. En suivant cet ordre, chaque action de rectification peut être appliquée une fois et une seule (*cf.*, **Algorithme A0**, cas 1).

#### 8.6.2.1.2 Cas 2 : sans simplification des équilibres (avec $\delta > 0$ )

Si les relations d'équilibre ne peuvent être simplifiées (*i.e.*,  $\delta > 0$  dans les équations *Eq. 7-5*, *Eq. 7-7* et *Eq. 7-10*), le schéma de circulations comporte à la fois des flux et des équilibres. Il n'existe donc plus d'ordre total stable pour le calcul : il faut redéfinir une stratégie permettant d'établir un ordonnancement des calculs sans quoi chaque action doit être appliquée plusieurs fois jusqu'à stabilisation des calculs.

L'ordonnancement des calculs pour établir l'enveloppe MAX (*resp.* enveloppe MIN) devient alors tributaire des valeurs de  $Max(C_i)$  (*resp.*  $Min(C_i)$ ) de chaque compartiment. Il doit donc être **recalculé** chaque fois que la valeur d'une borne  $Min(C_i)$  (*resp.*  $Max(C_i)$ ) est réévaluée. L'algorithme défini pour cela (*cf.*, **Algorithme AO, cas 2**) a été élaboré dans le cadre du projet européen REVIGIS, notamment grâce à une collaboration avec Nic Wilson de l'Université de Keele (*cf.*, [Puech et al., 2002]). L'idée sous-jacente à cet algorithme est que le compartiment ayant l'estimation  $Max(C_i)$  la plus faible ne peut être affecté par aucune contrainte INTER, qu'elle provienne d'un flux ou d'un équilibre. On cherche donc le compartiment  $C_i$  ayant l'estimation  $Max(C_i)$  la plus faible pour l'affecter à la valeur de l'enveloppe de ce compartiment. Comme la valeur de l'enveloppe du compartiment  $C_i$  ne peut en aucun cas être remise en cause, les contraintes de flux et d'équilibre liées à ce compartiment peuvent être appliquées une fois pour toute. Il suffit alors de réitérer le procédé en excluant les compartiments (et les actions de rectification qui lui sont liés) déjà traités. Grâce à cet algorithme, chaque action Max de rectification peut être appliquée une fois et une seule.

L'algorithme de rectification permettant de construire l'enveloppe MIN est parfaitement symétrique.

### 8.6.2.1.3 Algorithmes

Finalement les algorithmes de rectification suivants ont été retenus :

<b>Algorithme AO (calcul de l'enveloppe MAX)</b>	
<b>Cas 1 : équilibre simplifié (<math>\delta = 0</math>)</b>	<p><i>Soit</i> <math>V = \{C_i\}, i \in [1; N_c]</math></p> <p><i>Réordonne</i> <math>V</math> sur un ordre total amont-aval (<i>cf.</i>, Figure 8-3) tq <math>C_1 \rightarrow C_2 \rightarrow \dots \rightarrow C_{N_c}</math></p> <p><i>Effectue le balayage amont→aval bâti sur l'ordre total, i.e.,</i></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>ENVMAX(C_1) = Max(C_1)</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>i = 1</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><i>Tant que</i> <math>i &lt; N_c</math></p> <p style="padding-left: 80px;"><math>ENVMAX(C_{i+1}) = INF\{ENVMAX(C_i); MAX(C_{i+1})\}</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>i = i + 1</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><i>Fin tant que</i></p>
<b>Cas 2 : équilibre non simplifié (<math>\delta &gt; 0</math>)</b>	<p><i>Soit</i> <math>V = \{C_{ij}\}, i \in [1; N_c]</math></p> <p><i>Tant que</i> <math>V \neq \emptyset</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><i>Sélectionne</i> <math>C_i \in V</math> tq <math>Max(C_i)</math> minimal et affecte <math>Max(C_i)</math> à <math>ENVMAX(C_i)</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><i>Sélectionne tout</i> <math>C_j \in V</math> tq <math>C_i \rightarrow C_j</math> ou <math>C_i \leftrightarrow C_j</math></p> <p style="padding-left: 80px;"><i>Si</i> <math>C_i \rightarrow C_j</math> alors <math>ENVMAX(C_j) = ENVMAX(C_i)</math></p> <p style="padding-left: 80px;"><i>Si</i> <math>C_i \leftrightarrow C_j</math> alors <math>ENVMAX(C_j) = INF\{ENVMAX(C_i) + \delta; MAX(C_j)\}</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><math>V = V - \{C_i\}</math></p> <p style="padding-left: 40px;"><i>Fin tant que</i></p>

### 8.6.3. Gestion des conflits INTER

#### 8.6.3.1. Localisation des compartiments contenant les sources de conflit INTER

##### 8.6.3.1.1 Cas 1 : simplification des équilibres ( $\delta = 0$ )

La stratégie retenue pour détecter efficacement les conflits INTER suit l'**Algorithme A1** suivant :

<b>Algorithme A1</b> <b>(stratégie de détection des conflits INTER)</b>
----------------------------------------------------------------------------

- |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. <i>propagation des actions de rectification concernant les bornes <math>Max(C_i)</math>, <math>\forall i \in [1; N_c]</math> (cf., <b>Algorithme A0</b> pour les Max)</i></li> <li>2. <i>propagation des actions de rectification concernant les bornes <math>Min(C_i)</math>, <math>\forall i \in [1; N_c]</math> (cf., <b>Algorithme A0</b> pour les Min)</i></li> <li>3. <i>test de l'existence de conflit INTRA (Eq. 7-2) sur les résultats <math>Min(C_i)</math> et <math>Max(C_i)</math> obtenus</i></li> </ol> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

On applique d'abord et **de façon indépendante** l'ensemble des actions de rectification agissant sur la borne Max et sur la borne Min grâce aux **balayages amont-aval** et **aval-amont** établis précédemment (cf., § 8.6.2.1.1). Chaque compartiment  $C_i$  se voit affecté d'une estimation temporaire  $ENVMIN(C_i)$  et  $ENVMAX(C_i)$  qui peut présenter les deux configurations suivantes :

1. les deux enveloppes ne présentent pas d'intersection (l'enveloppe MAX étant au dessus de l'enveloppe MIN), alors les estimations [ $ENVMIN(C_i)$ ;  $ENVMAX(C_i)$ ] obtenues après application des actions de rectification constituent la solution recherchée.
2. dans le cas contraire, l'existence d'intersections entre les deux enveloppes révèle la présence d'au moins un conflit INTER puisque l'enveloppe MIN passe au dessus de l'enveloppe MAX.

Un **test d'apparition de conflit INTRA** (cf., Eq. 7-2) permet aisément d'identifier les compartiments pour lesquels  $ENVMIN(C_i) > ENVMAX(C_i)$ .

Des groupes d'au moins deux compartiments se distinguent alors (cf., Figure 8-8), faisant apparaître un compartiment  $C_{amont}$  à l'amont et un compartiment  $C_{aval}$  à l'aval. Ce sont ces deux compartiments qui contiennent les informations {NE} à l'origine du conflit INTER. En effet, le compartiment  $C_{amont}$  contient une information de type **majorant qui impose sa valeur à l'enveloppe MAX sur toute la longueur du conflit**. Autrement dit, la valeur de l'enveloppe MAX est imposée par une information  $M_{C_{amont}}$  : celle-ci est dite **active** pour le conflit INTER. Le compartiment  $C_{amont}$  a donc la propriété d'avoir une valeur de son enveloppe MAX (calculée après application des actions de rectification) identique à sa valeur  $Max(C_{amont})$  avant application des actions de rectification, *i.e.*,  $ENVMAX(C_{amont}) = Max(C_{amont})$ . Il est le seul compartiment du conflit INTER à avoir cette propriété puisqu'elle impose, par propagation, la valeur de l'enveloppe MAX pour tous les autres compartiments concernés par le conflit.

De la même façon, le compartiment  $C_{aval}$  contient une information de type **minorant**  $m_{C_{aval}}$ , **active** puisqu'elle impose sa valeur à l'enveloppe MIN sur toute la longueur du conflit. Le compartiment  $C_{aval}$  est le seul concerné par le conflit qui vérifie la propriété  $ENVMIN(C_{aval}) = \text{Min}(C_{aval})$ .

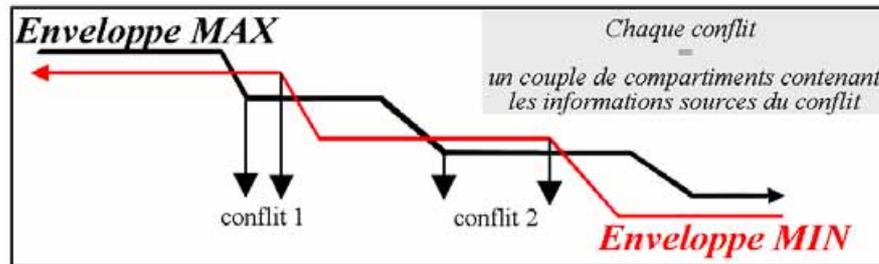


Figure 8-8 : localisation des conflits et identification des compartiments contenant les informations sources de conflit INTER

#### 8.6.3.1.2 Cas 2 : sans simplification des équilibres (avec $\delta > 0$ )

La même méthode est utilisée si les équilibres ne sont pas traités de manière simplifiée (*i.e.*,  $\delta > 0$ ). La seule adaptation consiste à regrouper préalablement les compartiments liés par une relation d'équilibre dans les "blocs d'équilibre" et de réaliser la cohérence INTRA sur ces blocs. Les équilibres sont ainsi "masqués" et la stratégie de balayage devient efficace.

Dans ce cas, les compartiments  $C_{amont}$  et  $C_{aval}$  identifiés comme contenant les sources de conflit INTER peuvent en réalité être des "blocs d'équilibre".

#### 8.6.3.2. Informations intervenant activement dans les conflits INTER

On a vu précédemment que deux compartiments  $C_{amont}$  et  $C_{aval}$  contenant l'information  $m$  ou  $M$  **active**, *i.e.*, à l'origine du conflit, peuvent être identifiés.

Pour le compartiment amont  $C_{amont}$ , l'information **active** est de type majorant. Si les équilibres sont traités de manière simplifiée (*i.e.*,  $\delta = 0$ ) l'information active, qui vaut  $EnvMac(C_{amont}) = \text{Max}(C_{amont})$ , est facilement identifiée dans la liste des majorants de ce compartiment, *i.e.*,  $M_{C_{amont}}$ . Si les équilibres ne sont pas traités de manière simplifiée (*i.e.*,  $\delta > 0$ ) et qu'un bloc d'équilibre est identifié comme contenant l'information source du conflit à l'amont, l'information active, qui vaut  $ENVMAX(C_{amont}) = \text{Max}(C_{amont}) - k*\delta$  (avec  $k$  entier positif ou nul), est recherchée dans la liste des majorants des compartiments interconnectés par des relations d'équilibre.

Pour  $C_{aval}$ , l'information à l'origine du conflit, de type majorant  $m_{C_{aval}}$ , est identifiée de façon similaire.

**Les sources d'informations à l'origine du conflit ainsi identifiées**, il reste à définir une stratégie d'application des actions de relâchement qui conduise aux estimations hydrauliquement cohérentes les plus resserrées possibles.

#### 8.6.3.3. Informations {NE} à relâcher

Comme les actions de révision conduisent à agrandir les plages d'estimation de la cote de l'eau (*cf.*, § 8.5.2), il faut veiller à limiter le nombre de relâchements. Le critère de **changement minimal** retenu pour optimiser la procédure de gestion des conflits nécessite de repérer l'ensemble maximal consistant (ou son complémentaire, *i.e.*, l'ensemble minimal inconsistant à relâcher). Ceci correspond au choix d'une fonction de contraction de type maxichoix car un seul sous-ensemble maximal

consistant est recherché : celui correspondant aux estimations  $[\text{Min}(C_i) ; \text{Max}(C_i)]$  les plus resserrées (solution hydrauliquement cohérente optimale au problème).

L'idée que l'information la plus perturbatrice doit être relâchée de façon préférentielle constitue la base de la satisfaction de ce critère d'optimisation. L'effet perturbateur d'une information a été évalué par un test sur l'évolution du nombre de compartiments concernés par le conflit, appelé *étendue du conflit*, lorsque l'on relâche cette information. La démarche est transcrite par l'**Algorithme A2** suivant :

**Algorithme A2**  
**(choix de l'information à relâcher)**

*Soit  $M_{C_{amont}}$  et  $m_{C_{aval}}$  deux informations responsables d'un conflit*

- 1. on relâche  $M_{C_{amont}}$ , on regarde l'étendue de la zone de conflit restante et on remet  $M_{C_{amont}}$  à l'état antécédent*
- 2. idem avec  $m_{C_{aval}}$*
- 3. on relâche finalement l'information dont le relâchement conduit à la zone de conflit la plus restreinte\* (i.e., information la plus perturbatrice).*
- 4. on réitère le processus jusqu'à élimination complète de la zone de conflit*

\*En cas de départage impossible, l'utilisateur peut choisir soit de relâcher aléatoirement l'une ou l'autre des deux informations, soit de relâcher les deux informations (dans le cas du relâchement par retrait, les informations relâchées pourront être réintégrées, cf., § 8.7)

#### 8.6.3.4. **Ordre de traitement des conflits INTER**

Dans la majorité des cas, les conflits sont disjoints (cf., Figure 8-8). Comme les compartiments concernés par le conflit INTER sont compris entre le couple de compartiment  $C_{amont}$  et  $C_{aval}$ , les conflits sont indépendants et peuvent donc être traités séparément, les uns après les autres. Il suffit donc d'identifier le premier conflit, de le traiter par relâchement jusqu'à disparition du conflit, puis de passer au conflit suivant. Si un super-compartiment est identifié comme contenant une information source de conflit INTER, il convient de chercher la source du conflit parmi l'ensemble des compartiments le composant.

Dans de rares cas toutefois, plusieurs conflits INTER peuvent être imbriqués, i.e., un compartiment amont  $C_{amont}$  (resp.  $C_{aval}$ ) peut être responsable de plusieurs conflits sur des branches de défluence (resp. confluence). Si tel est le cas, le premier conflit traité est celui correspondant à la branche qui impose la valeur  $\text{ENVMIN}(C_i)$  (resp.  $\text{ENVMAX}(C_i)$ ) à ce compartiment : on traite d'abord le conflit qui génère l'inversion des courbes "Enveloppes" de plus forte amplitude. Une solution optionnelle permet d'imposer le relâchement de l'information active du compartiment générant un conflit sur plusieurs branches.

#### 8.6.4. **Application des actions de rectification**

Une fois tous les conflits INTER éliminés, les actions de rectification sont mises en place de façon définitive avec l'**Algorithme A0** afin de propager les contraintes sur l'ensemble des compartiments et obtenir ainsi la solution  $[\text{Min}(C_i) ; \text{Max}(C_i)]$  hydrauliquement cohérente la plus resserrée possible.

### 8.6.5. Traitement de multiples degrés de préférence

Le principe de la prise en compte de différents degrés de préférence est le suivant (*cf.*, Figure 8-9 pour le cas de deux niveaux,  $P_1 = \text{"s\^ur"}$  et  $P_2 = \text{"moins s\^ur"}$ ) : on considère d'abord les seules indications {NE} ayant le degré de préférence le plus élevé (*i.e.*,  $P_1$ ) sur lesquelles on exécute les différentes phases de résolution du CSP. Une première estimation fiable doit être obtenue avec très peu de relâchements. Si le nombre de relâchements excède un certain seuil (*e.g.*, 5 %), la base de données initiales est trop erronée pour permettre de déterminer une estimation fiable et le processus doit être stoppé. Dans le cas contraire, une première estimation est établie. Nous considérons alors que cette première estimation, obtenue avec les données les plus sûres, ne peut en aucun cas être remise en cause par l'ajout de données ayant un degré de préférence plus faible. C'est pourquoi la prise en compte des indications de degré de préférence inférieur (*i.e.*,  $P_2$ ) se limite à celles comprises dans la plage de la première estimation. On fait alors subir à cette sélection les différentes phases de résolution du CSP, en bornant le domaine de variation des nouvelles estimations Min et Max par les résultats issus de la première estimation. Une nouvelle estimation est alors obtenue, plus restreinte et nécessairement comprise dans la précédente. Ce processus est généralisable avec un nombre  $n$  quelconque de degrés de préférence.

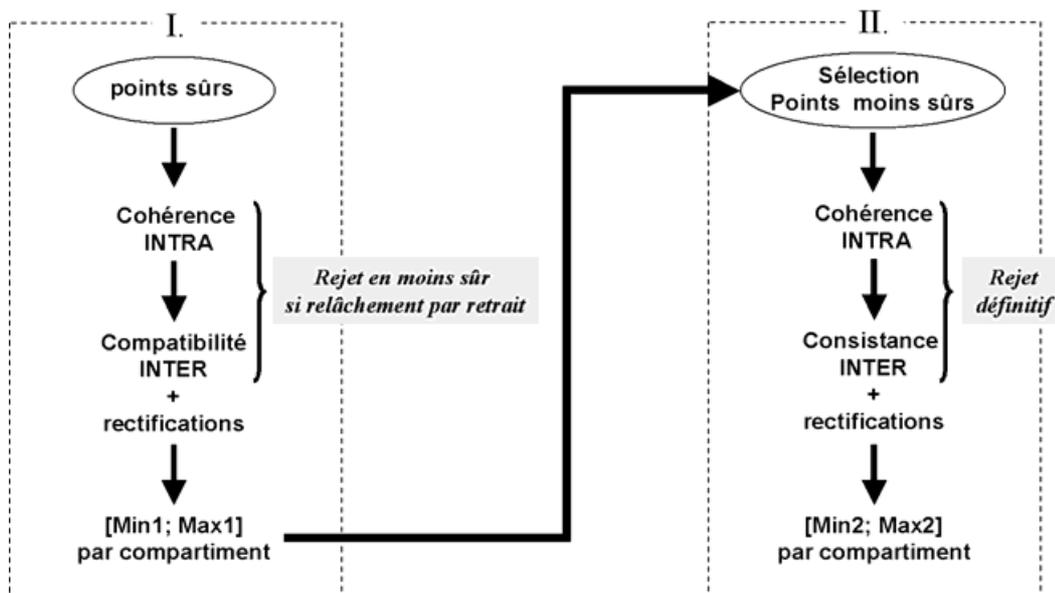


Figure 8-9 : schéma général de l'algorithme proposé pour deux degrés de préférence

### 8.7. Algorithme général proposé pour la résolution du CSP

L'algorithme général (*cf.*, **Algorithme A3**) proposé et développé en **Visual Basic pour Access** fait appel aux différents concepts et algorithmes présentés ci-dessus. Il intègre les différents degrés de préférence sur la base de données initiales, degrés assimilables à un enracinement épistémique (*cf.*, Figure 8-5). Bien sûr, la condition d'acceptation du processus doit être de moins en moins stricte au fur et à mesure que le degré de préférence des indications {NE} décroît.

Enfin, si le mode de relâchement retenu est le rejet (*cf.*, § 8.5.2), il est possible de passer l'information du degré de préférence en cours vers le degré de préférence directement inférieur (*i.e.*, passage de l'indication du niveau  $P_j$  au niveau  $P_{j+1}$ ).

**Algorithme A3**  
(algorithme général, équilibre simplifié ou non simplifié)

Soit  $D_i = [Binf(i); Bsup(i)]$  le domaine de variation possible de la cote de l'eau pour  $C_i$

$$\forall i \in [1; Nc] \text{ alors } Binf(i) = \hat{Z}_{TN}^{comp} \text{ et } Bsup(i) = \hat{Z}_{TN}^{comp} + \Omega$$

**Tant que  $j \leq n$**

INITIALISATION DES VALEURS Min et Max

1.  $\forall i \in [1; Nc]$ ,  $Min(C_i) = SUP\{Binf(i); SUP\{m_{C_i}^{P_j}\}\}$   
et  $Max(C_i) = INF\{Bsup(C_i); INF\{M_{C_i}^{P_j}\}\}$

GESTION DES CONFLITS INTRA

2. Test de Eq. 7-2 (existence d'un conflit INTRA)

Si OUI : relâchement de  $m_{C_i}^{P_j}$  et  $M_{C_i}^{P_j}$  responsables (passage en niveau  $P_{j+1}$ )

Si NON : la cohérence INTRA est directement acquise

Le résultat est une estimation préliminaire  $[Min(C_i); Max(C_i)]$

GESTION DES CONFLITS INTER

3. Propagation des actions de rectification pour les Max (cf., **Algorithme A0**)

Le résultat est le calcul de l'enveloppe MAX par balayage :  $\{ENVMAX(C_i)\}$  pour  $i \in [1; Nc]$

4. Propagation des actions de rectification pour les Min (idem **Algorithme A0**)

Le résultat est le calcul de l'enveloppe MIN par balayage :  $\{ENVMIN(C_i)\}$  pour  $i \in [1; Nc]$

5. Recherche des intersections entre l'enveloppe MAX et l'enveloppe MIN

Si pas (ou plus) de conflit **alors** aller à l'étape 6

Si détection d'un conflit **alors**

5.1. Recherche des informations  $M_{C_{amont}}^{P_j}$  et  $m_{C_{aval}}^{P_j}$  actives

5.2. Test de l'information la plus perturbatrice (cf., **Algorithme A2**)

5.3. Relâchement de cette information (si méthode de relâchement = retrait  
alors passage de l'information au niveau  $P_{j+1}$ )

5.4. Revenir à l'étape 3

TEST DE VALIDITÉ

6. Calcul du nombre de conflits et de relâchements effectués pour ce niveau  $P_j$

Si nombre trop élevé => SORTIE, résultat non significatif

Sinon on continue (étape 7.)

RÉCUPÉRATION DE LA SOLUTION HYDRAULIQUEMENT COHÉRENTE

7.  $\forall i \in [1; Nc]$  alors  $Min(C_i) = ENVMIN(C_i)$  et  $Max(C_i) = ENVMAX(C_i)$

8.  $\forall i \in [1; Nc]$  alors  $Binf(i) = Min(C_i)$  et  $Bsup(i) = Max(C_i)$

**Fin tant que**

## 8.8. Conclusion

L'**Algorithme A3** proposé dans ce chapitre a été développé (sous Visual Basic) pour répondre à la problématique du "flooding problem", *i.e.*, mettre en cohérence hydraulique en un temps raisonnable (de l'ordre de quelques minutes à quelques heures) un ensemble d'informations extraites de photographies aériennes prises au cours d'une inondation pour approcher, le plus précisément possible, la cote réelle de l'eau en tout point du champ d'inondation. **En s'appuyant fortement sur les spécificités de l'application hydraulique**, il a été conçu pour éviter de tester tous les cas possibles.

Son efficacité en terme de **temps de calcul** est avant tout basée sur la définition de procédures d'ordonnancement des actions de rectification (*cf.*, procédure par balayage et **Algorithme A1** élaboré dans le cadre du projet européen REVIGIS) permettant d'appliquer chaque action de rectification une fois et une seule. La gestion combinée de la phase de gestion des conflits et de la phase de rectification a également permis d'optimiser la phase de détection et de localisation des sources de conflit. Cette idée pourrait être reprise dans d'autres problèmes de révision.

Son efficacité pour gérer les conflits (*i.e.*, contraction en révision ou établissement de la consistance d'un CSP) doit être évaluée en fonction du critère d'optimisation retenu, *i.e.*, changement minimum de la base de faits (*cf.*, § 8.5.3). Une fois le choix inévitable du groupe d'informations révisables et de la méthode de relâchement (deux alternatives sont programmées dans l'algorithme), la difficulté majeure pour respecter ce critère d'optimisation est d'appliquer les actions de relâchement sur les seules informations erronées. La question de l'influence de l'ordre d'application des actions s'est posée. Heureusement, le choix de l'ordre de traitement des différents conflits a peu d'influence dans la majeure partie des cas puisque les conflits sont très souvent dissociés et peuvent donc être traités de façon indépendante. Seul le cas peu fréquent où les conflits sont enchevêtrés (*cf.*, § 8.6.3.4, conflits sur plusieurs branches) a nécessité de définir un choix plus ou moins arbitraire. S'est ensuite posé le problème de savoir quelle information relâcher parmi celles intervenant activement dans un conflit identifié. La réponse proposée est de relâcher l'information la plus perturbatrice en s'appuyant sur un critère d'étendue du conflit (*cf.*, § 8.6.3.3). Lorsque ce critère ne permet pas de départager les informations concernées, il a été choisi de les relâcher toutes. Ces deux choix peuvent faire en sorte que la solution établie par notre algorithme n'est pas strictement optimale. Cependant il ne faut pas oublier que le nombre de conflits doit être très faible (sans quoi les données de télédétection sont fortement erronées et la méthode n'a plus de justification). Si tel est le cas, le fait que la procédure de gestion des conflits ne soit pas strictement optimale a des conséquences minimales sur les résultats. La procédure est donc tout à fait suffisante d'un point de vue du résultat hydraulique.

La prise en compte des degrés de préférence au sein même du groupe d'informations révisables {NE}, constitue une approche intéressante permettant de gérer la qualité des données de façon globale.

En terme de validité du résultat, le nombre de conflits initialement détectés est un bon estimateur de la qualité des informations extraites des images de télédétection. Le nombre de relâchements nécessaires pour établir la compatibilité hydraulique des informations constitue une première garantie des résultats qui seront obtenus. Cette phase constitue une sorte de validation "interne".

Enfin, la comparaison des résultats avec des données de référence, dès que celles-ci existent, doit être entreprise pour vérifier l'exactitude du résultat de cette "**approche-photo**" (*cf.*, § 11.3). Mais auparavant, il semble opportun d'illustrer la méthodologie développée sur les différents sites d'études retenus (*cf.*, § partie IV).

----- oOo -----



**PARTIE IV :**  
**Applications et illustrations**  
**de "l'approche-photo"**  
**sur les trois sites d'étude**

**Chapitre 9 : Phase de télédétection**

**Chapitre 10 : Phase de mise en cohérence**

## Sommaire de la PARTIE IV

<b>9. PHASE DE TÉLÉDÉTECTION .....</b>	<b>153</b>
9.1. Introduction .....	153
9.2. Création d'une base de données géographiques .....	153
9.3. Élaboration des structures hydrodynamiques .....	156
9.4. Extraction des indications altimétriques {NE} sur le toit de l'eau .....	161
<b>10. PHASE DE MISE EN COHÉRENCE .....</b>	<b>171</b>
10.1. Introduction .....	171
10.2. Indicateur retenu de précision des estimations .....	171
10.3. Exemple de déroulement de l'algorithme pour la Moselle .....	171
10.4. Déroulement de l'algorithme sur chaque site .....	174
10.5. Résultats finaux .....	175
10.6. Résultats 3D .....	176

## 9. Phase de télédétection

### 9.1. Introduction

Ce chapitre illustre la méthodologie d'exploitation des photographies aériennes prises en crue sur les trois sites d'étude retenus pour son expérimentation (*cf.*, § 5). Il porte sur la partie "extraction des informations de télédétection". La partie algorithmique de fusion et mise en cohérence est traitée dans le chapitre suivant (*cf.*, § 10) en même temps que la présentation des résultats finaux concernant la caractérisation des niveaux d'eau.

Les illustrations des différentes phases empruntent des exemples tirés des trois sites d'étude pour les mettre en parallèle et bien faire ressortir les répercussions des différences contextuelles qui existent entre les sites.

### 9.2. Création d'une base de données géographiques

#### 9.2.1. Un référentiel cartographique de type orthophotoplan

L'orthophotoplan (*cf.*, A4\_4) est indéniablement le référentiel cartographique le plus adapté pour notre méthode puisqu'il facilite grandement l'interprétation des photographies aériennes prises en crue du fait d'un contenu sémantique similaire (*cf.*, § 6.2). Récupéré sur le site de l'Hérault et de la Moselle, ce référentiel a dû être créé sur le site de l'Aisne à partir du jeu de photographies noir et blanc prises 5 jours après le passage de la crue (*cf.*, § 5.3.4). La Figure 9-1 illustre sur un cliché les corrections géométriques apportées par le processus d'orthorectification réalisé sur le module *Orthomax* du logiciel *Erdas Imagine*. La Figure 9-2 illustre quant à elle l'assemblage des 17 photographies aériennes orthorectifiées pour couvrir l'ensemble du site d'étude Aisne.

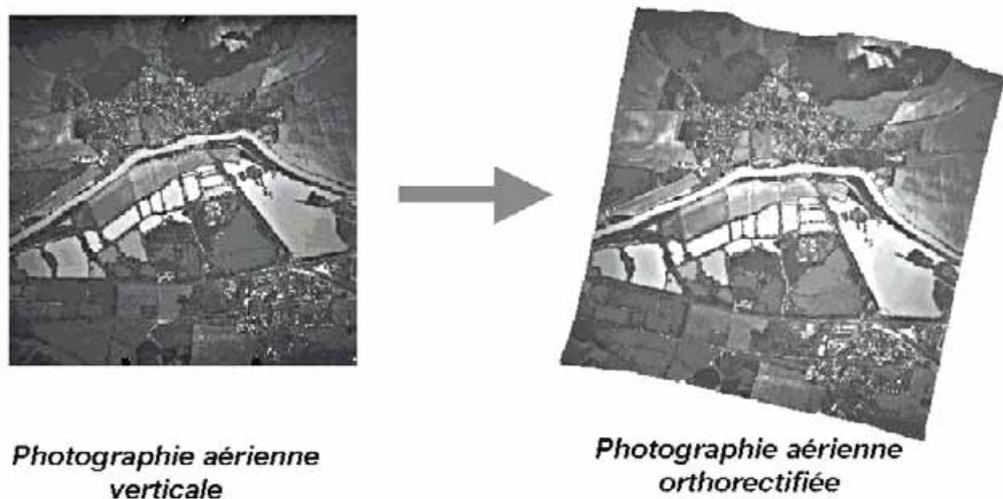


Figure 9-1 : illustration des effets de l'orthorectification

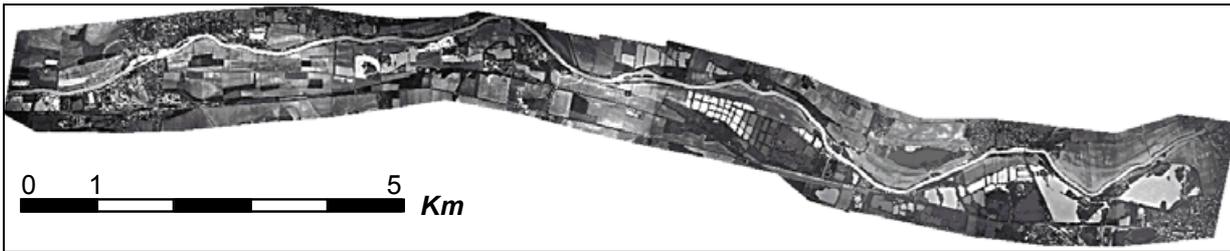


Figure 9-2 : orthophotoplan établi sur l'Aisne à partir des 17 photographies post-crue

La qualité de la correction géométrique obtenue par cette technique permet d'atteindre une précision de positionnement d'ordre métrique. La Figure 9-3 illustre par exemple les faibles écarts géométriques entre l'orthophotoplan construit et le référentiel standard que constitue la carte IGN au 1/25000. Elle montre également la qualité géométrique des raccords entre clichés et la bonne superposition entre le référentiel et l'information topographique. Ce dernier point est fondamental pour la suite de la méthode, notamment lors de l'extraction d'indications altimétriques sur le toit de l'eau par la voie "point cotés" (cf., § 6.4.2.2). Le fait que les données topographiques et l'orthophotoplan sur l'Aisne et l'Hérault aient été construits à partir des mêmes clichés (et certainement de façon conjointe par un même prestataire) tend à garantir la bonne superposition de ces données.

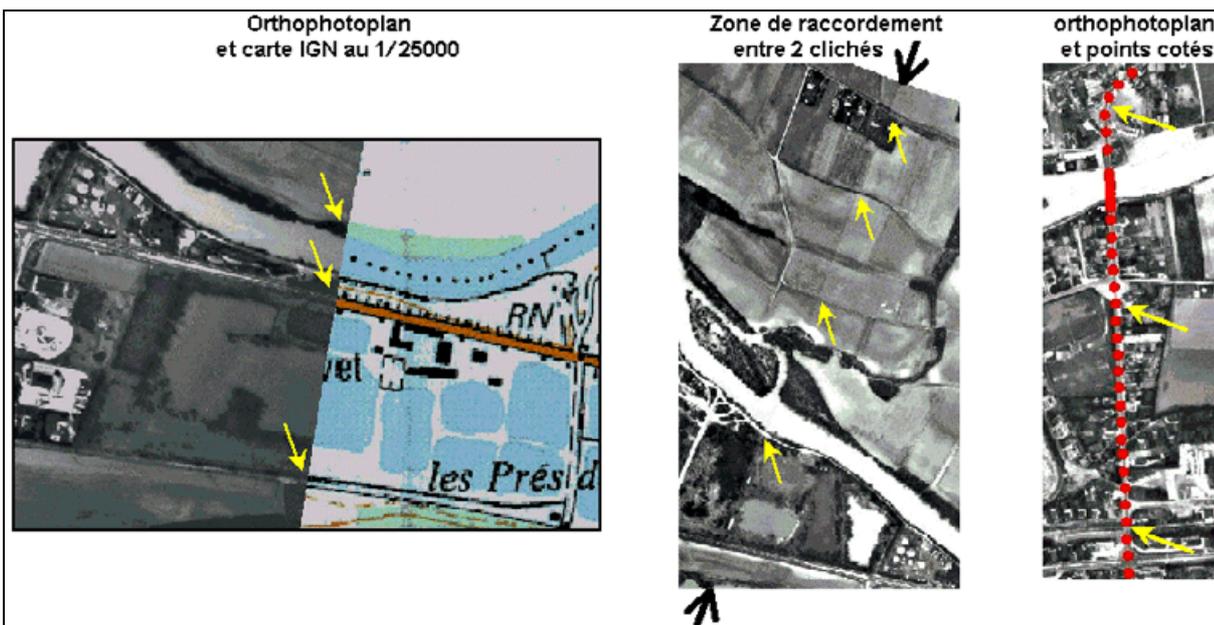


Figure 9-3 : qualité géométrique de l'orthophotoplan (cas de l'Aisne)

### 9.2.2. Intégration des autres données

L'ensemble des données géographiques (*i.e.*, orthophotoplan, topographie, carte IGN au 1/25000, plan des digues, BD Topo®...) est mis en cohérence géographique et inséré dans un SIG. Dans le cas de l'Hérault, un orthophotoplan avec les photographies aériennes en crue a également été réalisé. Pour les autres sites, l'oblicité des photographies en crue ne permet pas un tel traitement. Nous avons opté pour une solution sous forme de lien dynamique : l'emprise des photographies est représentée dans le référentiel géométrique commun par une ligne et un simple clic sur cette ligne permet d'afficher la photographie concernée dans une autre fenêtre (cf., Figure 9-4).

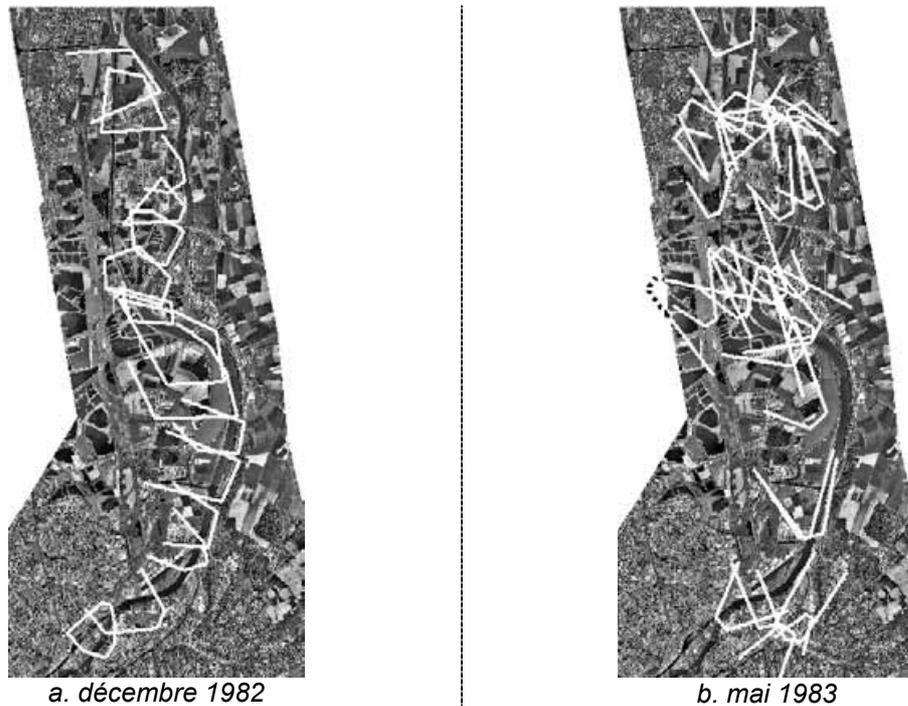


Figure 9-4 : emprises des photographies obliques sur le site Moselle

### 9.2.3. Complémentarité des données et évolution temporelle

L'évolution des plaines d'inondation dans le temps (urbanisation, changement de morphologie suite aux crues ...) doit être intégrée afin que l'analyse géographique de la plaine corresponde au mieux à son état au moment de la crue étudiée. Une attention particulière doit donc être portée sur la date d'acquisition des données.

L'utilisation de données diverses aide grandement à combler les lacunes de chaque donnée. La Figure 9-5 illustre bien l'intérêt d'utiliser conjointement l'orthophotoplan créé en 2000 et la carte IGN au 1/25000 actualisée en 1988 pour les crues de la Moselle de décembre 1982 et mai 1983. On voit nettement que la station d'épuration s'est considérablement agrandie entre 1988 et 2000. La compartimentation de la plaine doit donc s'appuyer non seulement sur l'orthophotoplan, référence géométrique qui contient une information sémantique très riche (e.g., limites de champs, zones boisées), mais également sur la carte IGN qui facilite l'interprétation de l'orthophotoplan (e.g, routes, plans d'eau) et décrit le milieu à une date plus proche de celle des inondations étudiées.

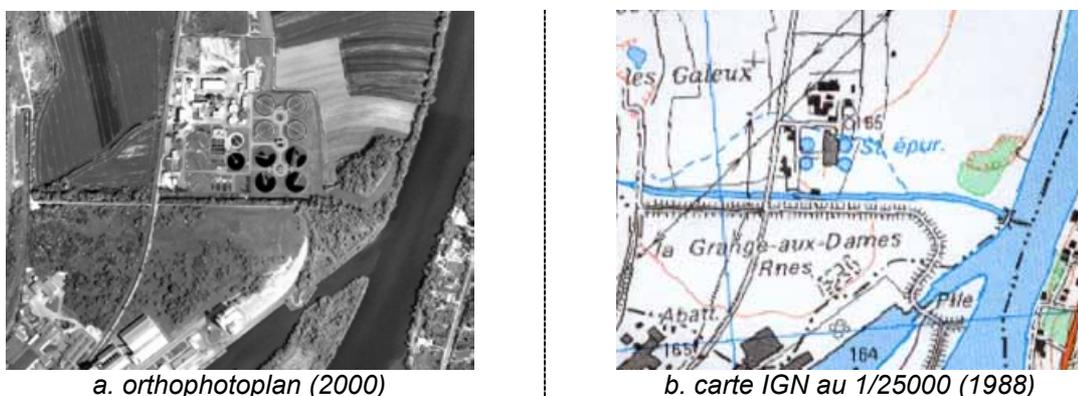


Figure 9-5 : complémentarité sémantique et temporelle de deux sources d'informations

## 9.3. Élaboration des structures hydrodynamiques

### 9.3.1. Construction des compartiments

La construction des compartiments commence par l'examen des données hors crue qui permet de localiser l'ensemble des structures linéaires pouvant jouer un rôle hydraulique en période de crue. Parmi les données mobilisées, l'orthophotoplan et la carte IGN au 1/25000 jouent un rôle très important. L'examen stéréoscopique de photographies aériennes constitue un complément utile pour repérer les structures morphologiques.

L'exploitation de bases de données existantes conduit parfois à accéder, par simple extraction, à la quasi-totalité de ces structures. Sur l'Hérault, les données suivantes ont été extraites de bases existantes :

- les haies, fossés, levés de terre, talus depuis la BD Topo® de l'IGN (couche "natu") ;
- les fossés depuis la BD Topo® de l'IGN (couche "hydro") ;
- les digues depuis un plan vectoriel spécifique de localisation des digues (Conseil général 34) ;
- les grandes structures linéaires du paysage depuis la restitution photogrammétrique.

Dès lors le principal travail a consisté à vérifier la cohérence des données extraites et à les mettre à jour par rapport à l'état de la plaine au moment de la crue étudiée. L'interprétation des photographies en crue permet également de ne pas oublier les structures réellement actives pour la crue étudiée.

L'application du **critère de taille maximale** (cf., *Eq. 6-1*) pour les compartiments permet d'accéder au plan "compartiments toute crue" illustré pour la Moselle en Figure 9-7a (1367 compartiments au total). Le critère de taille maximale a été calculé pour des précisions égales à 10 (*i.e.*,  $\pm 5$  cm) ou 20 cm (*i.e.*,  $\pm 10$  cm) qui m'ont semblé de bons compromis entre les exigences hydrauliques et la précision attendue des données topographiques à notre disposition (cf., Annexe 10). La taille maximale  $t_{max}$  trouvée pour les trois sites d'étude est consignée dans le Tableau 9-1.

Site d'étude	Précision $p$	Pente moyenne $i$	Taille maximale $t_{max}$
Hérault	$\pm 10$ cm	0,5 ‰	400 m
Moselle	$\pm 10$ cm	0,45 ‰	450 m
Aisne	$\pm 5$ cm	0,2 ‰	500 m

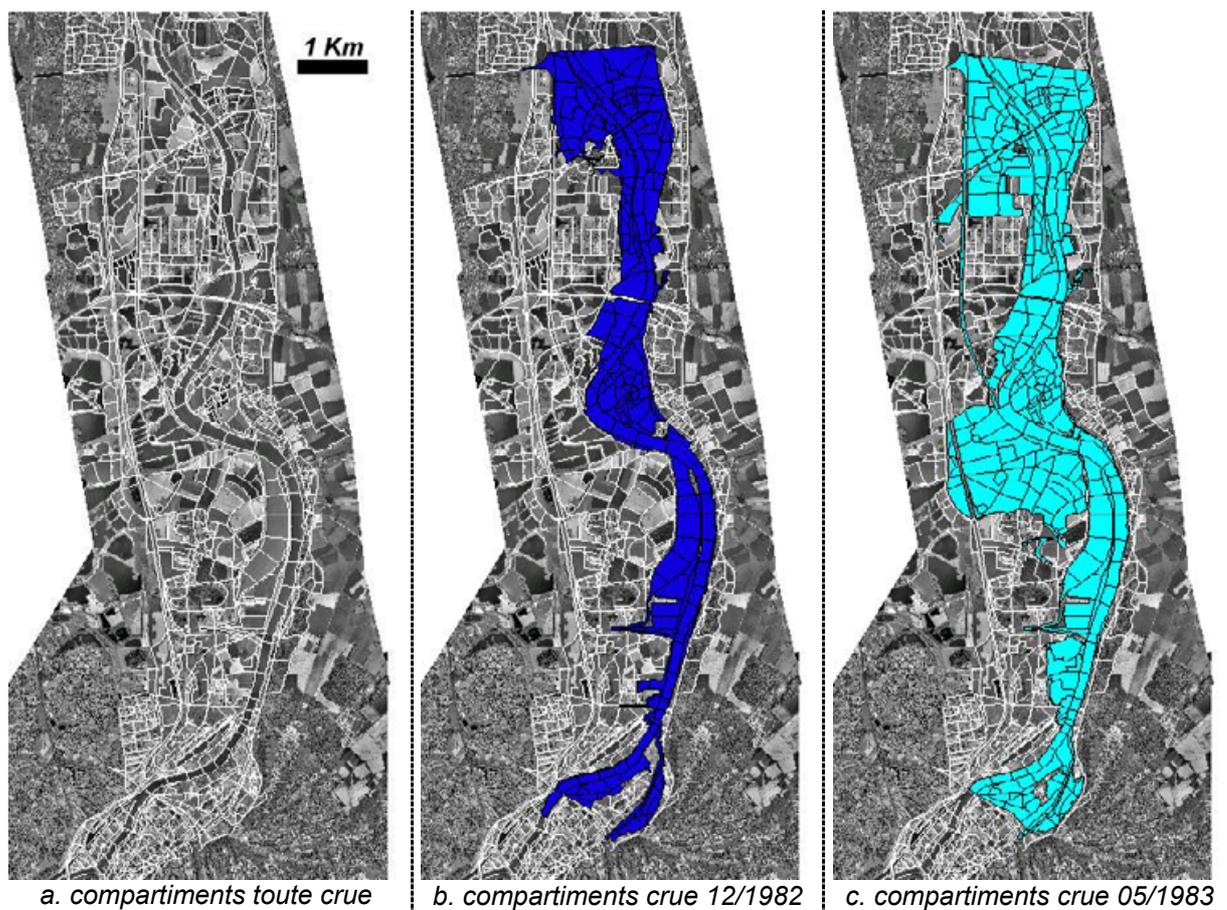
Tableau 9-1 : taille maximale des compartiments pour chaque site d'étude

L'accès au plan "compartiments crue étudiée" est alors réalisé en croisant le plan "compartiments toute crue" avec les limites d'inondations extraites comme l'illustre la Figure 9-6. Une estimation de l'imprécision de positionnement est également associée. Celle-ci dépend typiquement du contexte local. On retrouve des limites de façon très précises lorsqu'elles s'appuient sur des éléments clés du paysage. C'est le cas lorsque le champ d'inondation est arrêté par une digue. L'imprécision de localisation est alors estimée égale à celle du repère cartographique (*i.e.*,  $\pm 5$  m). Lorsque les repères s'éloignent, le positionnement devient moins précis (*e.g.*,  $\pm 10$  m voire  $\pm 20$  m). Enfin certaines situations conduisent à des limites trop imprécises (*e.g.*, limites situées derrière un bâtiment ou de la végétation) qui ne pourront être exploitées par la suite. La limite extraite de la Figure 9-6 s'est par exemple vue attribuer une imprécision de  $\pm 20$  m du fait d'un manque de repères à proximité de la limite. Au second plan un autre cliché permet de diminuer l'imprécision à  $\pm 10$  m.



*Figure 9-6 : exemple de positionnement des limites d'inondation  
(en rouge : emprise de la photographie, en jaune : limite d'inondation extraite et en vert :  
zone d'imprécision de localisation de la limite obtenue par une zone tampon)*

La superposition du plan "compartiments toute crue" et des limites d'inondation permet de définir un plan "compartiment crue étudiée". La Figure 9-7 l'illustre pour les deux crues étudiées de la Moselle.



*Figure 9-7 : illustration des plans "compartiments toute crue" et "compartiments crue étudiée" sur le site Moselle*

Les compartiments actifs pour chaque crue sont illustrés Figure 9-8 dans une échelle commune pour les trois sites d'étude. Ils forment le groupe d'informations {C}. Ils sont dénombrés dans le Tableau 9-2. Pour l'Hérault, le plan affiché correspond aux compartiments actifs au moment de la prise de vue des photographies verticales, la faible couverture des photographies obliques n'ayant pas permis d'en reconstruire un au moment de la prise de ces clichés.



Figure 9-8 : plan "compartiments actifs" pour chaque crue étudiée

### 9.3.2. Identification des circulations

Ce travail d'identification des circulations hydrauliques est basé sur l'interprétation des photographies aériennes en crue. En effet des panaches de turbidité indiquant de fortes vitesses sont aisément visibles sur certaines photographies. C'est particulièrement le cas sur le site de l'Hérault (*cf.*, Figure 9-9a) où les très nombreux débordements par dessus des digues sont nets.

Par contre, les flux pour les crues de la Moselle et de l'Aisne sont beaucoup plus difficiles à observer car les vitesses sont faibles et les structures linéaires de type digues beaucoup moins nombreuses. Seules de rares cas permettent, en lit majeur, de visualiser assez clairement un sens d'écoulement (*cf.*, Figure 9-9b). Pour ce type de crue, le choix entre un flux et un équilibre dans le lit majeur doit souvent être consolidé par la prise en compte de l'écoulement général des eaux dans la plaine. En lit mineur, des remous, indicateur de vitesses élevées ( $> 1$  m/s), sont également identifiables (*cf.*, Figure 9-9c).

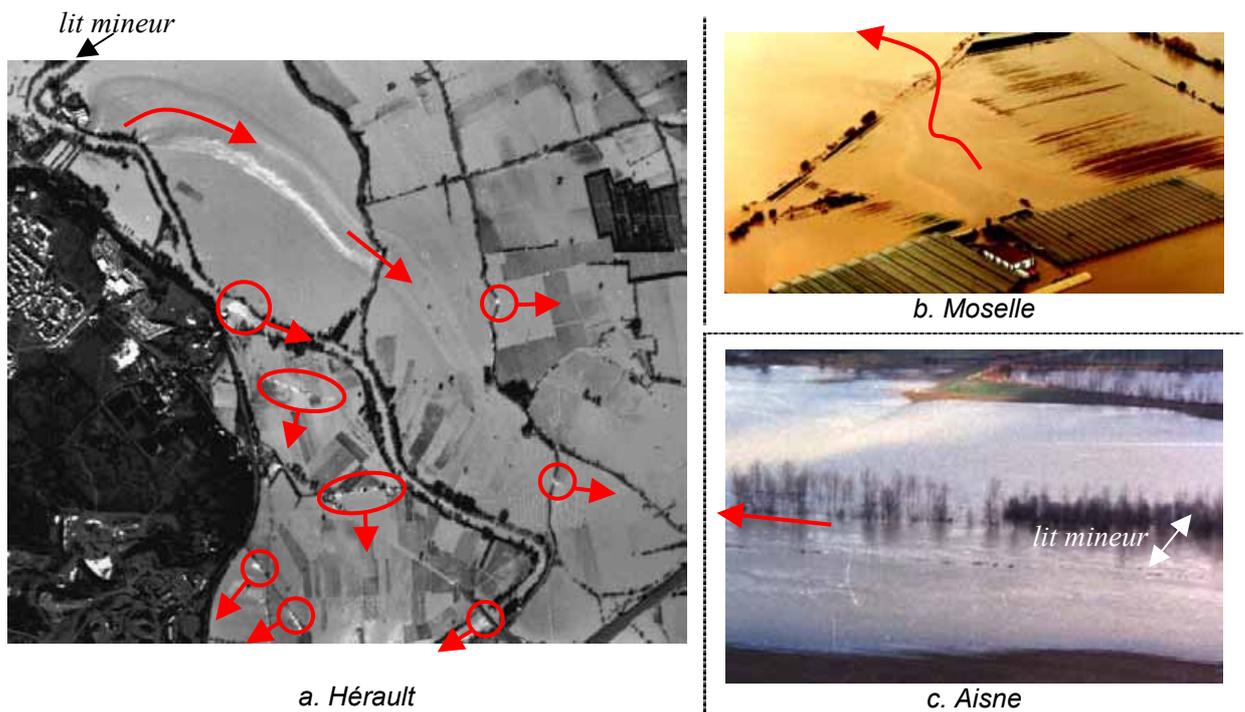


Figure 9-9 : interprétation des flux sur photographie en crue

Les équilibres sont définis lorsqu'une liaison hydraulique est établie mais qu'aucun indice de flux n'est visible. Ils sont généralement orientés perpendiculairement aux flux.

La Figure 9-10 illustre sur une portion de l'Hérault la délimitation en compartiments et les circulations associées.

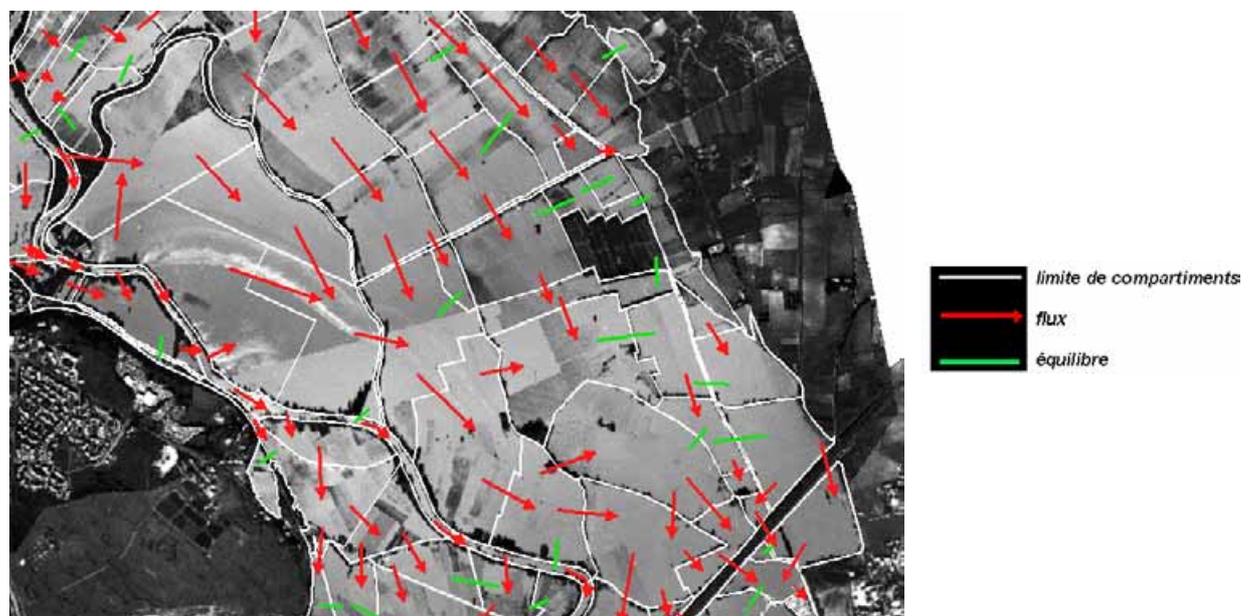


Figure 9-10 : exemple de délimitation en compartiments et circulations associées (Hérault)

### 9.3.3. Synthèse sur les structures hydrodynamiques retenues

La combinaison de ces deux informations permet de définir le schéma de circulations  $\{H\}$  pour chaque crue au moment de la prise des clichés photographiques (*cf.*, Figure 9-11a). La Figure 9-11b illustre, quant à elle, une représentation duale de la structure hydrodynamique (*i.e.*,  $\{C\}+\{H\}$ ) sous forme de graphe où chaque compartiment est représenté par un point et chaque circulation par une arête, orientée ou non.

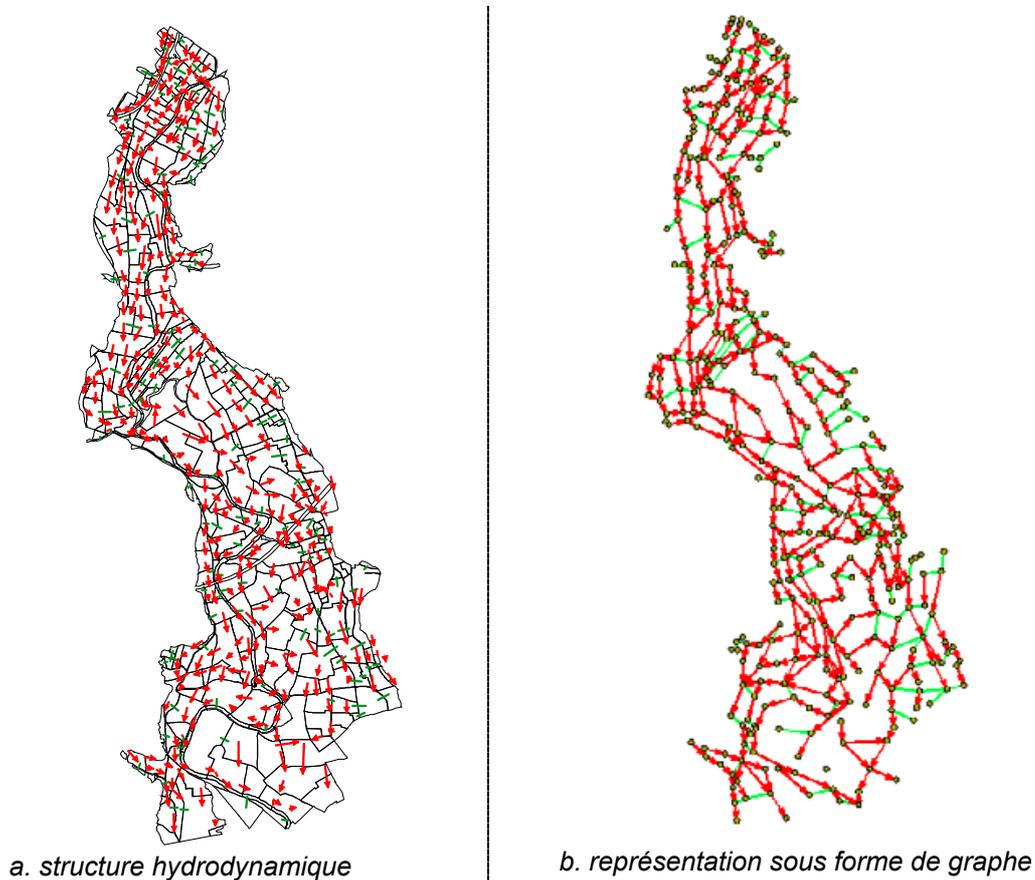


Figure 9-11 : structure hydrodynamique et représentation duale en graphe

Les caractéristiques des structures hydrodynamiques pour les quatre crues étudiées sont synthétisées dans le tableau ci-dessous (*cf.*, Tableau 9-2).

Site d'étude	Crue étudiée	Nombre de compartiments actifs	Nombre de flux	Nombre d'équilibres
Hérault <sup>24</sup>	11/1994	379	322	133
Moselle	12/1982	319	225	134
	05/1983	392	189	234
Aisne	12/1983	82	70	29

Tableau 9-2 : caractéristiques des structures hydrodynamiques retenues

<sup>24</sup> Par extension, cette structure sera supposée valide au moment de la prise des photographies obliques.

### 9.3.4. Mise en garde

Une attention particulière doit être portée sur la définition des circulations entre le lit mineur et le lit majeur car les vitesses en lit mineur peuvent être importantes (*i.e.*, > 1 m/s). Les turbulences et remous (*cf.*, Figure 9-9a et c) en témoignent. Le terme d'énergie cinétique dans l'évaluation de la charge (*i.e.*, Eq. 7-3) ne peut plus être négligé. En conséquence, si l'on ne prend pas garde lors de l'établissement des connexions entre lit mineur et lit majeur, la cote en lit mineur peut être surestimée par notre méthode puisque son estimation est imposée par celles des zones voisines en lit majeur (là où se trouvent les sources d'informations de cotes). Cette surestimation, d'autant plus forte que les vitesses en lit mineur sont élevées, doit être prise en compte lors d'éventuelles validations avec des données extérieures aux photographies, notamment si ces dernières sont mesurées dans le lit mineur (*e.g.*, limnigramme). Une vitesse de 3m/s non aberrante en lit mineur contribue, par exemple, dans la charge hydraulique pour une hauteur de 45 cm

## 9.4. Extraction des indications altimétriques {NE} sur le toit de l'eau

### 9.4.1. Par valorisation de points cotés

#### 9.4.1.1. Illustration

L'approche qui consiste à valoriser des points cotés en les croisant avec les limites du champ d'inondation est facilement généralisable à tous les sites d'étude. Ainsi elle a pu être développée sur les trois sites d'étude et pour les quatre crues étudiées, contrairement à la valorisation des objets plus ou moins émergents qui ne l'a été que sur la crue de l'Hérault. Nous avons retenu deux degrés de préférence : si le point coté jugé informatif (*i.e.*, situé dans une zone informative) est en dehors du couloir d'imprécision de la limite d'inondation alors il est considéré comme "sûr", sinon il est considéré comme "moins sûr" (*cf.*, Tableau 9-3).

<i>Caractère émergé ou non</i>	immergé => minorant		émergé => majorant		Non traité
	sûr	moins sûr	moins sûr	sûr	
<i>Signification</i>	sûr	moins sûr	moins sûr	sûr	hors zone informative
<i>Degré de préférence</i>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>1</sub>	/
<i>Groupe d'appartenance</i>	$m_{Ci}^{P_1}$	$m_{Ci}^{P_2}$	$M_{Ci}^{P_2}$	$M_{Ci}^{P_1}$	/
<i>Représentation</i>	●	●	●	●	●

Tableau 9-3 : typologie des points cotés situés dans une zone informative

La Figure 9-12 illustre la récupération de ces informations sur un compartiment pour la crue de Mai 1983 sur le site Moselle.

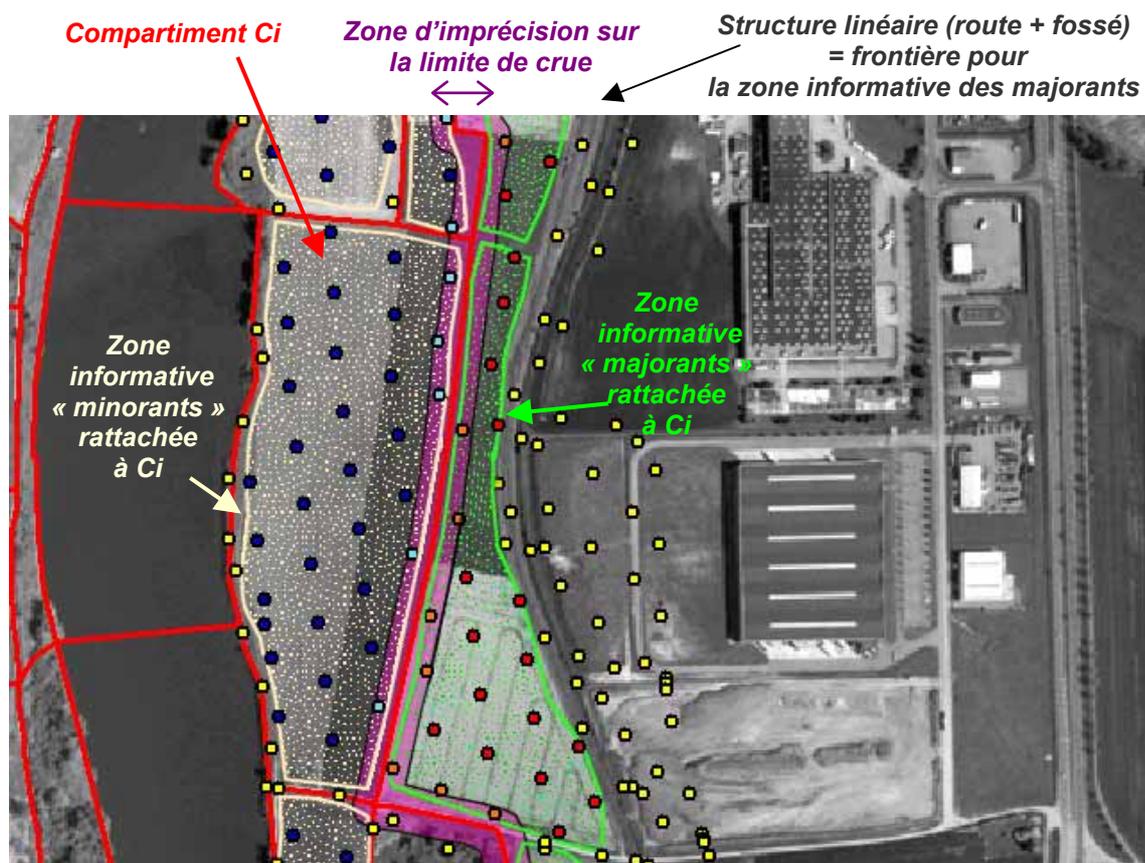


Figure 9-12 : indications altimétriques provenant de la valorisation de "points cotés"

#### 9.4.1.2. Applicabilité et intérêt

La seule restriction d'utilisation de cette voie d'obtention d'informations altimétriques sur le toit de l'eau est de disposer d'une topographie fine sous forme de points cotés. Cette forme de représentation ponctuelle du relief a été préférée aux courbes de niveaux car si ces dernières sont certes très cohérentes au niveau parcellaire du fait de leur lissage, elles le sont peu au niveau local, niveau qui nous préoccupe ici. En effet toute irrégularité très locale, ainsi que toute irrégularité dont l'amplitude est inférieure à l'équidistance des courbes, est masquée par les courbes de niveaux alors qu'un semis de points peut être adapté à ces irrégularités locales du relief. Un argument supplémentaire qui tend à favoriser l'information topographique ponctuelle par rapport à l'information linéaire repose sur le fait que la collecte d'informations topographiques est actuellement effectuée de manière majoritaire sous une forme ponctuelle (seules les courbes de niveaux provenant de photogrammétrie dérogent à cette règle). Le développement des nouvelles techniques de collecte (e.g., laser aéroporté ou hélicopté) tend également à conserver cette logique ponctuelle.

Son intérêt est d'autant plus important que les limites du champs d'inondation ne sont pas trop brutales (i.e., pente du terrain naturel faible) sans quoi l'information récoltée conduit à des estimations de cote trop imprécises. Cette voie peut être utilisée seule dès que le toit de l'eau présente peu de dénivelé sur chaque rive dans la dimension transversale à l'écoulement (cas de l'Aisne et de la Moselle). Si la plaine d'inondation est large et très structurée (cas de l'Hérault) la valorisation de points cotés n'est plus suffisante et il est indispensable de faire appel à la valorisation d'objets internes au champ d'inondation.

### 9.4.1.3. Synthèse des informations {NE} recueillies par la voie "points cotés"

Le Tableau 9-4 synthétise le nombre de points cotés valorisés pour chaque crue, chacun de ces points cotés venant alimenter le groupe d'information {NE}.

Site d'étude	Crue étudiée	Nombre de points cotés valorisés comme informatifs				
		total	$m^{P_1}$	$m^{P_2}$	$M^{P_2}$	$M^{P_1}$
Hérault	11/1994 (prise verticale)	295+603*	0	603*	36	259
	11/1994 (prise oblique)	0*	0	0	0	0
Moselle	12/1982	1337	545	100	168	524
	05/1983	2805	1455	258	295	797
Aisne	12/1983	870	515	73	82	200

\*voir explications ci-dessous

Tableau 9-4 : bilan des indications {NE} récoltées par la voie "points cotés"

L'Hérault constitue un cas particulier car le contexte morphologique sur les bordures du champ d'inondation (e.g., champ d'inondation s'arrêtant sur une digue) limite fortement la définition des zones informatives de majorants. Pour les zones informatives de minorants, un maximum de deux points cotés immergés, traités comme des points moins sûrs, ont été retenus pour chaque compartiment. La démarche entreprise pour sélectionner ces points est la suivante :

1. sélection des points cotés internes au champ d'inondation (i.e., à l'intérieur des compartiments, cf., Figure 9-13a) ;
2. exclusion des points cotés situés à moins de 20 mètres d'une limite de compartiments pour ne conserver que les points représentatifs du cœur des compartiments (cf., Figure 9-13b);
3. conservation pour chaque compartiment des deux points cotés de plus forte valeur (s'ils existent).

Ceci a conduit à retenir 603 points cotés qui viennent alimenter le groupe {NE} par des indications de type  $\{m^{P_2}\}$ .



Figure 9-13 : méthode de recueil sur l'Hérault pour les minorants de type  $\{m^{P_2}\}$   
(a. sélection des points cotés internes au champ d'inondation, b. conservation des points cotés situés dans le cœur des compartiments)

Enfin, à cause d'une couverture très faible de la plaine, l'exploitation des prises de vue oblique sur l'Hérault n'a pas été poussée et s'est limitée à l'extraction d'indications altimétriques provenant de la valorisation d'objets plus ou moins émergés (i.e., parcelle de vigne).

## 9.4.2. Par voie "interne"

### 9.4.2.1. Introduction

La voie interne, qui consiste à déterminer et exploiter le caractère plus ou moins immergé/émergé d'objets de hauteur connue, n'a été utilisée que sur l'Hérault. Elle permet de valoriser des éléments du sursol qui ne sont pas référencés dans la base d'informations topographiques. Son résultat est une indication de **hauteur** d'eau qui doit être étendue à l'ensemble du compartiment et transformée en indication de cote d'eau pour alimenter le groupe d'informations {NE}.

Pour l'Aisne et la Moselle, l'absence des conditions requises, *i.e.*, présence d'objets internes (en nombre significatif) au champ d'inondation de hauteur connue et proche de la hauteur d'eau, n'a pas permis de recourir à cette voie.

Dans le cas de l'Hérault, deux types d'"objets" ont été valorisés : des digues dont la hauteur de chaque côté avait été recensée dans une étude terrain pour le compte du CG34 et des parcelles de vigne. Comme les vignes, les digues ont été considérées comme des éléments du sursol. En effet elles comprennent beaucoup d'éléments très étroits (*e.g.*, murets) qui n'appartiennent pas à la base de données topographiques construites par photogrammétrie. De plus la méthode a été initialement élaborée sur l'Hérault sans avoir accès à une topographie fine : seule une topographie moyenne par compartiment était disponible.

### 9.4.2.2. Valorisation des digues plus ou moins émergées

L'observation, sur les photographies aériennes prises pendant la crue, de l'état de submersion des digues permet de tirer des **indications de hauteur de submersion** dans les compartiments connexes.

Sur le site de l'Hérault, la connaissance des hauteurs de digue a été récupérée dans le plan d'informations "*localisation des digues*" créé pour le compte du Conseil général 34. Les digues sont repérées et localisées de manière exhaustive, et sont pour une bonne partie renseignées en terme de hauteurs minimale et maximale de chacun des côtés.

Une digue (ou un tronçon de digue) peut être vue comme une limite entre deux compartiments  $C_i$  et  $C_j$  ayant une hauteur minimale  $Hd_{C_i}^{\min}$  et maximale  $Hd_{C_i}^{\max}$  côté  $C_i$  (*resp.*  $Hd_{C_j}^{\min}$  et  $Hd_{C_j}^{\max}$  côté  $C_j$ ).

Le Tableau 9-5 détaille les différents degrés de submersion identifiés et les indications relatives à la hauteur de submersion réelle  $H_{C_i}$  pour  $C_i$  et  $H_{C_j}$  pour  $C_j$  qu'il est possible d'en déduire.

Degré de submersion	Type de circulation entre $C_i$ et $C_j$	Indications de hauteurs déduites	
		côté $C_i$	côté $C_j$
nul	aucune	$H_{C_i} \leq Hd_{C_i}^{\min}$	$H_{C_j} \leq Hd_{C_j}^{\min}$
partiel	équilibre ( $C_i \leftrightarrow C_j$ )	$Hd_{C_i}^{\min} \leq H_{C_i} \leq Hd_{C_i}^{\max}$	$Hd_{C_j}^{\min} \leq H_{C_j} \leq Hd_{C_j}^{\max}$
	flux ( $C_i \rightarrow C_j$ )	$Hd_{C_i}^{\min} \leq H_{C_i} \leq Hd_{C_i}^{\max}$	$H_{C_j} \leq Hd_{C_j}^{\max}$
total	équilibre ( $C_i \leftrightarrow C_j$ )	$Hd_{C_i}^{\max} \leq H_{C_i}$	$Hd_{C_j}^{\max} \leq H_{C_j}$
	flux ( $C_i \rightarrow C_j$ )	$Hd_{C_i}^{\max} \leq H_{C_i}$	-

Tableau 9-5 : indications de hauteurs déduites de l'état de submersion des digues

9.4.2.2.1 Détermination du degré de submersion et hauteurs d'eau déduites

L'interprétation du degré de submersion sur photographie permet la distinction des cas suivants : nul (*i.e.*, aucune submersion), partiel (*i.e.*, submersion sur une partie de la digue), total (*i.e.*, submersion sur la longueur totale de la digue). La Figure 9-14 donne un exemple pour le cas de digues partiellement submergées (majorité des cas).

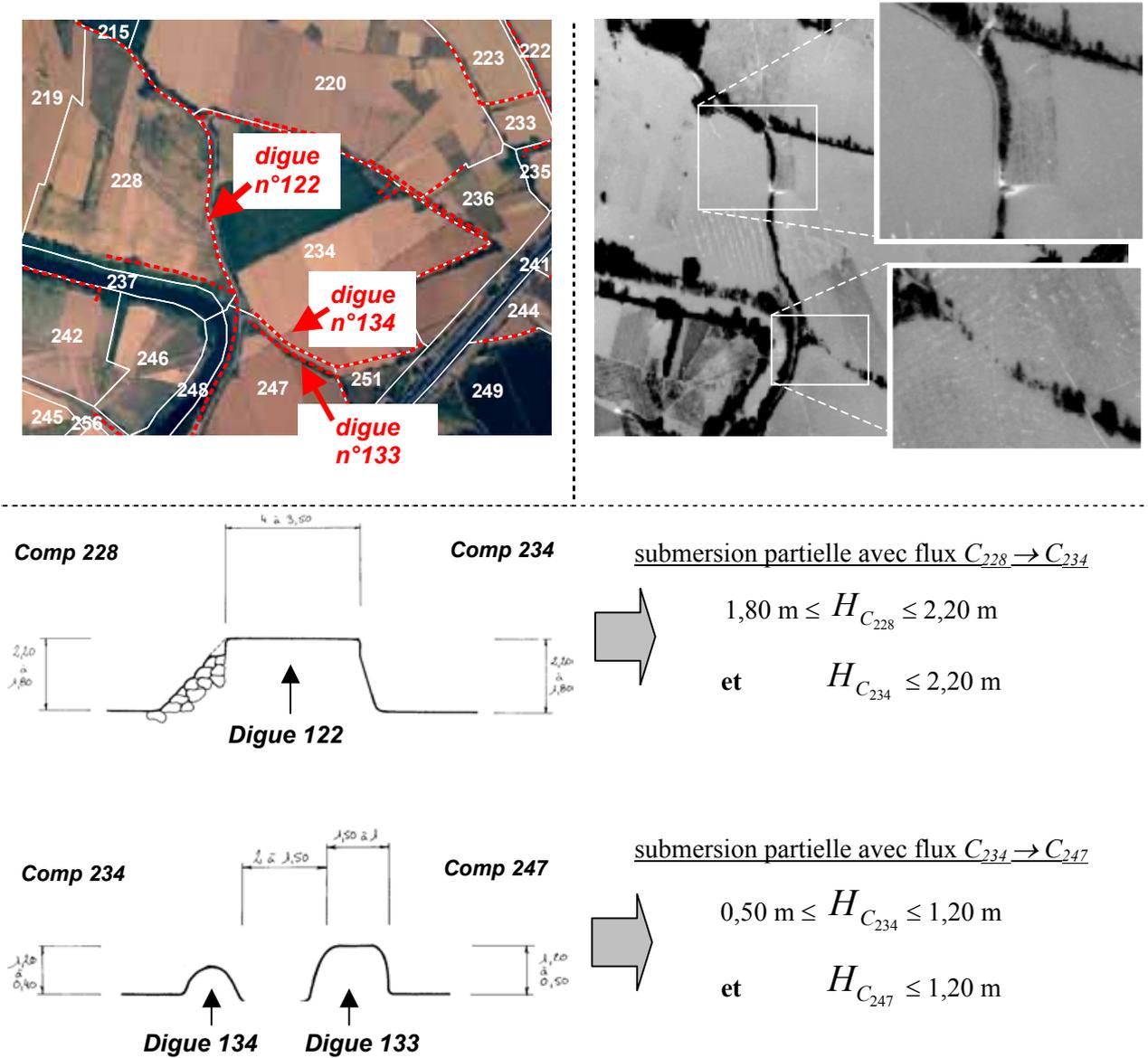


Figure 9-14 : illustration de digues partiellement submergées et indications de hauteurs correspondantes

9.4.2.2.2 Discussion

Le passage d'une indication de hauteur d'eau à une indication de cote du toit de l'eau rattachée à l'ensemble du compartiment fait appel à la topographie. Contrairement au cas où un objet ponctuel est observé, la connaissance de la topographie locale ne permet pas ici de déduire une information globale sur le compartiment puisque la connaissance de la hauteur des digues n'est disponible que sur un tronçon linéaire. Il faut donc supposer que la topographie intra-compartiment est uniforme (*i.e.*, les

compartiments sont alors considérés comme des entités surfaciques à fond plat) et le passage suit alors la relation simple suivante :

$\begin{aligned} \text{si } H_1 = \text{minorant de } C_i & \quad \text{alors} \quad (\hat{Z}_{TN}^{comp} + H_1) \in \{m_{C_i}\} \\ \text{si } H_2 = \text{majorant de } C_i & \quad \text{alors} \quad (\hat{Z}_{TN}^{comp} + H_2) \in \{M_{C_i}\} \end{aligned}$	<b>Eq. 9-1</b>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------

avec  $\hat{Z}_{TN}^{comp}$  cote moyenne du terrain naturel du compartiment

Même si l'hypothèse d'uniformité ne semble pas complètement aberrante pour les compartiments du site de l'Hérault, l'écart type moyen calculé sur les 260 compartiments ayant plus de trois points cotés dans leur cœur est tout de même de 0,34 m. De plus certaines sources d'erreurs comme la présence d'un fossé au pied d'une digue restent possibles : la hauteur de digue mesurée localement apparaît alors plus élevée que la mesure attendue (*i.e.*, en référence à la cote moyenne du compartiment). C'est pourquoi les données provenant de la valorisation des digues ne sont pas considérées comme très sûres. **Elles vont donc alimenter le degré de préférence  $P_2$ , *i.e.*,  $\{NE\}^{P_2}$ .**

#### 9.4.2.2.3 Résultats

La valorisation de l'état de submersion des digues a été déployée sur l'Hérault pour la crue de novembre 1994 au moment de la prise de vue verticale. Elle a conduit à extraire 116 indications, dont  $96 \in \{m^{P_2}\}$  et  $20 \in \{M^{P_2}\}$  ;

#### 9.4.2.3. Valorisation des parcelles de vigne plus ou moins émergées

L'observation, sur les photographies aériennes prises pendant la crue, de l'état de submersion des parcelles de vigne permet également de déduire des **indications de hauteur de submersion** dans les compartiments connexes. Rappelons que la vigne représente la culture majoritaire sur le site Hérault en couvrant environ 50 % de sa surface.

Contrairement aux digues qui peuvent être considérées comme linéaires, l'objet d'intérêt est maintenant surfacique. L'autre différence essentielle provient du fait que la hauteur des vignes n'a pas été mesurée pour chaque parcelle. Il a donc fallu trouver un moyen de déterminer la hauteur des vignes, même de manière imparfaite, compte tenu des données à disposition. Une étude préalable sur l'établissement de ce lien en fonction de la pratique culturale de la vigne identifiable sur photographie aérienne (*i.e.*, mode de conduite de la vigne) a pour cela été menée sur le site Hérault.

##### 9.4.2.3.1 Typologie des pratiques culturales et hauteurs associées de la vigne

Pour établir le lien supposé entre hauteur de vigne et pratique culturale de la parcelle de vigne, nous avons procédé à une campagne de mesures de terrain sur notre site d'étude Hérault.

Cette campagne a conduit à échantillonner 82 parcelles de vigne au fil de notre déplacement sur le site d'étude (*cf.*, Figure 9-15). Elle a été réalisée début novembre 2000 afin que la mesure des hauteurs soit représentative de l'état de la vigne au mois de novembre (mois de la crue étudiée), *i.e.*, avant la taille.

Les variables d'intérêt qui ont été mesurées sont toutes rattachées à la parcelle. Pour la hauteur de vigne, nous avons retenu une gamme de variation globale, soit une hauteur minimale et une hauteur maximale du "toit" de la vigne pour chaque parcelle. Pour la pratique culturale, les deux grands modes de conduite utilisés en Languedoc-Roussillon ([Champagnol, 1984] in [Wassenaar, 2001]) ont été pris en compte : le **gobelet** (*i.e.*, conduite traditionnelle avec un motif de ceps individuels sans tuteur distribués sur une grille régulière de 1,5 m dans les deux sens), le **palissage** (*i.e.*, ceps plantés en rang espacés de 2,5 m avec les rameaux attachés par deux fils en général). Cependant, comme des modes de conduite intermédiaires existent (*e.g.*, vigne non palissée mais espacée dans un sens de 2,5 m pour permettre le passage des engins), nous avons préféré regrouper les modes de conduite en (*cf.*, Figure 9-16) :

- **parcelles de vigne mécanisées**, *i.e.*, rang de vigne espacés de 2,5 m environ dans une direction
- **parcelles de vigne non mécanisées**.



Figure 9-15 : répartition des 82 parcelles de vigne échantillonnées

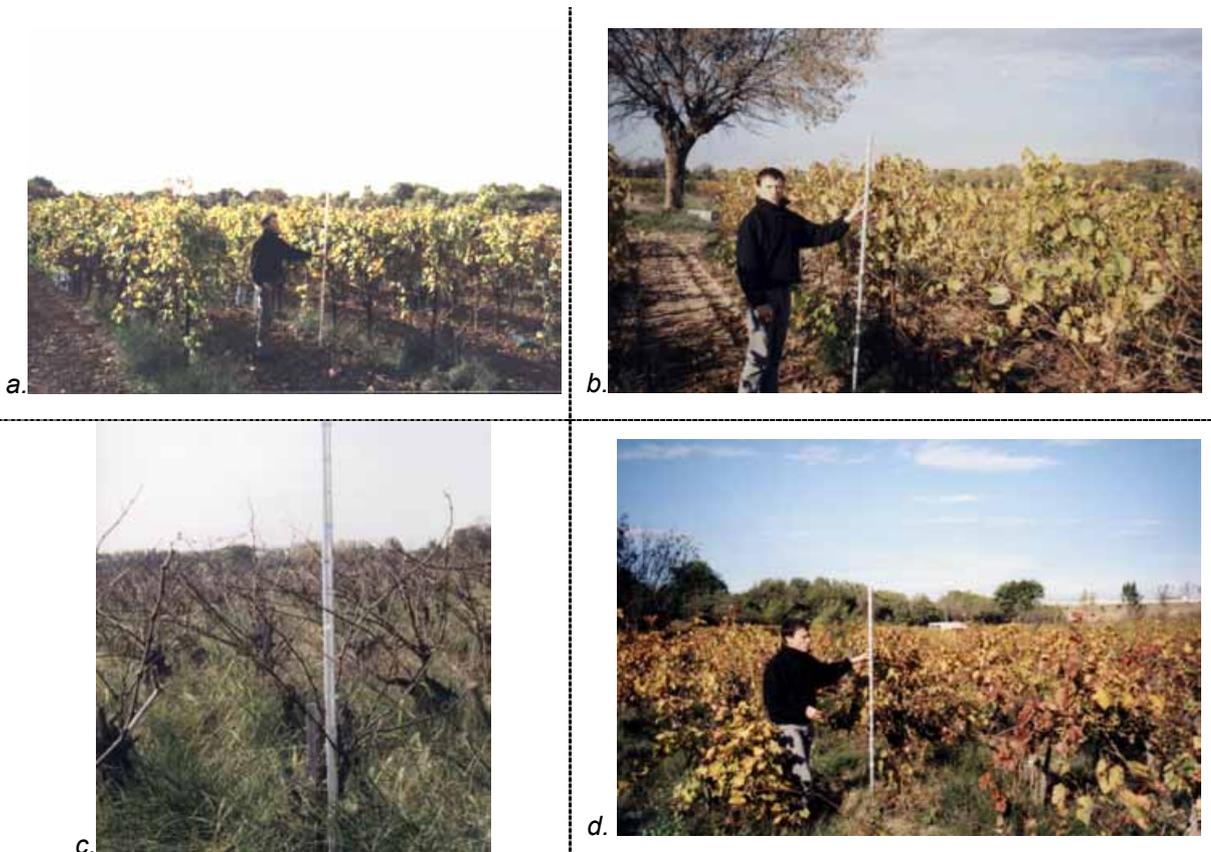


Figure 9-16 : photographies illustrant les deux principaux modes de conduite de la vigne  
*a et b. parcelles mécanisées (palissées avec inter rang proche de 2,5 m)*  
*c et d. parcelles non mécanisées (gobelet sur grille régulière de 1,5 m)*

Les mesures réalisées sur 32 parcelles de vigne non mécanisées et 50 parcelles de vigne mécanisées ont conduit aux résultats suivants (cf., Figure 9-17) :

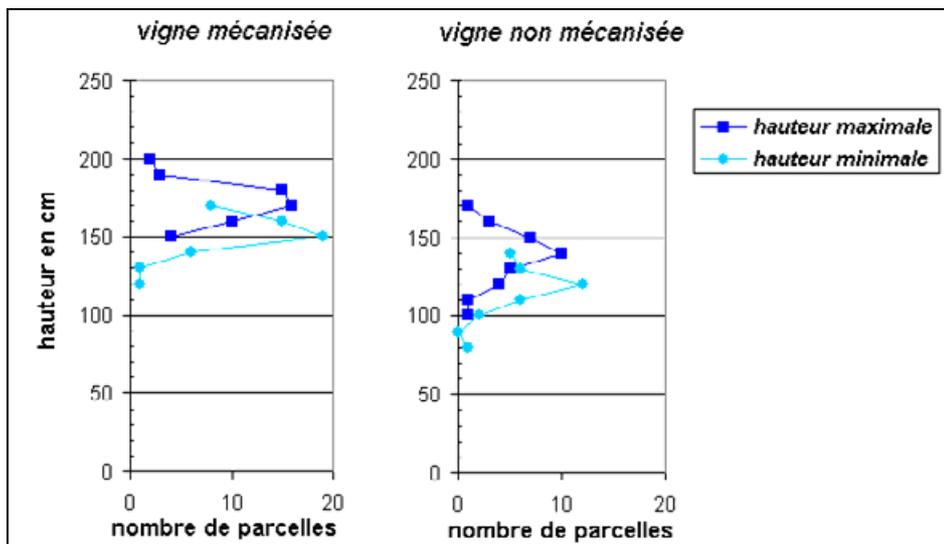


Figure 9-17 : hauteurs de vigne en fonction du mode de conduite

*La plage de variation finalement retenue est de [1,40 m ; 1.80 m] pour les parcelles mécanisées et [1,10 m ; 1.50 m] pour celles non mécanisées.*

#### 9.4.2.3.2 Reconnaissance du mode de conduite par télédétection

Un des avantages de la typologie retenue des modes de conduite (*i.e.*, **parcelle mécanisée / non mécanisée**) est de présenter des différences de motifs géométriques. Ainsi la caractérisation par images de télédétection est rendue possible, moyennant l'utilisation d'images ayant des angles de vue et/ou des résolutions spatiales appropriées.

Pour des images verticales en couleur, la Figure 9-18 montre clairement que la résolution spatiale des images ne doit pas excéder 1 m sans quoi la reconnaissance du mode de conduite dévient très délicat voire impossible. Malheureusement, l'image à 0,5 m présentée en Figure 9-18 n'était présente que sur une petite portion du site. Nous avons donc souvent été amené à repérer le mode de conduite culturale directement à partir des photographies de crue (cf., § 9.4.2.3.3 suivant). Lorsque le mode de conduite n'a pu être clairement identifié, un mode **indéterminé** a été retenu.

#### 9.4.2.3.3 Reconnaissance du degré de submersion par télédétection

Au vu des images, il semble possible de caractériser quatre degrés de submersion :

- degré > pour la vigne complètement submergée ;
- degré ≈ pour la vigne légèrement recouverte ou affleurante ;
- degré < pour la vigne faiblement émergée ;
- degré << pour la vigne fortement émergée ;
- degré <<< pour la vigne presque entièrement émergée (classe marginale).

Le cas de submersion complète (*i.e.*, degré >) est le plus sensible au problème de décalage temporel entre la détermination de l'occupation du sol et l'observation de la crue sur photographie. En effet, il représente le seul cas où la présence de la vigne au moment de la crue ne peut pas être vérifiée sur les

photographies en crue. Il faut donc être particulièrement prudent dans l'affectation de ce degré de submersion, et peut-être s'abstenir si la connaissance de l'occupation du sol est bien antérieure à la crue.

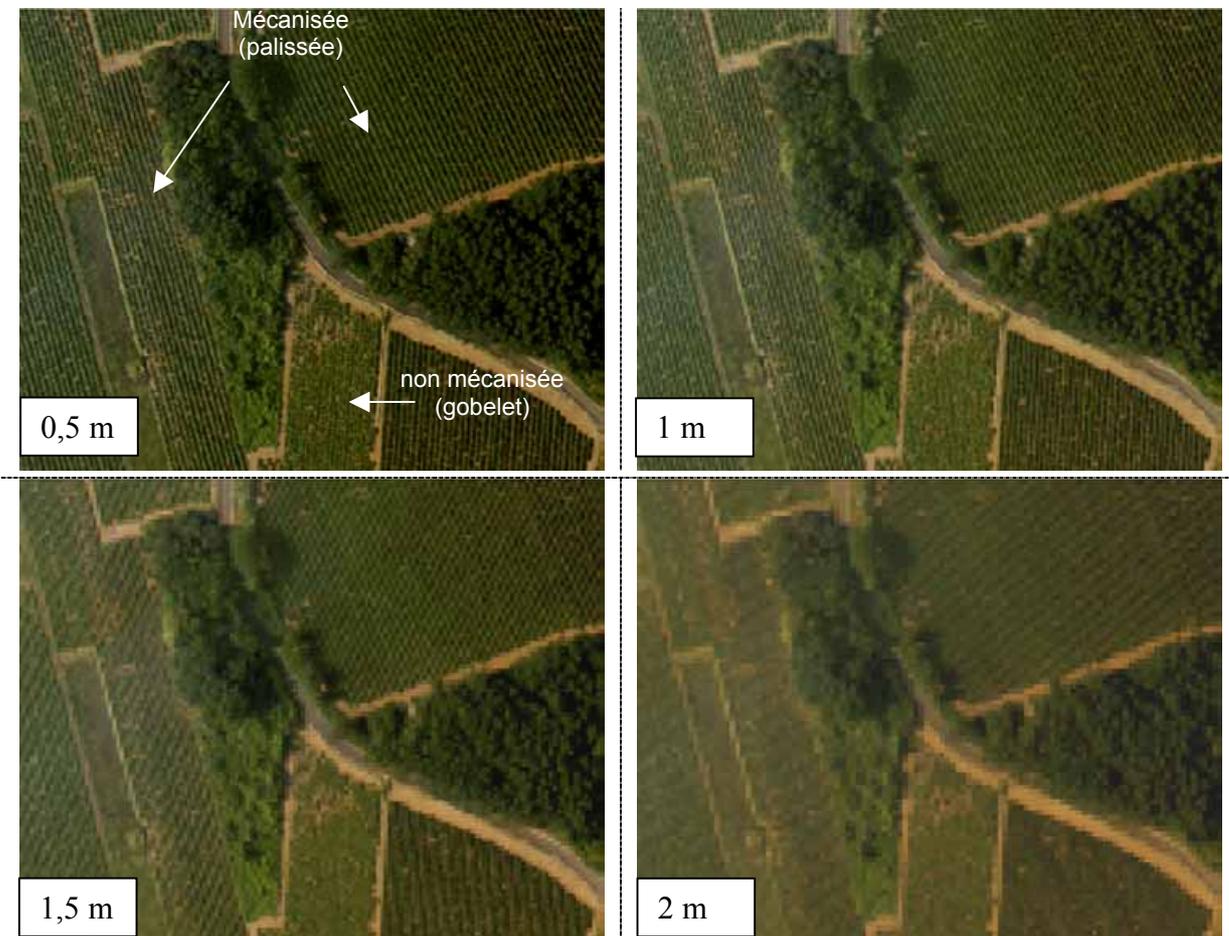


Figure 9-18 : reconnaissance du mode de conduite en fonction de la résolution spatiale

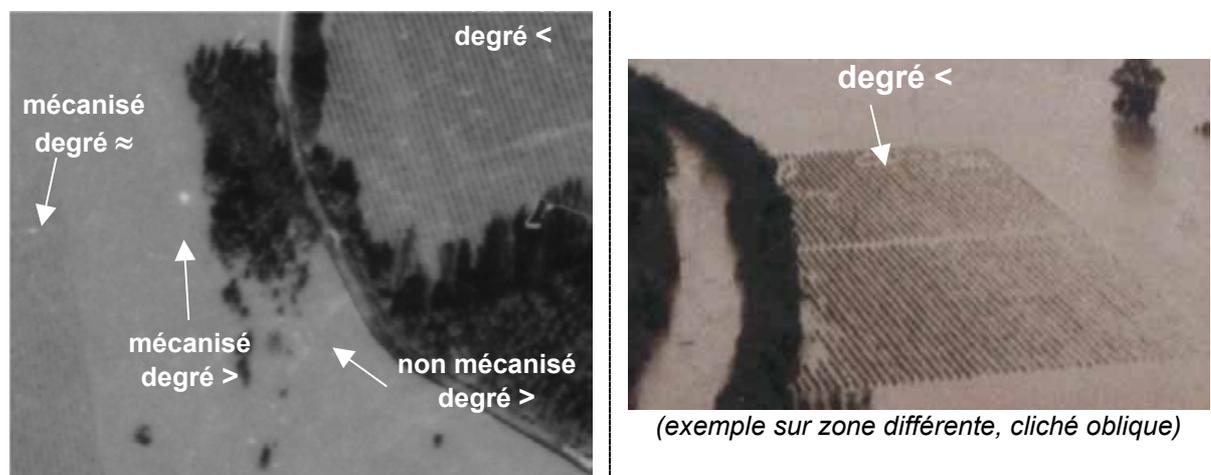


Figure 9-19 : exemples de caractérisation du degré de submersion des vignes

La conjonction du mode de conduite et du degré de submersion amène aux indications de hauteurs consignées dans le Tableau 9-6. Elles sont relatives au compartiment  $C_i$  contenant la parcelle de vigne.

<i>Degré de submersion</i>	<i>Indications de hauteurs déduites (en mètre)</i>		
	<i>Mode mécanisé</i>	<i>Mode non mécanisé</i>	<i>Mode indéterminé</i>
>	$1,40 \leq H_{C_i}$	$1,10 \leq H_{C_i}$	$1,10 \leq H_{C_i}$
≈	$1,20 \leq H_{C_i} \leq 1,80$	$0,90 \leq H_{C_i} \leq 1,50$	$0,90 \leq H_{C_i} \leq 1,80$
<	$0,70 \leq H_{C_i} \leq 1,40$	$0,60 \leq H_{C_i} \leq 1,10$	$0,60 \leq H_{C_i} \leq 1,40$
<<	$0,30 \leq H_{C_i} \leq 0,90$	$0,30 \leq H_{C_i} \leq 0,80$	$0,30 \leq H_{C_i} \leq 0,90$
<<<	$H_{C_i} \leq 0,50$	$H_{C_i} \leq 0,50$	$H_{C_i} \leq 0,50$

Tableau 9-6 : indications de hauteurs déduites de l'état de submersion des parcelles de vigne

Des exemples de caractérisation du degré de submersion sont présentés en Figure 9-19. La représentativité de l'indication de hauteur apportée par un objet surfacique (en l'occurrence la parcelle de vigne) permet de placer un bon niveau de confiance dans cette indication, même après le passage au compartiment avec l'équation **Eq. 9-1**. Les indications altimétriques provenant des digues **vont donc alimenter le degré de préférence  $P_1$ , i.e.,  $\{NE\}^{P_1}$ .**

9.4.2.3.4 Résultats

La valorisation du degré de submersion des vignes permet d'apporter pour la crue de novembre 1994 sur l'Hérault :

- 1498 indications au moment de la prise de vue verticale, dont  $744 \in \{m^{P_1}\}$  et  $684 \in \{M^{P_1}\}$  ;
- 464 indications au moment de la prise de vue oblique, dont  $232 \in \{m^{P_1}\}$  et  $180 \in \{M^{P_1}\}$ .

**9.4.3. Synthèse des indications altimétriques  $\{NE\}$  extraites pour chaque crue**

Le Tableau 9-7 donne le bilan global, pour chaque crue étudiée, des indications altimétriques venant alimenter le groupe d'information  $\{NE\}$ . Il comprend les indications venant de la valorisation des points cotés et des objets internes plus ou moins émergés.

<i>Site d'étude</i>	<i>Crue étudiée</i>	<i>Nombre d'indications <math>\{NE\}</math> valorisées</i>				
		<i>total</i>	$m^{P_1}$	$m^{P_2}$	$M^{P_2}$	$M^{P_1}$
Hérault	11/1994 (prise verticale)	<b>2442</b>	744	699	56	943
	11/1994 (prise oblique)	<b>464</b>	232	0	0	232
Moselle	12/1982	<b>1337</b>	545	100	168	524
	05/1983	<b>2805</b>	1455	258	295	797
Aisne	12/1983	<b>870</b>	515	73	82	200

Tableau 9-7 : bilan des indications  $\{NE\}$  récoltées

----- oOo -----

## 10. Phase de mise en cohérence

### 10.1. Introduction

Ce chapitre vise à présenter les résultats de "l'approche-photo" obtenus en appliquant l'algorithme (cf., § 7) de mise en cohérence sur les données extraites des photographies en crue et détaillées dans le chapitre précédent (cf., § 9). Pour bien comprendre le fonctionnement de l'algorithme, les actions et résultats intermédiaires sont également exposés. Dans ce chapitre, tous les résultats communiqués ont été calculés avec la méthode de relâchement par retrait (cf., § 8.5.2) qui m'a semblé la plus appropriée au regard des données altimétriques à ma disposition.

### 10.2. Indicateur retenu de précision des estimations

Pour illustrer l'impact des différentes étapes de la méthodologie présentée dans ce mémoire, j'ai choisi de présenter l'amplitude moyenne  $\mathbf{A}\hat{\mathbf{m}}_{100}$  des fourchettes d'estimations de la cote de l'eau sur les seuls compartiments  $C_i^{100}$  ayant une amplitude inférieure ou égale à un mètre, soit 100 cm (cf., *Eq. 10-1*). Le nombre  $\mathbf{Nc}_{100}$  de compartiments concernés (éventuellement exprimé en % par rapport au nombre total de compartiments) est donc aussi important que la valeur de l'estimateur d'amplitude  $\mathbf{A}\hat{\mathbf{m}}_{100}$ .

$$\mathbf{A}\hat{\mathbf{m}}_{100} = \frac{1}{\mathbf{Nc}_{100}} \sum_{C_i^{100}} (\mathit{Max}(C_i) - \mathit{Min}(C_i)) \quad \text{Eq. 10-1}$$

Notons bien que cet estimateur est uniquement représentatif de la précision des résultats fournis, et en aucun cas de son exactitude (ces concepts sont rappelés § 3.2.1.2). Une bonne valeur de ces estimateurs est donc nécessaire mais pas suffisante pour que les résultats soient de bonne qualité (*i.e.*, fourchette d'estimation des cotes de l'eau à la fois proche des cotes réelles et avec des faibles amplitudes). Un chapitre entier (cf., § 11) traite des problèmes de validation et d'évaluation de la qualité des résultats obtenus par "l'approche-photo".

### 10.3. Exemple de déroulement de l'algorithme pour la Moselle

Les résultats ci-dessous correspondent aux résultats détaillés pour les deux crues de la Moselle suivant le déroulement de l'**Algorithme A3** avec la méthode de relâchement par retrait. Seules les phases 2 (*i.e.*, élimination des conflits INTRA), 5 (*i.e.*, élimination des conflits INTER) et 6 (*i.e.*, test sur le nombre de points rejetés) présentent un intérêt et sont donc présentées ici.

Rappelons que dans les cas d'étude développés dans ce travail, deux degrés de préférence (*i.e.*,  $n = 2$ ) ont été retenus. Les valeurs initiales de cote de l'eau pour tous les compartiments ont été définies à 150 m NGF pour la valeur minimale de cote de l'eau (*i.e.*, Binf) et 250 m NGF pour la valeur maximale (*i.e.*, Bsup) ; fourchette très large par rapport aux cotes possibles.

Enfin, les résultats importants présentés ci-dessous pour la Moselle sont repris dans un tableau synthétique, et étendus pour les autres crues étudiées (cf., Tableau 10-1)

### 10.3.1. Gestion des indications "sûres" (*i.e.*, degré de préférence $P_1$ )

Dans cette phase, 1069 (*resp.* 2805) indications altimétriques appartenant à  $\{NE\}^{P_1}$  sont concernées pour la crue de décembre 1982 (*resp.* mai 1983).

#### Élimination des conflits INTRA (phase 2)

La phase 2 de l'algorithme a détecté 8 (*resp.* 15) compartiments présentant un conflit INTRA. Pour les éliminer, 17 (*resp.* 32) indications altimétriques du degré de préférence  $P_1$  ont été basculées vers le degré de préférence  $P_2$  pour la crue de décembre 1982 (*resp.* mai 1983). A ce niveau, seuls 51 (*resp.* 153) compartiments peuvent être estimés avec une amplitude inférieure ou égale à un mètre, et l'amplitude moyenne sur ces 51 compartiments vaut 0,26 m (*resp.* 0,47 m).

#### Élimination des conflits INTER (phase 5)

La phase 5 de l'algorithme a fait basculer 23 (*resp.* 6) indications altimétriques de  $P_1$  vers  $P_2$  afin d'éliminer l'ensemble des conflits INTER pour la crue de décembre 1982 (*resp.* mai 1983). La phase de rectification des estimations de cote de l'eau par propagation des contraintes INTER peut être appliquée.

#### Test sur le nombre de points rejetés (phase 6)

Le nombre total d'indications altimétriques rejetées est de 40 (*resp.* 38) pour la crue de décembre 1982 (*resp.* mai 1983). Les taux de rejet des indications de niveau  $P_1$  sont donc très faibles, inférieurs à 5 % (3,7 % pour décembre 1982 et 1,7 % pour mai 1983), ce qui est satisfaisant pour poursuivre la démarche.

#### Bilan en terme de précision

À l'issue de la mise en cohérence des indications "sûres", le nombre de compartiments renseignés avec une amplitude inférieure à 1 m atteint maintenant 202 (*resp.* 321) pour une amplitude moyenne de 0,52 m (*resp.* 0,43 m) pour la crue de décembre 1982 (*resp.* mai 1983).

L'impact de la phase de rectification par propagation des contraintes INTER apparaît clairement lorsque l'on compare ces chiffres avec ceux atteints après l'élimination des conflits INTRA : le nombre de compartiments estimés  $N_{c100}$  passe de 16% à 63% (*resp.* de 39% à 82%) alors que l'amplitude moyenne croît pour décembre 1982 mais décroît pour mai 1983.

### 10.3.2. Gestion des indications "moins sûres" (*i.e.*, degré de préférence $P_2$ )

Cette étape vise à valoriser les indications attribuées initialement au degré de préférence  $P_2$  ou basculées du niveau  $P_1$  vers  $P_2$  lors de la gestion des points "sûrs". Elle concerne 308 (*resp.* 391) indications. La sélection des points compris dans la fourchette d'estimation acquise lors de la gestion des points "sûrs", et donc susceptibles de resserrer cette estimation, conduit à n'en retenir que 39 (*resp.* 77).

#### Élimination des conflits INTRA

L'élimination des conflits INTRA réduit encore le nombre de points à 32 (*resp.* 68).

#### Élimination des conflits INTER

Dans les deux cas, aucun conflit INTER n'est relevé. La phase de rectification des estimations de cote de l'eau par propagation des contraintes peut directement être mise en oeuvre.

**Bilan en terme de précision**

À l'issue de la prise en compte des indications "moins sûres", le nombre de compartiments renseignés avec une amplitude inférieure à 1 m atteint maintenant 225 (*resp.* 330) pour une amplitude moyenne de 0,38 m (*resp.* 0,29 m) pour la crue de décembre 1982 (*resp.* mai 1983).

La considération des indications "moins sûres" a également un effet très important, à la fois sur le nombre de compartiments estimés  $N_{c100}$  et sur l'amplitude des estimations.

**10.3.3. Illustration sous forme cartographique**

Au fil du déroulement de l'algorithme de mise en cohérence, l'amplitude des estimations tend à diminuer comme l'illustre bien la Figure 10-1. Le nombre de compartiments se retrouvant estimés avec une amplitude inférieure ou égale à un mètre augmente très fortement.

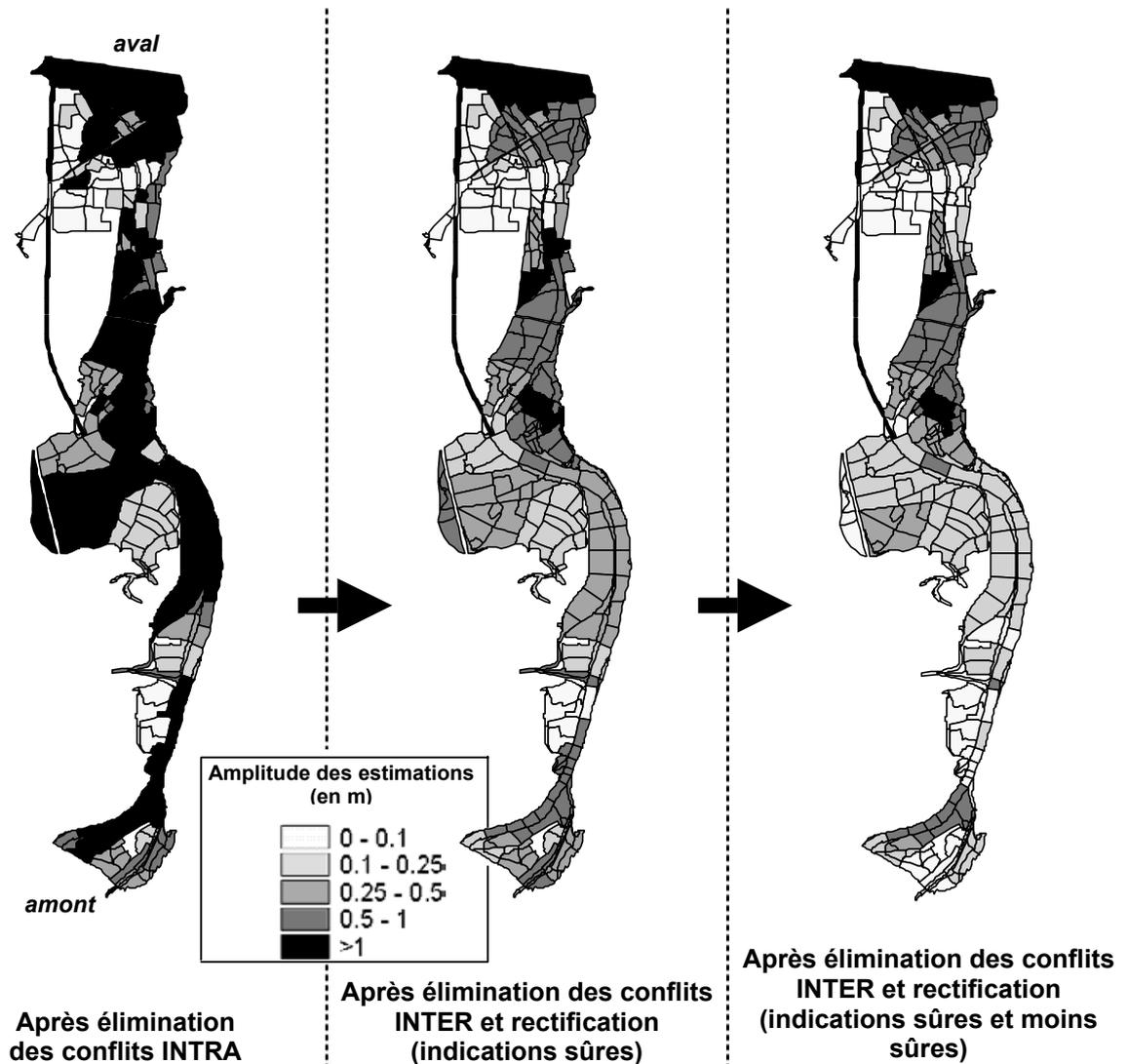


Figure 10-1 : effet de la mise en cohérence sur l'amplitude des estimations (cas de la Moselle pour le crue de mai 1983)

## 10.4. Déroulement de l'algorithme sur chaque site

Pour chaque crue étudiée, le taux de rejet pour les indications de la catégorie "sûre", *i.e.*, degré de préférence  $P_1$ , a toujours été très largement inférieur à 5%. Le déroulement de l'algorithme a donc pu aller à son terme pour chaque cas étudié.

### 10.4.1. Synthèse sur les évolutions en terme de précision

Les résultats obtenus sur chaque site d'étude au fil du déroulement de l'algorithme sont similaires (*cf.*, Tableau 10-1) et démontrent que l'apport des actions de rectification liées aux contraintes INTER est considérable : la majeure partie des compartiments (et même ceux n'ayant aucune indication altimétrique rattachée à l'issue de l'exploitation des photographies en crue) se retrouve finalement évaluée avec une amplitude d'estimation tout à fait en accord avec les exigences hydrauliques (de l'ordre de +/- 15 cm).

Site d'étude	Crue étudiée	Après l'élimination des conflits INTRA (indications "sûres")		Après l'élimination des conflits INTER et rectifications (indications "sûres")		Après l'élimination des conflits INTER et rectifications (indications "sûres" et "moins sûres")	
		A $\hat{m}p_{100}$	Nc <sub>100</sub>	A $\hat{m}p_{100}$	Nc <sub>100</sub>	A $\hat{m}p_{100}$	Nc <sub>100</sub>
Hérault	11/1994 (prise verticale)	53 cm	252 (66%)	43 cm	312 (82%)	38 cm	349 (92%)
	11/1994 (prise oblique)	64 cm	103 (27%)	59 cm	160 (42%)	57 cm	160 (42%)
Moselle	12/1982	26 cm	51 (16%)	52 cm	202 (63%)	38 cm	225 (71%)
	05/1983	47 cm	153 (39%)	43 cm	321 (82%)	29 cm	330 (84%)
Aisne	12/1983	61 cm	34 (41%)	35 cm	77 (94%)	26 cm	79 (96%)

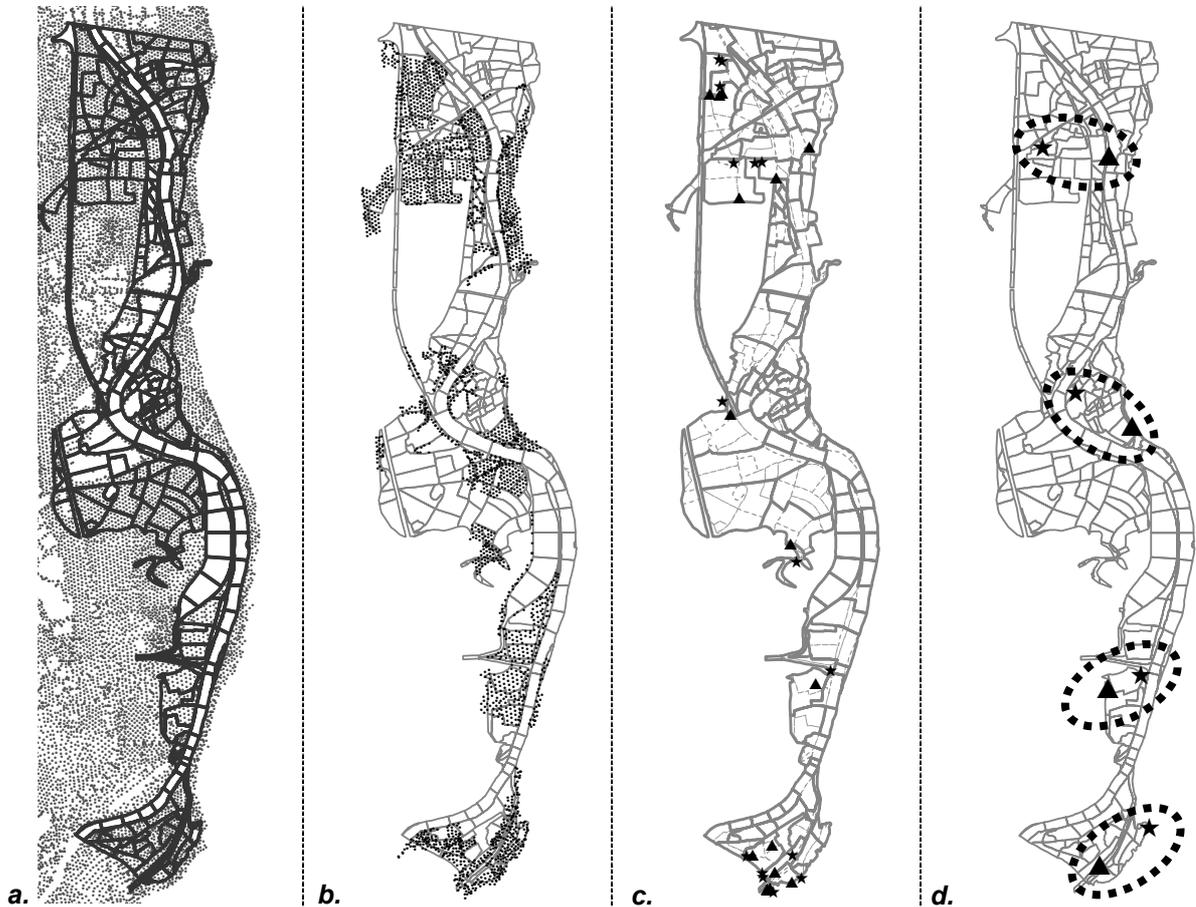
Tableau 10-1 : présentation synthétique du déroulement de l'algorithme sur chaque site

### 10.4.2. Traçabilité de l'information

Un point important de cette méthodologie est qu'elle permet d'individualiser et de cartographier les informations sources de conflit INTRA et INTER. La Figure 10-2 illustre le cheminement depuis les points cotés à disposition (a), la sélection des points cotés informatifs rentrant dans le système de contraintes (b), l'identification des points cotés qui ont subi un relâchement INTRA pour éliminer les conflits INTRA (c), jusqu'à l'identification des compartiments contenant les points cotés actifs dans les conflits INTER (d).

Cette "traçabilité" tout au long de la chaîne de traitement permet d'établir une cartographie des informations sources de conflit qui permet de vérifier rapidement si l'origine est localisée ou plutôt statistique. En permettant de revenir à l'information initiale, elle permet également d'analyser individuellement, et donc plus précisément, l'origine des conflits. Si l'erreur ne vient pas de la phase d'extraction des informations de télédétection (*e.g.*, erreur d'interprétation), il convient de vérifier l'exactitude de l'information altimétrique initiale (*e.g.*, altitude du point coté) en allant, par exemple, réaliser des mesures sur le terrain.

Enfin, les conflits INTER apparaissent généralement limités à des zones restreintes (*cf.*, Figure 10-2d). Cependant quelques cas d'erreurs très grossières peuvent conduire à des étendues de conflit INTER nettement plus importantes.



*Figure 10-2 : traçabilité des informations (a. ensemble des points cotés ; b. points cotés informatifs utilisés, c. points cotés "sûrs" sources de conflit INTRA, d. compartiments contenant les informations sources de conflit INTER)*

### 10.4.3. Temps de calcul

Le déroulement de la totalité de l'algorithme (avec lecture des données, vérification du chaînage amont-aval, phase de mise en cohérence sur l'ensemble des compartiments et réécriture des résultats) prend, avec un Pentium III de fréquence 1GHz, moins de 10 minutes dans la version simplifiée des équilibres et moins d'une heure dans la version intégrale. Il nécessite de l'ordre de 10 Mo de RAM.

## 10.5. Résultats finaux

Comme les contraintes se propagent d'amont en aval pour les actions de rectification agissant sur les bornes Max, et dans le sens inverse pour les actions Min, les compartiments situés aux extrémités amont et aval sont faiblement contraints, contrairement à un compartiment situé dans la zone centrale du champ d'inondation. En conséquence, les estimations des compartiments situés aux extrémités ont souvent des amplitudes plus lâches (*cf.*, Figure 10-1 surtout à l'aval).

Pour limiter ces effets de bordure, il peut être judicieux d'appliquer la méthode sur une zone débordant légèrement de la zone utile. C'est pourquoi ces quelques compartiments ont été exclus des résultats finaux consignés dans le Tableau 10-2. Sur l'indicateur utilisé, le gain est essentiellement visible dans l'augmentation du pourcentage de compartiments ayant une plage d'estimation inférieure à un mètre.

Site d'étude	Crue étudiée	Résultats finaux	
		$\hat{A}m_{100}$	$N_{c100}$
Hérault	11/1994 (prise verticale)	36 cm	319 (94%)
	11/1994 (prise oblique)	56 cm	151 (44%)
Moselle	12/1982	38 cm	208 (80%)
	05/1983	30 cm	301 (92%)
Aisne	12/1983	23 cm	70 (100%)

**Tableau 10-2 : résultats finaux de "l'approche-photo"**  
(après exclusion des compartiments situés aux extrémités amont et aval)

Si l'on exclut le cas particulier de la valorisation des campagnes photographiques obliques sur l'Hérault, la précision des estimations apparaît, dans tous les cas, de l'ordre de 15 à 20 cm pour la demi-amplitude moyenne, avec la quasi-totalité des compartiments estimés (de 80% à 100%).

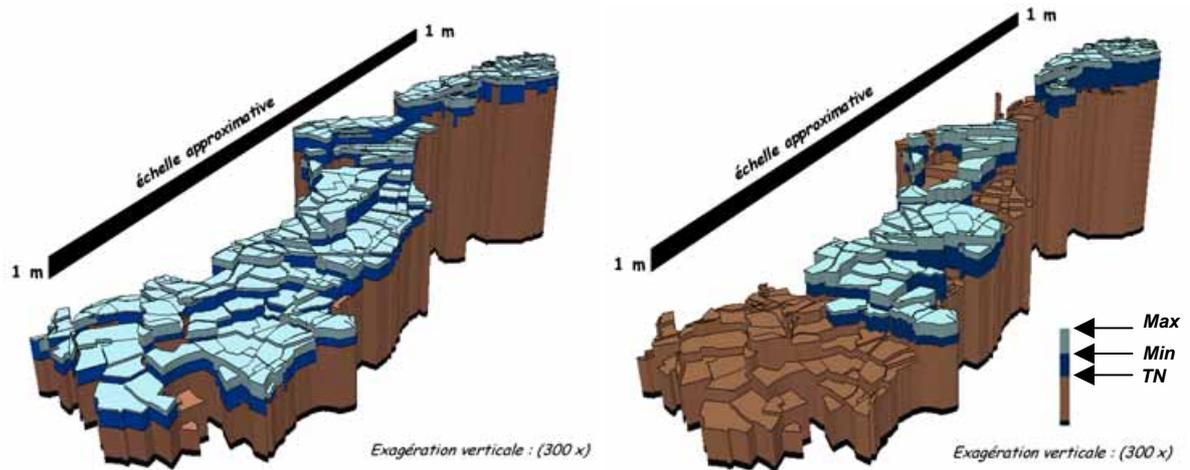
La valeur réelle de la cote de l'eau peut donc être approchée par la valeur centrale de cette plage d'estimation, *i.e.*,  $(\text{Min} + \text{Max})/2$ , avec une plage de variation associée égale à plus ou moins la demi-amplitude. Notons que la demi-amplitude de variation est un estimateur par excès de la qualité d'une variable par rapport aux approches classiques (*cf.*, Fig. A6\_ 1) qui estiment l'erreur d'une variable (supposée normale) sous une forme probabiliste du type écart-type  $\sigma$  ou erreur moyenne quadratique. En effet, pour une valeur de demi-amplitude égale à celle de l'écart type, la plage  $[\mathbf{m} - \hat{A}m_{100}/2 ; \mathbf{m} + \hat{A}m_{100}/2]$  contient 100 % des estimations alors que la plage  $[\mathbf{m} - \sigma ; \mathbf{m} + \sigma]$  n'en contient que 68.3 % (avec  $\mathbf{m}$  le centre de la plage d'estimation ou la moyenne de la variable).

**La valeur de 15 à 20 cm pour la demi-amplitude place donc ces résultats dans une gamme de qualité compatible avec les exigences hydrauliques dans le lit majeur.**

## 10.6. Résultats 3D

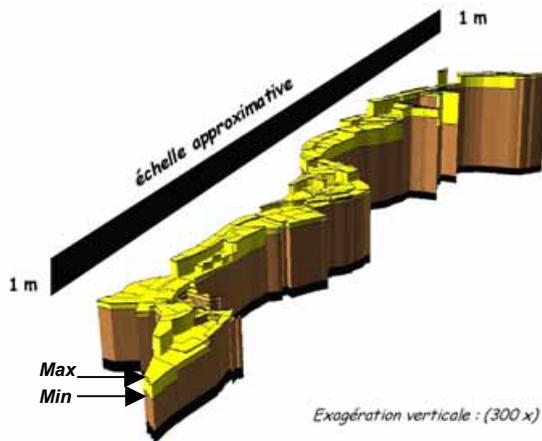
La restitution 3D (en 3 dimensions) constitue une présentation globale synthétique des résultats obtenus sur la plaine inondée (*cf.*, Figure 10-3), intéressante par son caractère réaliste. Elle permet notamment de distinguer, en une seule image, la logique de décroissance des niveaux d'eau. L'identification des ruptures dans cette décroissance (*cf.*, Figure 10-3a) est révélatrice d'une structure linéaire (*e.g.*, digue) réellement active au moment des prises de vue.

D'autres formes de présentation de ces résultats pourront être trouvées dans les chapitres suivants, au fil des différentes analyses qui seront menées.

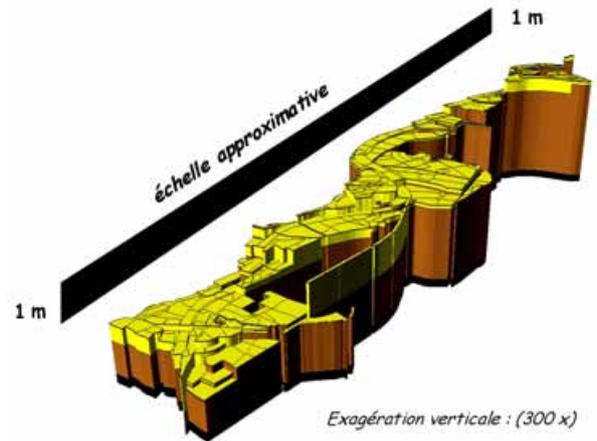


a. Hérault (photos verticales)

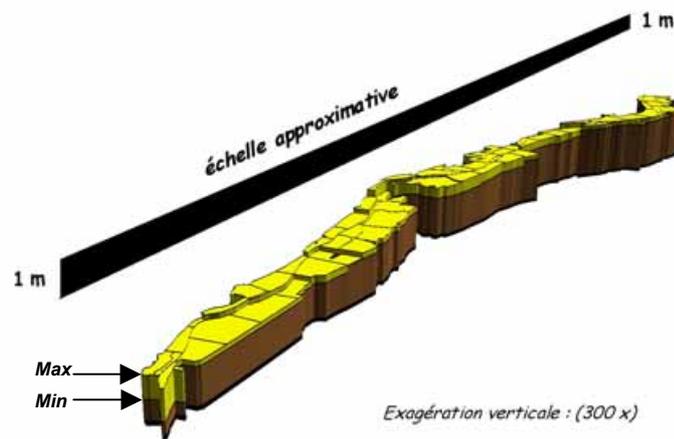
b. Hérault (photos oblique)



c. Moselle (décembre 1982)



d. Moselle (mai 1983)



e. Aisne

Figure 10-3 : représentation en 3D (3 dimensions) des résultats de "l'approche-photo" sur les différents sites d'étude

----- oOo -----



# **PARTIE V :**

## **Discussions**

**Chapitre 11 : Validation**

**Chapitre 12 : Analyse de sensibilité**

**Chapitre 13 : Confrontation de "l'approche-photo" avec la modélisation hydraulique**

**Chapitre 14 : Bilan et perspectives pour "l'approche-photo"**

## Sommaire de la PARTIE V

<b>11. VALIDATION</b> .....	<b>181</b>
11.1. Introduction .....	181
11.2. La validation interne .....	181
11.3. Validation externe .....	182
11.4. Conclusion sur les validations menées de "l'approche-photo" .....	196
<b>12. ANALYSE DE SENSIBILITÉ</b> .....	<b>197</b>
12.1. Influence de la taille maximale des compartiments .....	197
12.2. Influence de la méthode de relâchement .....	198
12.3. Influence du nombre d'informations {NE} sur l'amplitude des estimations finales .....	201
12.4. Conclusion de l'analyse de sensibilité .....	203
<b>13. CONFRONTATION DE "L'APPROCHE-PHOTO" AVEC LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE SUR LE SITE HÉRAULT</b> .....	<b>205</b>
13.1. Caractéristiques générales du modèle utilisé .....	205
13.2. Simulations réalisées .....	206
13.3. Analyse "classique" des résultats de simulation .....	209
13.4. Confrontation des résultats de simulation avec ceux de "l'approche-photo" .....	211
<b>14. BILAN ET PERSPECTIVES POUR "L'APPROCHE-PHOTO"</b> .....	<b>215</b>
14.1. Réflexions sur la méthodologie développée .....	215
14.2. Positionnement vis-à-vis des approches "classiques" d'analyse de l'aléa .....	216
14.3. Intérêts .....	217
14.4. Limites .....	220
14.5. Perspectives .....	220

# 11. Validation

## 11.1. Introduction

La validation de techniques visant à reproduire le comportement d'un système naturel complexe (*i.e.*, difficilement observable et à forte composante spatio-temporelle) est, et sera toujours, une phase délicate qui ne peut conduire qu'à une validation partielle. Ceci est lié au fait que le processus de validation est en réalité un processus de falsification [Bates et Anderson, 2001] reposant sur le principe suivant : une méthode reste valide tant que le contraire n'a pas été prouvé (*cf.*, discussions § 1.2.6.3, § 2.4.3.2.1 et § 3.3.2).

La validation est d'autant plus acceptable que le nombre de tests couvrant le domaine de l'application a été effectué. Assurer la validité d'une méthode est donc un processus indispensable, mais extrêmement coûteux et jamais complètement acquis (en tout cas dans les problématiques environnementales de phénomènes complexes et difficilement observables). Pour s'en approcher toutefois, deux grandes voies sont classiquement utilisées :

- La première, appelée **validation interne**, consiste à vérifier le bon déroulement de la méthode au cours de son application. Elle constitue donc une vérification nécessaire mais non suffisante.
- La seconde, appelée **validation externe**, vise à tester la méthode sur des cas réels en comparant les valeurs estimées par la méthode avec des valeurs extérieures supposées de bonne qualité (*i.e.*, au moins aussi bonne que celle des résultats estimés par la méthode).

La validation externe réalisée sur un large éventail de cas réels reste, sans aucun doute, la voie la plus satisfaisante, mais la difficulté de mise en œuvre d'une telle technique dans le cas de systèmes naturels complexes donne d'autant plus de sens et d'importance à la validation interne.

Dans ce chapitre, ces deux démarches sont présentées et illustrées sur les différents cas d'application.

## 11.2. La validation interne

Pour "l'approche-photo", la validation interne consiste à vérifier l'hypothèse à la base de l'ensemble de la démarche méthodologique, *i.e.*, que les indications altimétriques sur le toit de l'eau ({NE}) extraites des images de télédétection ne sont pas majoritairement erronées. Elle est effectuée, pour chaque degré de préférence, à travers le test du pourcentage d'informations {NE} ayant subies des relâchements pour éliminer les conflits INTRA et INTER et obtenir la cohérence hydraulique.

Un seuil de 5% pour les informations affectées d'un degré de confiance  $P_1$  (le plus élevé), me paraît être une valeur à ne pas dépasser si l'on veut accorder du crédit au résultat. Si ce seuil est dépassé, il faut s'arrêter et rechercher la ou les causes de cette non cohérence. Pour cela, la traçabilité des informations tout au long de notre approche (*cf.*, § 10.4.2) est d'une aide appréciable. Dans tous les cas d'étude présentés, ce seuil de 5% n'a jamais été dépassé, ce qui a permis de valider l'hypothèse émise et de continuer la démarche.

Pour les degrés de préférence inférieurs, ce ratio est plus délicat à calculer car cette phase commence par une sélection des seules informations pouvant améliorer le résultat acquis avec le degré de préférence supérieur. Une information {NE} incohérente peut donc être exclue avant même de rentrer dans le processus de détection des incohérences. Le calcul du ratio est alors basé sur les seules informations sélectionnées et le seuil à ne pas dépasser devient d'une interprétation beaucoup plus délicate. Un seuil de tolérance plus élevé doit alors être retenu (*e.g.*, 10%). Ce seuil a également été respecté dans tous les cas d'étude.

### 11.3. Validation externe

Comme dans toute modélisation d'un phénomène réel historique, une confrontation avec des données externes (*e.g.*, données de terrain) reste un complément indispensable à la validation interne pour une validation "robuste".

#### Présentation générale

Le problème de validation consiste à comparer un jeu de données provenant de la méthode que l'on cherche à valider, *i.e.*, jeu "résultat", avec un jeu de données externes, *i.e.*, jeu "référence". Dans le cas où le phénomène modélisé est un système naturel ayant une composante temporelle et spatiale, la validation externe pose le problème du choix adéquat du jeu "référence".

Les deux jeux devant être comparés, il convient de s'interroger sur leur **compatibilité** aux différents niveaux suivants :

- signification thématique (encore appelée sémantique) ;
- précision (*e.g.*, quantitatif ou qualitatif) : le jeu "référence" doit être au moins aussi précis (et fiable) que le jeu "résultat" ;
- échelle temporelle (*i.e.*, instant ou durée) ;
- échelle spatiale (*i.e.*, ponctuel ou surfacique).

#### Présentation pour "l'approche-photo"

Les caractéristiques du jeu "résultat" provenant de "l'approche-photo" sont répertoriées dans le Tableau 11-1 selon ces différents niveaux.

<i>Niveaux</i>	<i>Jeu "résultat"</i>
signification thématique	cote NGF du niveau du toit de l'eau
précision	sous forme d'une plage d'estimation [Min, Max] dont la demi amplitude moyenne vaut 20 cm environ
échelle temporelle	à l'instant de la campagne de prise de vue
échelle spatiale	une estimation par compartiment (entité surfacique)

*Tableau 11-1 : caractéristiques du jeu "résultat" provenant de l'approche "photo"*

Après avoir vérifié la signification thématique d'un jeu de référence potentiel, il faut s'interroger sur sa précision, sur la correspondance temporelle (concomitance), ainsi que sur sa signification spatiale.

Dans le but de réaliser au mieux cette validation, trois voies complémentaires, et en aucun cas exclusives, semblent intéressantes :

1. Recours à des informations historiques (*e.g.*, données mesurées in situ au cours de la crue) ;
2. Acquisition de nouvelles données de validation ;
3. Comparaison avec des résultats provenant d'autres approches (*e.g.*, la modélisation hydraulique).

### **11.3.1. Recours à des informations historiques**

Les informations historiques généralement mobilisables sur une crue passée sont de trois types (*cf.*, § 1.2.3) : des limnigrammes, les laisses de crues et les témoignages. Cependant, force est de constater, sauf cas très particulier, la faible disponibilité de telles données.

#### ***11.3.1.1. Intérêts pour la validation***

##### **Les limnigrammes**

Mesures provenant de stations hydrométriques automatisées (et plus rarement de relevés manuels), les limnigrammes répertorient la hauteur et cote de l'eau en fonction du temps. Cette mesure, réalisée en permanence, est suffisamment précise (inférieure au décimètre) pour l'objectif de validation fixé mais elle présente toutefois certaines limites liées à 1) la faible densité spatiale des stations de mesures (tous les 10 km au mieux sans compter les défaillances); 2) leur localisation uniquement en lit mineur sur des sections de contrôle au gabarit souvent réduit (la vitesse y est donc très élevée par rapport au lit majeur). Leur intérêt est donc entier mais limité au contrôle de quelques rares points particuliers.

##### **Les repères de crue**

Les repères de crues sont formés de laisses de crue ayant une précision inférieure au décimètre. Leur intérêt pour la validation réside dans le fait que ces données sont distribuées au sein du champ d'inondation. En contrepartie, ces mesures représentent le maximum de la crue et sont donc non concomitantes entre elles et avec les résultats de "l'approche-photo". Leur intérêt pour la validation consiste à vérifier qu'elles constituent bien un majorant de la cote de l'eau issue des estimations de "l'approche-photo".

##### **Les témoignages**

Récupérés auprès des habitants, les témoignages sont très utiles mais difficiles à recueillir plusieurs années après un événement. De plus chaque témoignage individuel ne peut être considéré comme fiable et seule une confrontation de plusieurs d'entre eux peut procurer une information utile à la validation. Leur intérêt est donc limité au cas où le recueil de témoignages a été soigneusement organisé et mis en cohérence.

#### ***11.3.1.2. Exemple 1 : limnigramme sur l'Aisne***

Des relevés de cote de l'eau sont réalisés sur l'Aisne trois fois par jour à l'amont et à l'aval immédiat de chaque écluse. L'objectif de ces mesures, qui sont centralisées à Soissons, est d'optimiser la gestion coordonnée des différents seuils (réglables en section) qui se trouvent au droit des écluses sur des tronçons en parallèle, *i.e.*, relèvement de la ligne d'eau pour des besoins de navigation en période d'étiage et minimisation du relèvement de la ligne d'eau en période de crue.

Comme deux écluses sont présentes sur le site d'étude, quatre mesures de cotes concomitantes avec la prise des clichés sont disponibles. La comparaison avec les résultats obtenus par "l'approche-photo" est indiquée en Figure 11-1.

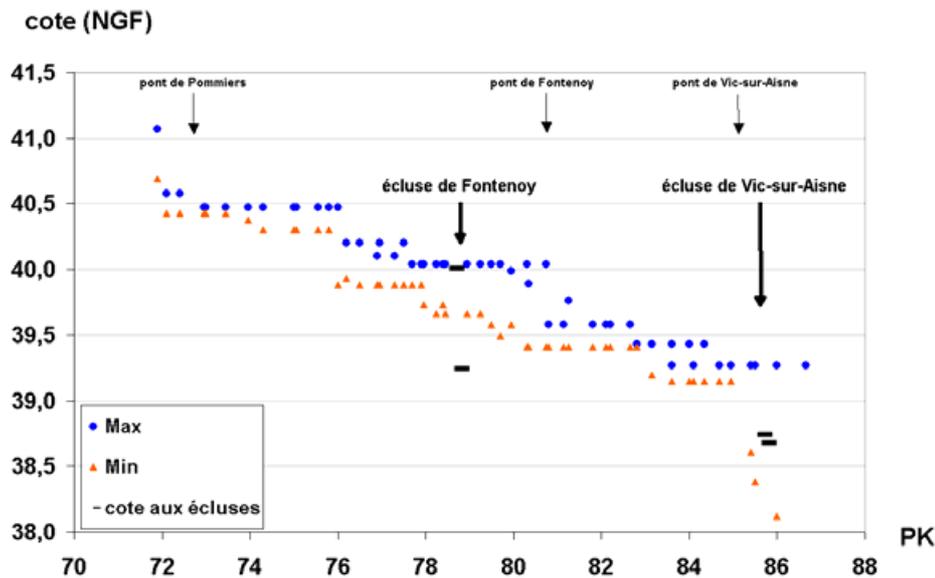


Figure 11-1 : comparaison sur l'Aisne des résultats de "l'approche-photo" avec des relevés de cote aux écluses

On constate une parfaite concordance pour trois des quatre mesures, les cotes mesurées à l'échelle limnimétrique étant situées dans l'intervalle d'estimation. Par contre la cote mesurée à l'aval de l'écluse de Fontenoy est nettement plus faible que les valeurs estimées (40 cm par rapport au Min). Nous avons donc cherché à expliquer cette non-concordance en étudiant de plus près les deux jeux de données.

Une vérification locale approfondie de la position des limites de crue et des points cotés disponibles (cf., Figure 11-2) tend à confirmer la valeur mesurée par "l'approche-photo" (cote proche de 40 m NGF juste à l'aval de l'écluse).

A l'inverse, la valeur de la cote mesurée au limnigramme situé à l'aval immédiat de l'écluse de Fontenoy (39,24 m) est également confirmée par une laisse de crue (la seule disponible sur le site pour l'événement étudié) qui se situe au niveau du lit mineur à l'aval immédiat de l'écluse de Fontenoy (cf., Figure 11-2) et qui vaut 39,20 m. L'explication de la non-concordance n'est donc pas une erreur de mesure au niveau de l'échelle limnimétrique. Il semblerait plus vraisemblable que la non-concordance des valeurs provienne d'une différence de signification thématique (et spatiale) entre les deux valeurs : alors que la valeur mesurée à l'échelle limnimétrique représente la cote de l'eau en lit mineur juste à l'aval du couple d'ouvrage "seuil + écluse", la cote de l'eau issue des résultats de "l'approche-photo" représente plutôt le niveau d'eau sur les bordures du lit majeur. Or, pour une même charge hydraulique, les fortes vitesses présentes localement à l'aval du seuil ont tendance à abaisser la cote de l'eau. Ceci signifie que la cote de l'eau dans le lit mineur est localement nettement plus basse que sur les bordures du champ d'inondation au droit de l'ouvrage. Il n'y aurait donc pas uniformité de la cote du toit de l'eau dans les sections situées immédiatement à l'aval du couple "seuil + écluse" à Fontenoy. Par ailleurs cela semble indiquer que le comportement hydraulique de ce couple d'ouvrages se distingue du comportement des autres couples "seuil + écluse" pour lesquels la dénivelée observée est plutôt de l'ordre de 10 à 20 cm et non de 0,74 m comme cela a été mesuré à Fontenoy. Cette différence de fonctionnement n'a rien d'étonnant lorsque l'on sait que le seuil de Fontenoy est le plus important de la rivière Aisne, correspondant à une différence d'environ 2 m sur le profil en long du lit mineur alors qu'elle est de moins de 1,50 m pour tous les autres seuils. Les importants bourrelets de berges présents autour des ouvrages à Fontenoy doivent également participer à ce dénivelé en évitant tout "court-circuit".

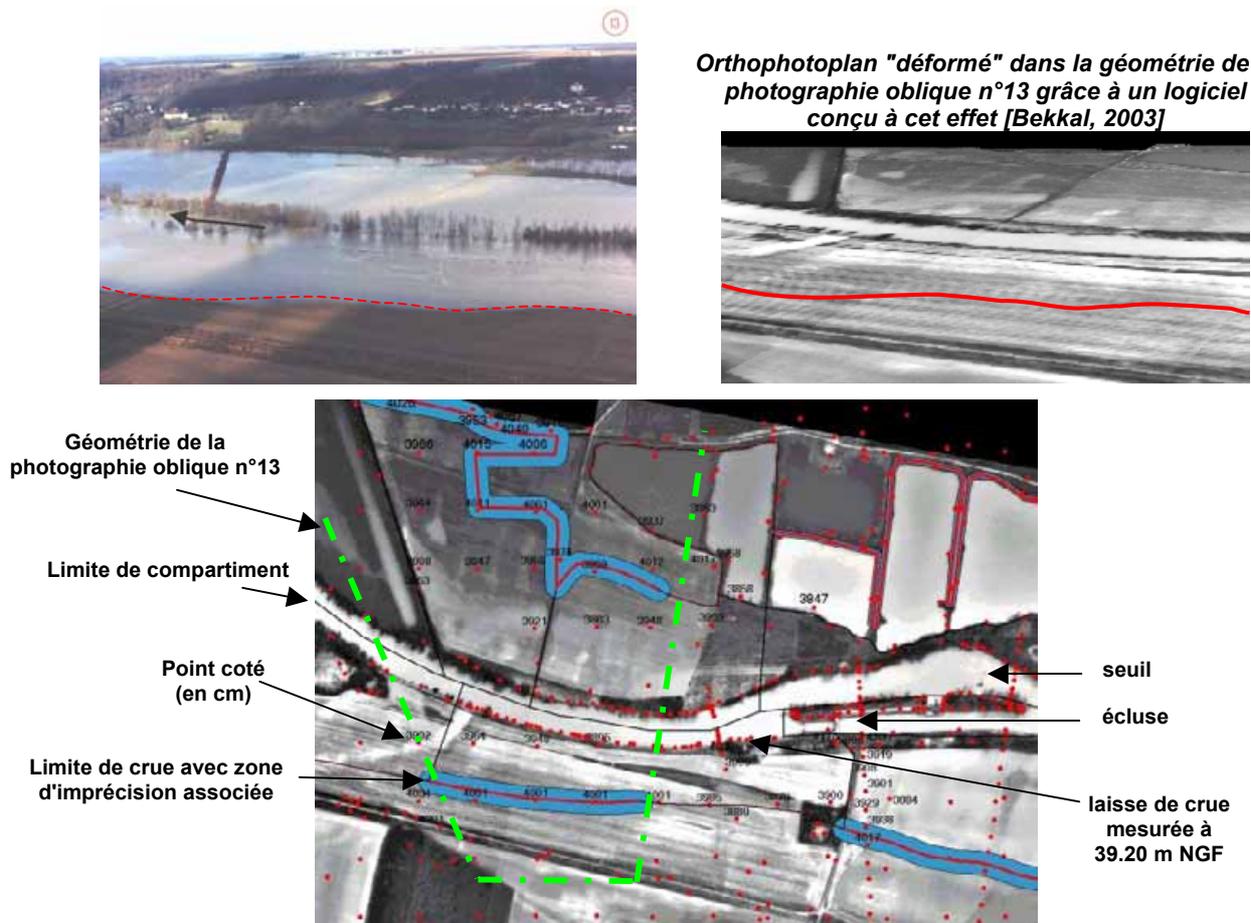


Figure 11-2 : vérification de la cohérence du résultat obtenu par "l'approche-photo" à l'aval de l'écluse de Fontenoy

Au final, les mesures de cote aux écluses apparaissent donc en accord avec les résultats issus de "l'approche-photo".

### 11.3.1.3. Exemple 2 : repères de crue sur l'Hérault (cas des photographies verticales)

Sur l'Hérault, la Direction Départementale de l'Équipement (DDE 34) a pris l'habitude, après chaque crue, d'enrichir une base de données sur les laines maximales atteintes par la crue en de nombreux points du champ d'inondation. Les mesures sont réalisées à des endroits déterminés, où les traces sont nettement visibles et où une référence altimétrique NGF a été déterminée par un géomètre. Elles apparaissent donc assez précises (de l'ordre du décimètre) et fiables. Proprement nivelées et archivées (*cf.*, Annexe 2), ces mesures de repères de crue sont très denses et constituent donc une connaissance très précieuse sur les crues historiques.

#### Présentation et critique des repères de crue

Le sérieux de la démarche de collecte des repères de crue fait que l'on peut avoir une bonne confiance en leur valeur de cote. La Figure 11-3a cartographie la valeur des repères de crue qui apparaissent globalement très cohérents entre eux à l'exception d'un cas isolé (cercle noir).

On pourra remarquer les disparités de valeurs entre la rive droite et la rive gauche, avec en particulier une très forte cassure dans le comportement hydraulique rive gauche (flèche). Des différences entre les cotes maximales atteintes aux alentours du lit mineur, et celles atteintes sur les bordures du champ d'inondation, sont également visibles. Cette première analyse permet de cerner le comportement

extrêmement complexe de la basse plaine Hérault dû à la très forte densité de structures linéaires telles que digues, murets, fossés...

### Comparaison repères de crue / estimations de "l'approche-photo"

La comparaison des valeurs de repères de crue avec les résultats de "l'approche-photo" au moment de la campagne de prises de vue *verticales* est indiquée en Figure 11-3b. Pour comparer la valeur du repère de crue (une valeur unique et ponctuelle, notée **Rc**) avec l'estimation "photo" (plage [**Min** ; **Max**] valable pour un compartiment), j'ai choisi 1) de comparer la valeur du repère avec l'estimation du compartiment dans lequel ce repère se trouve et 2) de mesurer l'écart entre la valeur du repère de crue et la plage d'estimation de la façon suivante :

- Si  $Rc \in [\text{Min} ; \text{Max}]$ , alors  $\text{écart} = 0$  (valeur nulle, situation conforme) ;
- Si  $Rc > \text{Max}$ , alors  $\text{écart} = Rc - \text{Max}$  (valeur positive, situation conforme) ;
- Si  $Rc < \text{Min}$ , alors  $\text{écart} = Rc - \text{Min}$  (valeur négative, situation non conforme).

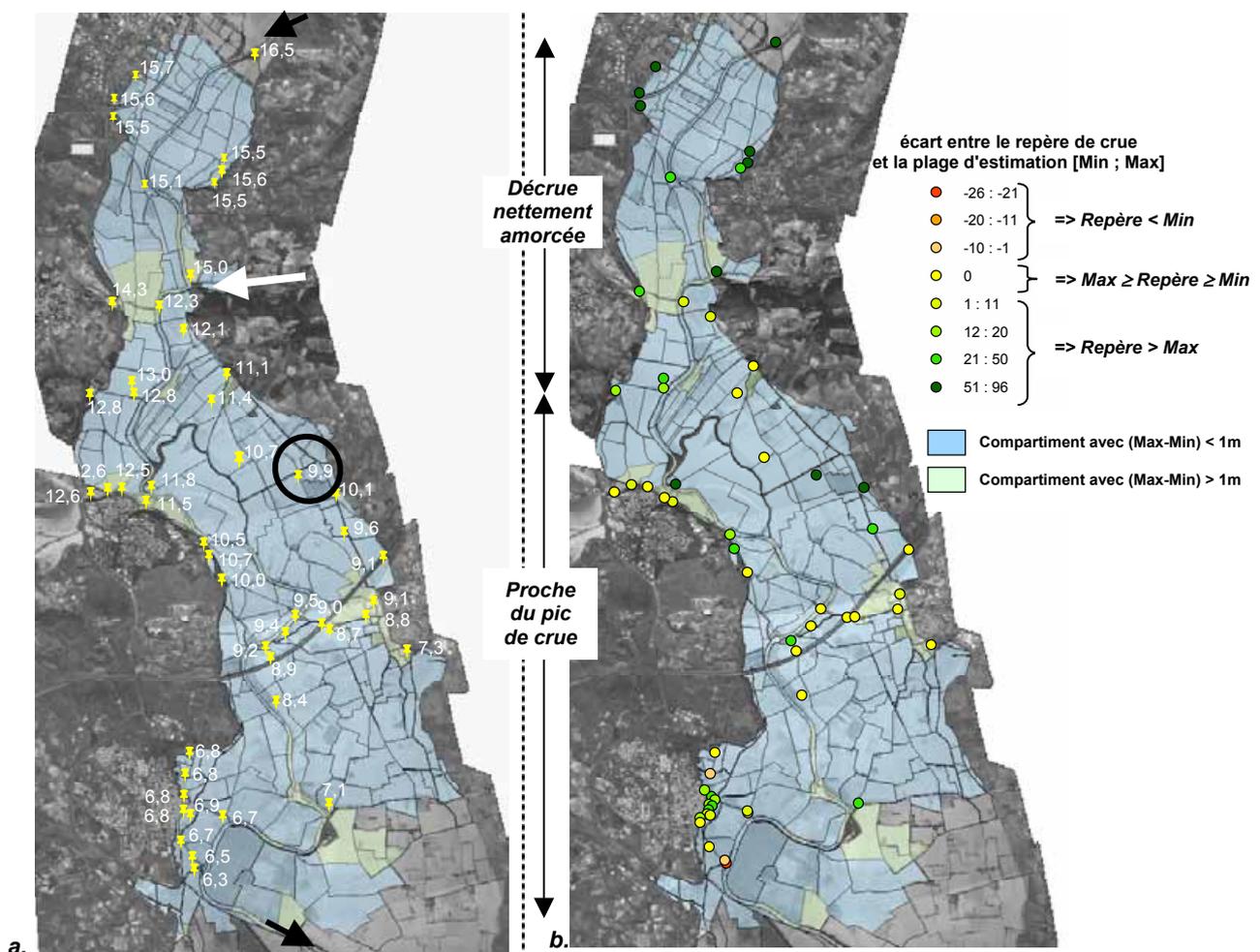
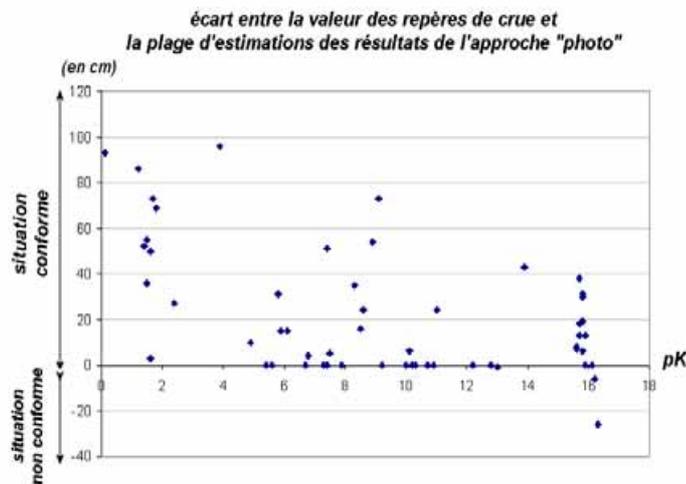


Figure 11-3 : repères de crue disponibles pour la crue de nov. 1994 sur l'Hérault (a) et comparaison avec les résultats de "l'approche-photo" pour la campagne de photographies verticales (b)

La comparaison montre que les résultats sont globalement compatibles avec les repères de crue puisque seuls deux écarts sont négatifs (*cf.*, points dans les dégradés de rouge sur la Figure 11-3b ou valeurs négatives sur la Figure 11-4). Pour tous les autres points, la valeur du repère de crue est incluse ou supérieure à l'estimation [Min ; Max] trouvée par "l'approche-photo" (valeurs nulles ou positives

sur la Figure 11-4). Ceci est parfaitement cohérent avec le fait qu'un repère de crue est un majorant de la cote de l'eau, et ce quel que soit l'instant considéré de la crue.



*Figure 11-4 : représentation des écarts entre repères de crue et résultats de "l'approche-photo" selon un point kilométrique approximatif*

La valeur des écarts est plus élevée à l'amont du site et a tendance à diminuer progressivement en allant vers l'aval (*cf.*, Figure 11-4). Ceci est en parfaite conformité avec l'instant de la prise de vue des photographies aériennes verticales qui se situe au moment du passage du pic de crue dans le lit mineur à l'aval du site (*cf.*, Figure 5-4). La portion amont est dans une phase de décrue alors que celles centrale et aval sont proches du maximum des eaux.

Une valorisation des repères de crue a également été effectuée sur la Moselle (*cf.*, Annexe 9). Ce cas apparaît moins intéressant dans la mesure où le nombre de repères de crue est nettement plus faible.

### 11.3.2. Comparaison avec des résultats provenant d'autres approches

La confrontation de résultats provenant de plusieurs approches est parfois utilisée dans des étapes de validation. Si une approche est plus fiable et précise que les autres, alors ses résultats peuvent servir de jeu de données référence pour une validation des autres approches. Si elles ont des qualités du même ordre de grandeur, seule une vérification de la cohérence des résultats est possible : on parle alors de *validation croisée*.

Dans ce paragraphe, la discussion est limitée à la modélisation hydraulique mathématique. Comme la qualité des estimations de hauteur d'eau issues d'une telle approche est classiquement estimée à quelques décimètres, *i.e.*, proche de celle attendue pour "l'approche-photo", la comparaison permet uniquement une validation croisée.

En cas de concordance des résultats, les approches se confortent mutuellement, ce qui contribue à leur validation. Dans le cas contraire, la responsabilité ne peut être imputée à aucune approche de façon sûre, et il faut alors rechercher les raisons de cette non concordance.

Nous présentons dans ce paragraphe un cas de comparaison sur l'Aisne. Une étude plus approfondie de la complémentarité de "l'approche-photo" et de la modélisation hydraulique sera traitée dans le chapitre 13 sur l'Hérault grâce à une modélisation spécialement mise en œuvre dans ce cadre.

### 11.3.2.1. Exemple 3 : comparaison avec les résultats d'un modèle hydraulique sur l'Aisne

Le Cetmef de Compiègne nous a fourni une modélisation hydraulique 1D (cf., § 1.2.5.2.2) réalisée en régime permanent sur le site de l'Aisne. La Figure 11-5 présente la confrontation des résultats issus de la modélisation hydraulique et de "l'approche-photo".

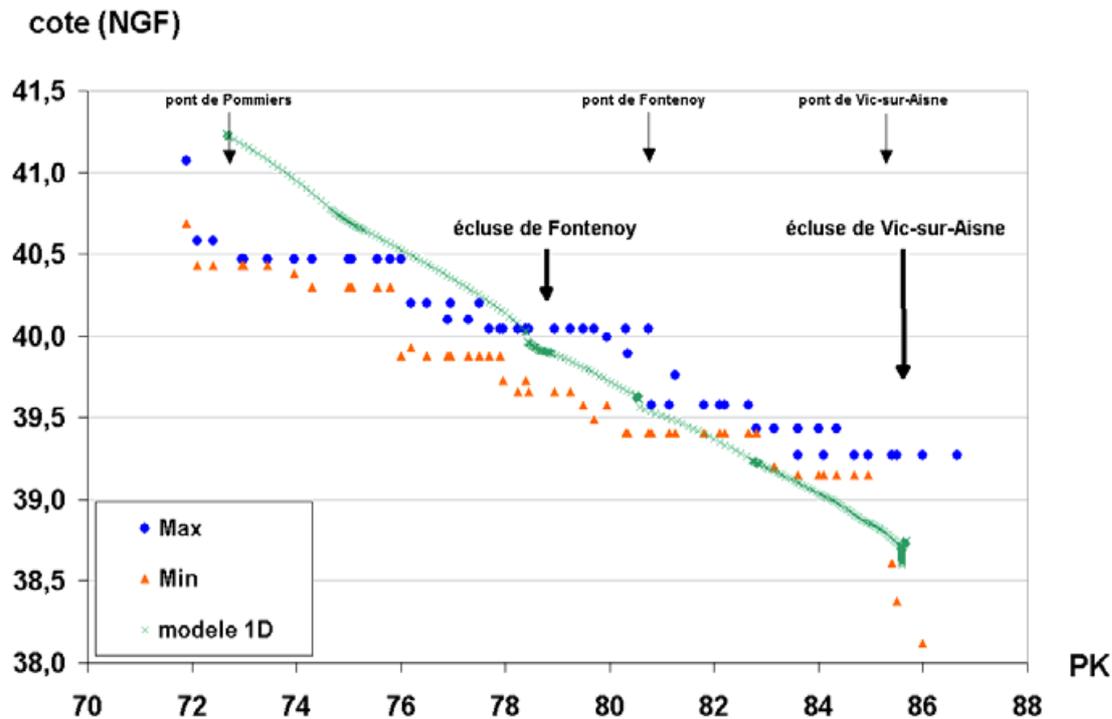


Figure 11-5 : comparaison sur l'Aisne des résultats de "l'approche-photo" avec les résultats d'un modèle hydraulique 1D

Cette confrontation montre une bonne concordance globale des deux résultats sur la majeure partie du linéaire de rivière malgré :

- une allure générale très différente puisque celle fournie par le modèle 1D est très linéaire alors que celle produite par "l'approche-photo" s'avère être en "marches d'escalier" ;
- des différences significatives sur la partie amont du site d'étude puisque le modèle 1D donne, au niveau du pont de Pommiers, une estimation de la cote de l'eau supérieure de 80 cm à la borne Max de l'estimation issue de "l'approche-photo".

Nous commençons par discuter des allures générales pour en venir ensuite à la recherche d'une explication sur la source de cette différence à l'amont du site.

#### Discussion sur l'allure générale des résultats

Contrairement aux résultats de "l'approche-photo", la modélisation 1D montre une allure très régulière de la ligne d'eau entre deux écluses consécutives (là où une information altimétrique de calage a été utilisée), qui s'apparente fortement à des segments de droite. L'influence nulle de nombreux rétrécissements de la largeur au miroir (cf., Figure 11-6), imposés par exemple par la présence d'un pont, peut paraître un peu surprenante.

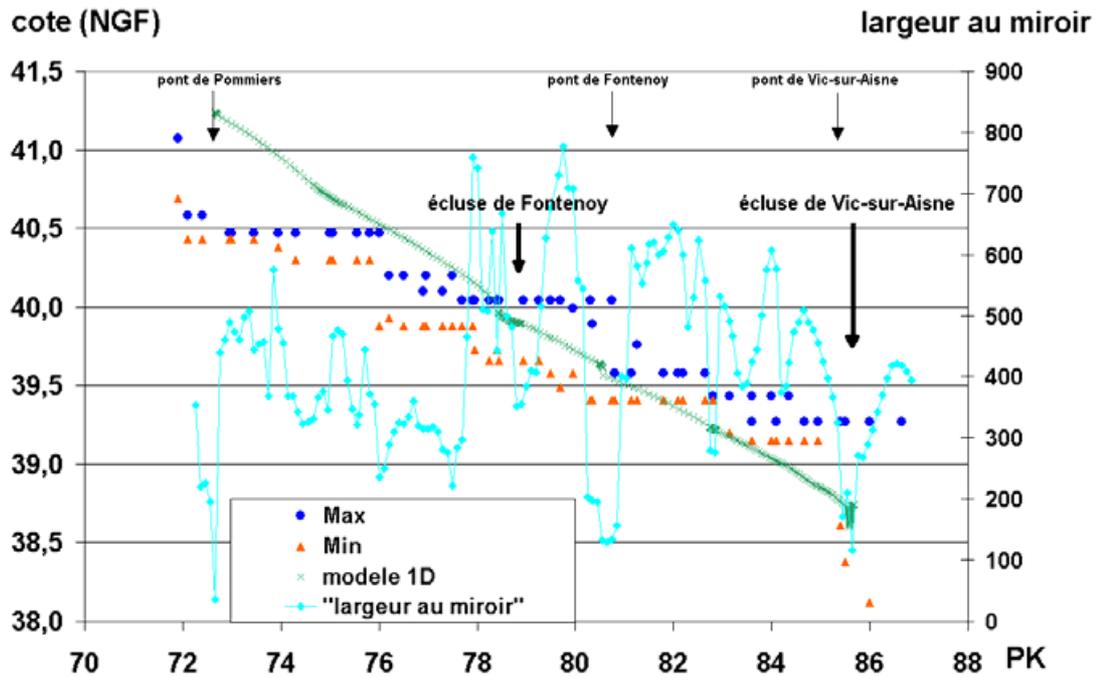


Figure 11-6 : variation d'amont en aval de la largeur au miroir et allure générale des résultats des deux approches

L'allure irrégulière de la ligne d'eau, issue de "l'approche-photo", pourrait s'expliquer par la présence de ponts qui réduisent brutalement la section de passage en formant un obstacle à l'écoulement. Un pont devrait "localiser" la perte de charge à son niveau, ce qui n'apparaît pas dans les résultats du modèle 1D. La Figure 11-7 illustre l'effet possible d'un pont sur la ligne d'eau (en trait plein), qui s'éloigne d'une décroissance régulière (en pointillés) et rejoint l'allure en "marches d'escalier" remarquée dans les résultats de "l'approche-photo".

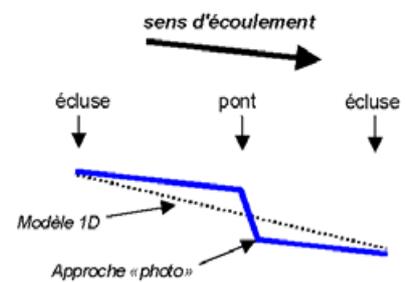


Figure 11-7 : schématisation de l'effet possible des ponts sur la ligne d'eau

### Recherche d'explications sur la mauvaise concordance à l'amont du site

Une explication possible concerne un problème de dynamique spatio-temporelle de la crue puisque le modèle en régime permanent ne représente que les cotes maximales de l'eau supposées toutes atteintes en même temps. Cependant la lenteur de la crue et la bonne concomitance des prises de vue avec le passage du pic de crue font que cette explication est clairement insuffisante.

Nous avons donc été amenés à revenir sur "l'approche-photo" pour vérifier la cohérence de ses résultats. Le point coté ayant conduit à limiter les bornes Max des estimations a été facilement identifié grâce à la traçabilité de "l'approche-photo" (cf., cercle jaune sur la Figure 11-8).

La valeur de 40.58 m NGF, qui impose la restriction à l'amont, constitue effectivement une information litigieuse provenant du degré de préférence  $P_2$  (i.e., information située très près de la limite d'inondation et classée en moins "sûre" car appartenant à la zone d'imprécision de la localisation de la limite de crue). Même si le positionnement de la limite d'inondation peut être discuté, deux autres informations proches, valant 40.68 m et 40.89 m NGF, viennent conforter cette restriction. Il

semblerait donc bien, au vu des photographies aériennes et des informations altimétriques à disposition, que la cote de l'eau soit plus proche de 40.50 m NGF que de 41.30 m NGF comme annoncée dans la modélisation hydraulique. "L'approche-photo" semble donc fournir une information plus fine que la modélisation, et tout au moins "cohérente" avec les données à disposition.



*Figure 11-8 : Analyse du point coté ayant conduit à limiter les bornes Max des estimations à l'amont du pont de Pommier.*

### Conclusion

Si les deux résultats sont en assez bonne concordance sur la partie centrale et aval du site, la différence observée à l'amont illustre bien les difficultés qui peuvent apparaître dans l'interprétation d'une validation croisée. Il est souvent assez difficile en effet de retrouver la source des divergences, surtout lorsqu'une des deux approches a été menée dans des conditions mal connues. Dès lors, la plus grande prudence dans les conclusions est nécessaire.

### 11.3.3. Acquisition de nouvelles données

Pour compléter les informations historiques qui font souvent défaut, il peut être envisagé de retourner sur le terrain pour acquérir de nouvelles informations de validation. La difficulté de cette phase réside dans le caractère évolutif de certains secteurs de la plaine d'inondation. Il faut alors tenir compte de la dynamique d'évolution dans le protocole de mesures pour concentrer la prise d'informations sur des éléments stables dans le temps.

Dans notre cas, il a été choisi de retourner sur le terrain afin de mesurer ponctuellement la cote du terrain naturel là où les trois critères suivants sont respectés :

- le point appartient à une interface entre la zone inondée et le terrain naturel clairement visible sur les photographies aériennes exploitées dans "l'approche-photo" ;
- un positionnement planimétrique de ce point peut être réalisé in situ ;
- la cote du terrain naturel est peu susceptible d'avoir subi des modifications à cet endroit.

*L'idée est donc à nouveau de valoriser le caractère irréfutable de présence d'eau sur les photographies aériennes de crue, mais en se basant sur un nouveau référentiel altimétrique à la fois très précis et indépendant de celui utilisé dans "l'approche-photo".*

#### 11.3.3.1. Exemple 4 : mesures GPS sur l'Hérault

Après avoir identifié, sur les photographies en crue du site Hérault, une série de points respectant les trois critères énoncés ci-dessus, une campagne GPS a été menée pour mesurer leur cote NGF.

##### Identification des points à mesurer

Pour les prises de vue obliques réalisées, l'altitude de vol généralement faible (très inférieure à 500 mètres par rapport au sol) facilite l'identification des bordures du champ d'inondation. En contrepartie, la sélection de points particuliers pouvant être exactement localisés sur le terrain est délicate car l'obliquité de la prise de vue engendre des déformations importantes (e.g., les distances ne sont pas conservées). La sélection doit alors reposer sur la présence, à proximité immédiate, de repères nets (e.g., pointillés d'une ligne blanche discontinue sur une route, coin de maison, rang de vigne, poteau...).

Pour les prises de vue verticales, les vols se font à forte altitude (généralement supérieure à 2000 mètres par rapport au sol) ce qui rend l'interprétation des limites du champ d'inondation moins aisée. En contrepartie, la géométrie verticale bien maîtrisée permet le géoréférencement par orthorectification et rend donc moins contraignant la sélection de points destinés à être mesurés. Il est toutefois prudent de se placer près de repères identifiables sur le terrain pour éviter toute erreur de localisation venant du processus d'orthorectification.

La Figure 11-9 donne des exemples d'identification de tels points de mesures pour les photographies verticales et pour les photographies obliques prises sur le site Hérault à 24 heures d'intervalle (cf., § 5.1.4). En plus des points de mesures (identifiés par des flèches), on pourra remarquer sur les deux premières photographies verticales (situées à l'amont du site d'étude) les zones très claires qui correspondent à des sédiments déposés lors du retrait des eaux. Ces dépôts confirment qu'à l'amont du site d'étude, la décrue est nettement amorcée lors de la prise des photographies verticales. L'examen des photographies obliques montre un niveau d'eau en accord avec ces dépôts et donc proche du maximum de crue.

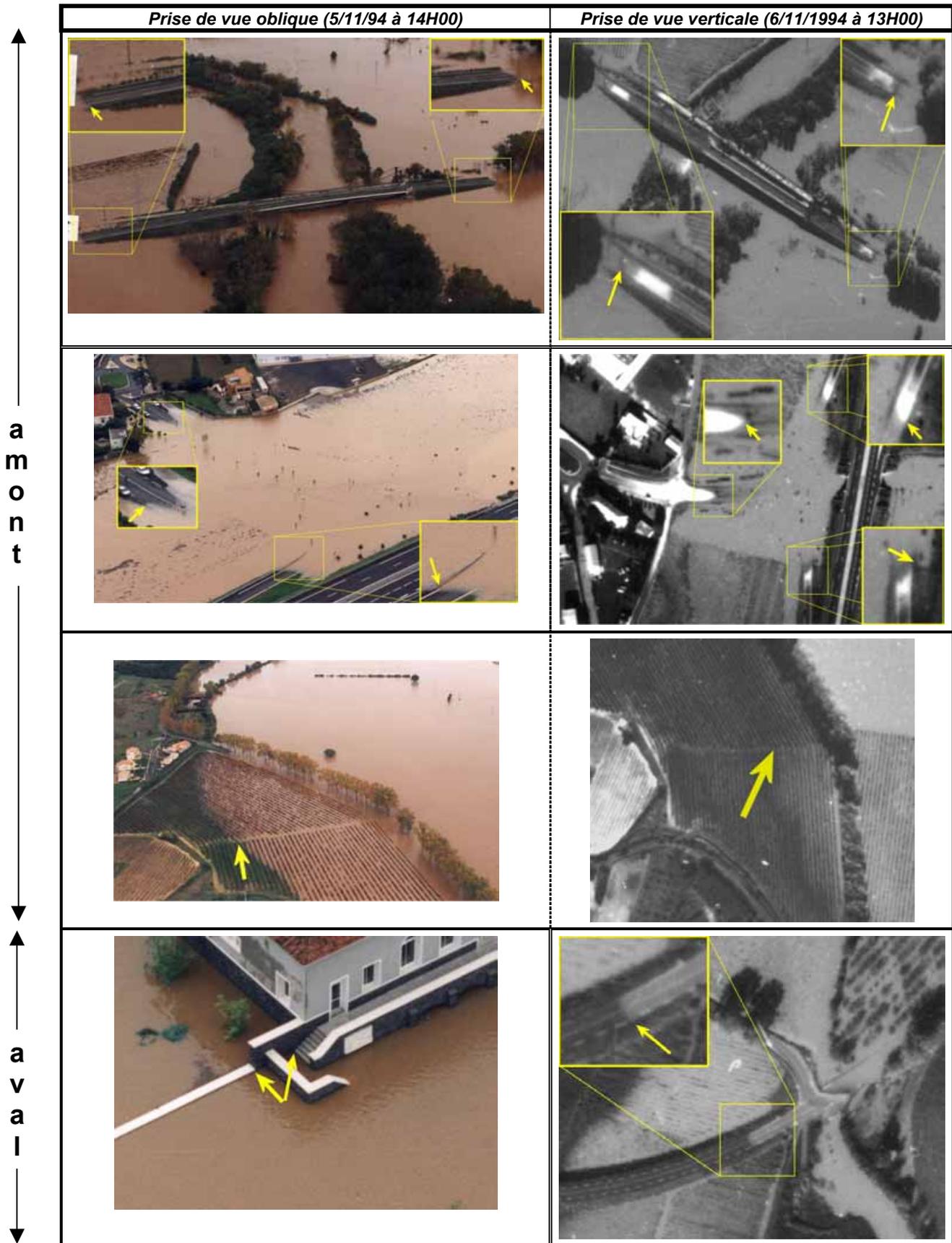


Figure 11-9 : exemples de localisation de points de mesure GPS (site Hérault)

### Matériel et principe

Afin de mesurer la cote des points identifiés précédemment, la solution retenue a été de recourir à un **GPS (Global Positioning System) différentiel cinématique (temps réel) à précision centimétrique** grâce à une mesure **de code et de phase**. L'appareil utilisé est un système Aquarius 5002 de Dassault-Sercel appartenant au Cemagref de Clermont-Ferrand.

Ce système est constitué de deux parties :

- une station fixe appelée station de base est positionnée en X, Y, Z grâce par exemple à une borne IGN (repère géodésique ou repère de nivellement). Elle est composée d'un émetteur de code et de fréquence, d'une antenne GPS, d'une antenne radio UHF et d'une alimentation 12 V de type batterie de voiture.
- une station mobile va être déplacée sur les points à mesurer. Elle possède les mêmes composants, l'émetteur étant remplacé par un récepteur. Un ordinateur portable permet de stocker les mesures.



**Figure 11-10 : principaux composants d'une station GPS Aquarius 5002**

L'idée fondamentale du GPS différentiel est que deux (ou plus) récepteurs observant les mêmes satellites feront des erreurs de mesure d'autant plus semblables que ces récepteurs seront proches. De façon très simplifiée, le système fonctionne sur le principe suivant : la station de base calcule à chaque instant sa position théorique grâce aux mesures de code et de phase qu'elle reçoit via son antenne GPS de la constellation satellitaire. Connaissant sa position réelle, il est possible d'en déduire l'erreur de mesure. Ces informations sont transmises en temps réel à la station mobile (via la liaison radio). Le récepteur mobile, qui reçoit lui aussi des informations de code et de phase, est capable de calculer sa position et de la corriger en temps réel grâce aux informations fournies par la station fixe. Les performances d'un tel système sont annoncées de l'ordre centimétrique tant que la station mobile reste dans un rayon inférieur à quelques dizaines de kilomètres de la station fixe.

D'un point de vue pratique, ce système est plutôt destiné à être embarqué dans un véhicule puisque la station mobile est encombrante et lourde (le récepteur pèse autour de 4 Kg + 1 batterie voiture + l'antenne GPS + l'antenne radio). Des mesures ponctuelles au milieu des champs peuvent donc être très fastidieuses. Heureusement, dans notre application, beaucoup de mesures se trouvent sur des routes, car celles-ci représentent des zones peu évolutives sur lesquelles il est facile de se repérer rigoureusement grâce au marquage au sol.

La précision de mesure, très fortement supérieure en altimétrie par rapport aux autres systèmes GPS, et la rapidité de l'acquisition (en temps réel, donc inutile de faire des mesures pendant plusieurs heures sur le même point) constituent les principaux avantages de ce système.

Ceci a permis de réaliser des mesures en continu en embarquant la station mobile dans une voiture. Ces données ont été acquises sur des routes, des chemins et au milieu de parcelles de vigne en vue d'effectuer des vérifications de la qualité des données topographiques à notre disposition sur la plaine d'inondation (*cf.*, Annexe 10). La conclusion de ce chapitre (*cf.*, § 11.4) revient sur ce point.

### Manipulation

Concrètement, la collecte des valeurs correspondant aux soixante points de validation identifiés (*i.e.*, environ trente pour chaque jeu de photographies) a pris deux journées. Cela comprend la pose de la station fixe et les déplacements d'un point à l'autre. A cela, il faut ajouter le temps de préparation dont le repérage des bornes IGN pouvant faire office de station de base (suffisamment surélevée et dégagée pour que la transmission radio soit bonne). Une journée et demie supplémentaire a été consacrée au recueil en continu de profils topographiques sur des cheminements dans la plaine d'inondation.

### Vérification de la qualité de la mesure

Lors de la campagne terrain, la qualité altimétrique des estimations fournies par le GPS a été vérifiée à cinq reprises en mesurant la cote de bornes de nivellement IGN. Un écart maximal de cinq centimètres a amené à considérer la qualité du dispositif de mesure comme suffisante pour les besoins de validation de "l'approche-photo".

### Résultats et comparaison avec les estimations de "l'approche-photo"

Environ trente mesures ponctuelles ont été effectuées pour chaque campagne de prises de vue, *i.e.*, oblique et verticale. La Figure 11-11 indique les valeurs mesurées par GPS (figures a et c) et la comparaison avec les estimations obtenues par "l'approche-photo" (figures b et d).

La confrontation entre les mesures GPS (notée  $M_{GPS}$ ) et les plages d'estimation "photo" [**Min** ; **Max**] a été synthétisée par un **écart** calculé de la manière suivante :

- Si  $M_{GPS} \in [\text{Min} ; \text{Max}]$ , alors **écart** = **0** (valeur nulle, situation conforme) ;
- Si  $M_{GPS} > \text{Max}$ , alors **écart** =  $M_{GPS} - \text{Max}$  (valeur positive, situation non conforme) ;
- Si  $M_{GPS} < \text{Min}$ , alors **écart** =  $M_{GPS} - \text{Min}$  (valeur négative, situation non conforme).

Si l'on considère que les grandeurs mesurées par GPS représentent des valeurs très proches de la cote réelle de l'eau au moment de la prise des clichés, cet écart peut être interprété de la manière suivante :

- une écart nul indique que la plage d'estimation de "l'approche-photo" comprend la valeur réelle ;
- une valeur positive indique une tendance de "l'approche-photo" à la sous-estimation ;
- une valeur négative indique une tendance de "l'approche-photo" à la sur-estimation.

Globalement, on note une majorité de situations conformes (*i.e.*, valeur nulle sur la Figure 11-12) ce qui est révélateur du bon comportement global de "l'approche-photo". Il faut néanmoins noter un nombre non négligeable d'écarts anormalement élevés pour la campagne de photographies verticales, nombre qui semble indiquer l'existence de quelques erreurs dans les résultats de "l'approche-photo".

### Conclusion

Ce protocole de prise d'informations, qui s'appuie sur un matériel coûteux (plus de 30000 €), constitue un second mode de valorisation des archives photographiques. Utilisé dans ce travail pour apporter des données de validation à "l'approche-photo", il est envisageable de l'utiliser 1) seul, pour obtenir une estimation de la cote de l'eau en un nombre limité de points ; 2) en complément de "l'approche-photo" développée dans ce mémoire, pour enrichir le groupe d'informations {NE} avec des indications altimétriques à la fois précises et ciblées (*e.g.*, cote du terrain naturel aux abords immédiats de la limite d'inondation).

Ce protocole a permis d'acquérir des données de validation en quelques jours et de vérifier ainsi le bon comportement global de "l'approche-photo" sur le site Hérault.

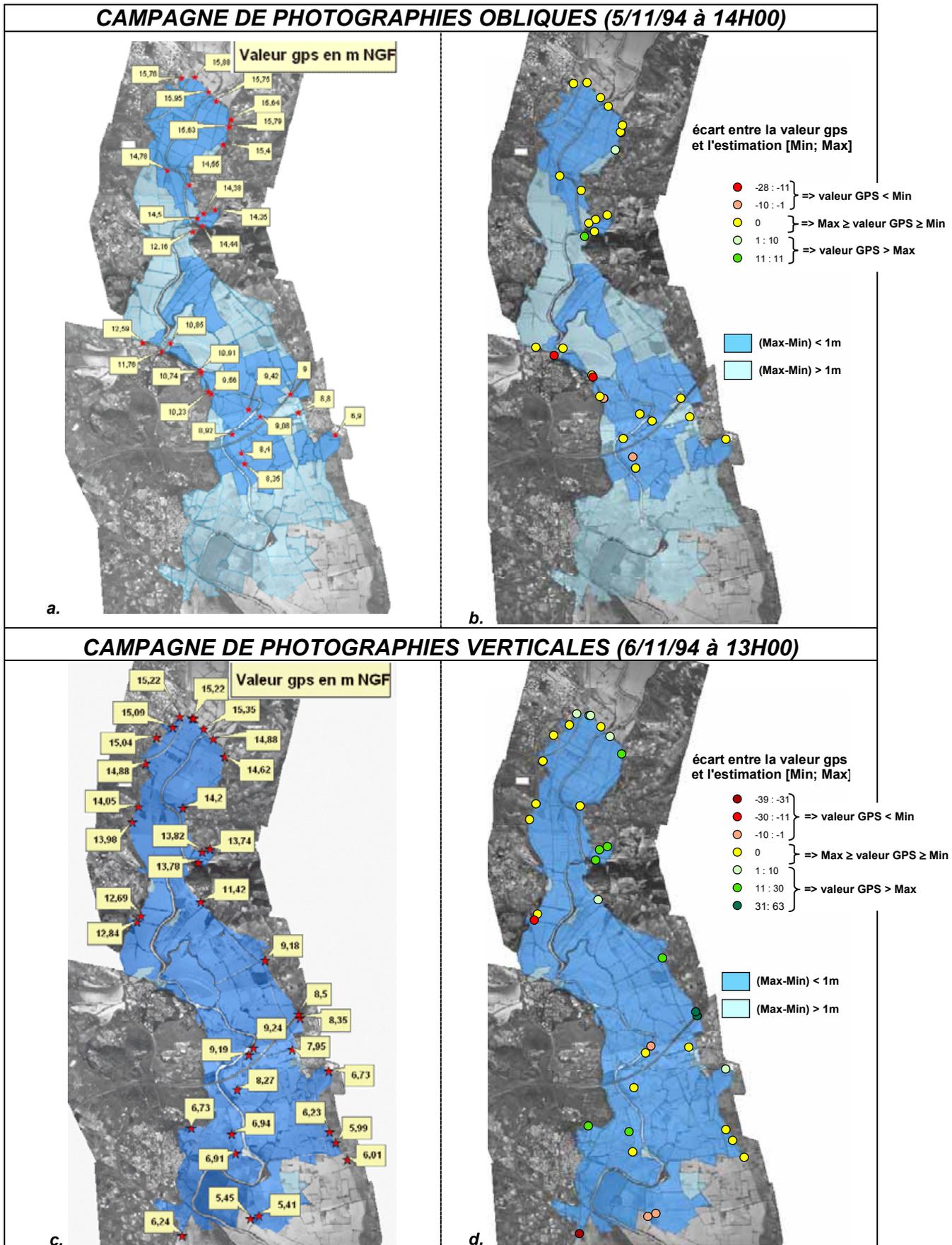


Figure 11-11 : données de validation acquises par GPS et comparaison avec les résultats de "l'approche-photo" (site Hérault)

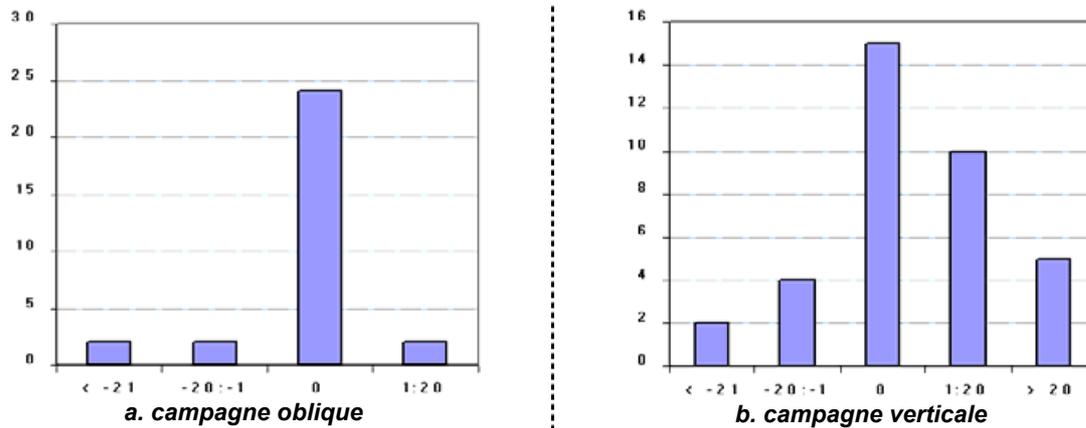


Figure 11-12 : histogrammes des répartitions des écarts entre la valeur GPS et la plage d'estimation [Min ; Max] provenant de "l'approche-photo"

## 11.4. Conclusion sur les validations menées de "l'approche-photo"

Bien que la validation interne de "l'approche-photo" n'occupe qu'une faible place dans ce chapitre, son importance ne doit pas être sous-estimée, et ce d'autant plus que la validation externe est souvent très partielle faute de données de référence adéquates.

C'est pourquoi toutes les informations extérieures disponibles sur les différents sites d'étude ont été récoltées et testées : informations historiques mesurées in situ et résultats de modélisation hydraulique. Globalement "l'approche-photo" n'a pas été mise en défaut par ces informations. Cependant, la validation avec de telles données reste insuffisante, soit à cause d'un manque de représentativité spatiale (mesures historiques in situ), soit à cause d'un manque de maîtrise de la qualité des données (modélisation 1D). Il a donc fallu retourner sur le terrain pour acquérir de nouvelles mesures grâce à un GPS à précision centimétrique. Cette démarche a permis de compléter utilement les autres modes de validation en fournissant des données de référence tout à fait adéquates pour cela. Les données ainsi produites ont montré **le bon comportement global de "l'approche-photo" sur l'Hérault**, mais également l'existence de quelques erreurs localisées (écarts entre les plages d'estimation et les références GPS dépassant parfois 30 cm pour la campagne de photographies verticales).

Ces écarts, qui peuvent apparaître trop élevés au vu de la précision visée, ne permettent cependant pas de remettre en cause la validité de "l'approche-photo". En effet, une analyse de la qualité de la topographie utilisée sur l'Hérault (*i.e.*, topographie provenant de photogrammétrie réalisée à partir de clichés pris à une échelle du 1/18000), exposée en **Annexe 10**, a clairement montré la présence d'une erreur aléatoire de l'ordre de 35 à 40 cm, à laquelle vient s'ajouter une erreur systématique comprise entre 25 et 30 cm. **Rechercher une précision sur la cote du toit de l'eau de l'ordre de 1 à 2 décimètres avec de telles données topographiques semble donc totalement illusoire.** Sous cet éclairage, les écarts observés entre les plages d'estimations de "l'approche-photo" et la référence GPS apparaissent tous acceptables.

## 12. Analyse de sensibilité

Afin de compléter la validation externe difficile à mener faute de données adéquates, une analyse de sensibilité de "l'approche-photo" a été engagée. L'objet d'une telle analyse est d'estimer, à travers des cas d'application réels ou fictifs, l'influence sur les résultats des différents "paramétrages" et "entrées" de l'approche (ou du modèle). Une analyse complète de sensibilité est une démarche de longue haleine.

Ce chapitre expose les premiers retour d'expérience sur la sensibilité de "l'approche-photo". Les résultats sont tous issus des différents cas d'application développés au cours de ce travail de thèse. Les facteurs suivants ont été testés :

1. l'influence de la taille maximale des compartiments ;
2. l'influence de la méthode de relâchement.
3. l'influence du nombre d'informations  $\{NE\}$  sur l'amplitude des estimations finales

### 12.1. Influence de la taille maximale des compartiments

L'étude de l'influence de la taille maximale des compartiments consiste à évaluer l'impact du découpage de la plaine. Pour cela, le repérage des structures "actives" a été supposé correctement réalisé et seule la valeur de la taille maximale des compartiments a été testée en imposant une valeur deux fois plus faible sur le cas d'application Aisne. Défini préalablement à 400, elle a donc été imposée à 200 m. Des relations de circulations ont été redéfinies pour essayer de rétablir le même schéma global d'écoulement des eaux.

La Figure 12-1 montre l'évolution de la structure hydrodynamique entre la situation à 400 m (a.), et celle à 200 m (b.). Le changement de taille des compartiments a bien entendu été accompagné d'un redécoupage des zones informatives.

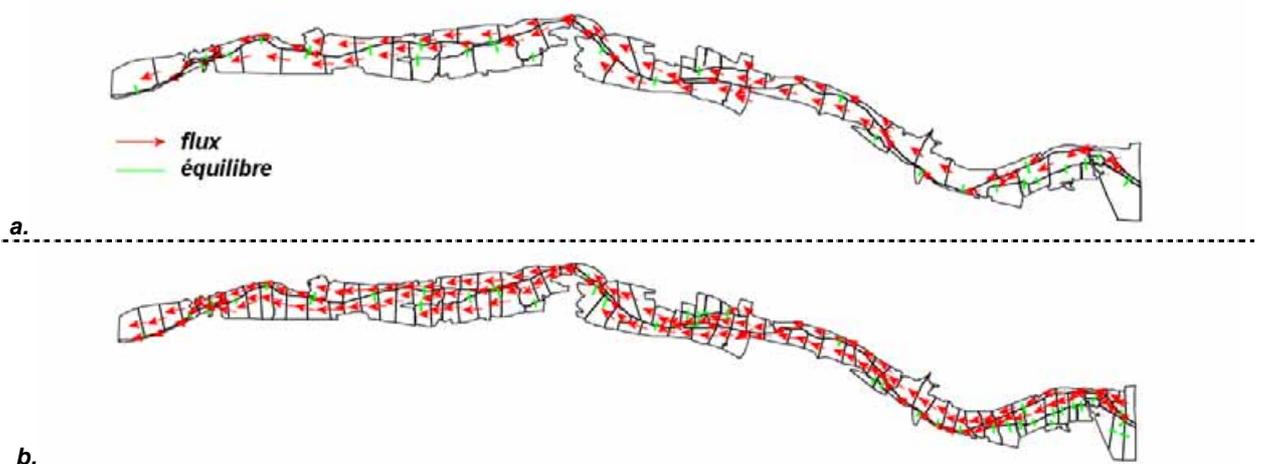


Figure 12-1 : changement de structure hydrodynamique entre les valeurs de 400 m (a.) et 200 m (b) pour le critère de taille maximale.

Le test effectué sur l'Aisne fait apparaître une très faible sensibilité de "l'approche-photo" à l'effet d'un redécoupage de la taille des compartiments (cf., Figure 12-2). Les résultats [Min ; Max] restent globalement inchangés, seules quelques modifications locales de quelques centimètres, essentiellement sur la partie amont, peuvent être notées. **Il semblerait donc que découper plus finement que ce que suggère le critère de taille maximale n'a aucune utilité.**

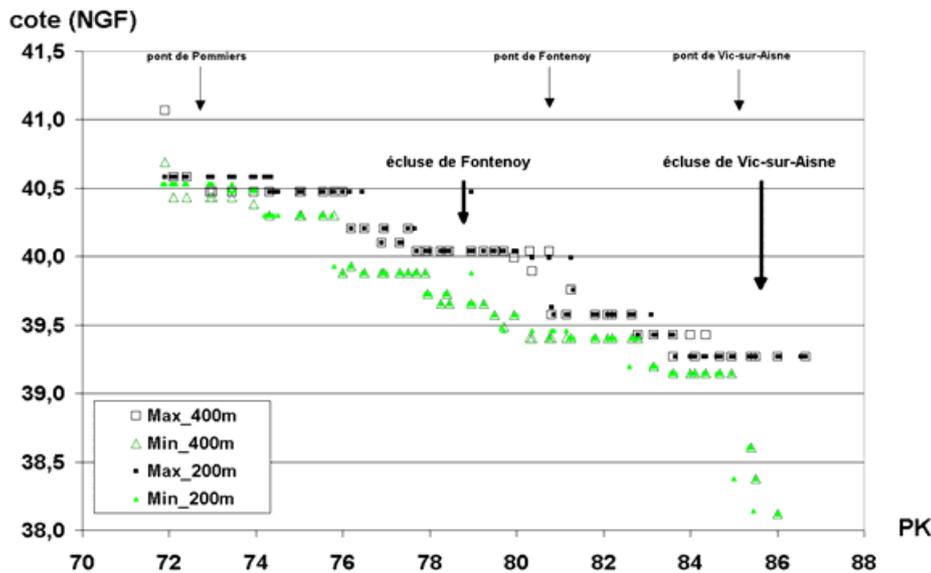


Figure 12-2 : influence de la taille des compartiments sur les estimations [Min ; Max] (cas de l'Aisne)

## 12.2. Influence de la méthode de relâchement

Les actions de relâchement sur les données altimétriques {NE} de cote du toit de l'eau sont mises en œuvre pour éliminer chaque conflit détecté dans la base de connaissances. Dans "l'approche-photo", deux méthodes de relâchement ont été envisagées :

1. **un relâchement par valeur fixe** ; l'information jugée erronée est modifiée d'une valeur fixe  $\Delta Z$ , par addition pour un majorant (*i.e.*,  $M$  dévient  $M + \Delta Z$ ) et par soustraction pour un minorant (*i.e.*,  $m$  dévient  $m - \Delta Z$ ) ;
2. **relâchement par retrait** (et remise au degré de préférence inférieur) ; l'information jugée erronée est retirée de la liste des minorants/majorants du degré de préférence en cours de traitement et est placée au degré de préférence directement plus faible (*e.g.*, passage de "sûr" à "moins sûr" pour une information).

Le choix de l'une ou l'autre de ces méthodes a été discuté au § 8.5.2, et doit, à notre avis, être orienté par la nature des imperfections que les informations {NE} sont supposées contenir. Parce que nous suspectons l'information {NE} de comporter des aberrations, le mode de relâchement par retrait a été retenu pour l'ensemble des cas d'application.

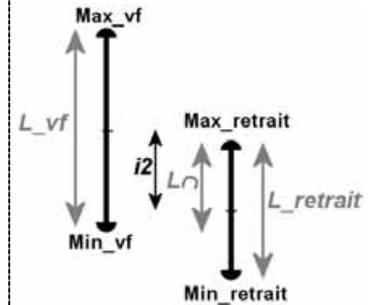
Différents tests avec un mode de relâchement par valeur fixe ont été effectués et comparés aux résultats obtenus avec ceux de la méthode par retrait. Les valeurs fixes  $\Delta Z$  suivantes ont été testées pour le relâchement: 1 ; 5 ; 10 ; 20 ; 30 ; 40 ; 50 ; 60 ; 70 ; 80 ; 90 ; 100 ; 150 et 200 cm.

Logiquement, on peut s'attendre à constater de fortes divergences entre les deux modes de relâchement lorsque  $\nu f$  est faible, et à voir ces différences s'amenuiser au fur et à mesure que  $\nu f$  croît.

Afin d'interpréter les différences entre les deux méthodes de relâchement, une comparaison des deux séries de plages d'estimation  $[\text{Min}_{\nu f}; \text{Max}_{\nu f}]$  et  $[\text{Min}_{\text{retrait}}; \text{Max}_{\text{retrait}}]$  a été menée pour chaque valeur fixe  $\nu f$  testée. Deux indicateurs ont été retenus pour cela : un indicateur  $i1$  du taux de recouvrement des plages et un indicateur  $i2$  de distance entre les centres des intervalles. Ce second indicateur complète utilement le premier en permettant de prendre en compte l'amplitude des estimations en valeur métrique. Les indicateurs utilisés prennent la forme suivante :

$$i1 = \frac{L_{\cap}}{L_{\text{retrait}} + L_{\nu f} - L_{\cap}}$$

$$i2 = 0,5 * \sum_{Nc} |(Max_{\text{retrait}} + Min_{\text{retrait}}) - (Max_{\nu f} + Min_{\nu f})|$$



Les valeurs prises par ces deux indicateurs sont présentées en Figure 12-3. Pour faciliter la compréhension, l'amplitude moyenne des estimations pour les différentes valeur de  $\nu f$  a été ajoutée. On peut tirer les trois constats suivants :

1. les deux indicateurs varient globalement peu, et se stabilisent très vite à partir d'une valeur de relâchement dépassant 20 ou 30 cm ;
2. le mode de relâchement par valeur fixe, même avec une valeur très élevée de  $\nu f$ , n'est pas identique au mode de relâchement par retrait (en effet le premier exclut définitivement les informations alors que le second les place au degré de préférence inférieur) ;
3. le relâchement par retrait et remise ne conduit pas à un meilleur résultat, en terme d'amplitude des estimations, que la méthode par retrait avec une valeur fixe élevée (on rappelle que l'amplitude moyenne trouvée avec la méthode de relâchement par retrait vaut 26 cm, tout comme celle obtenue avec un mode de relâchement avec  $\nu f$  supérieur à 20 ou 30 cm).

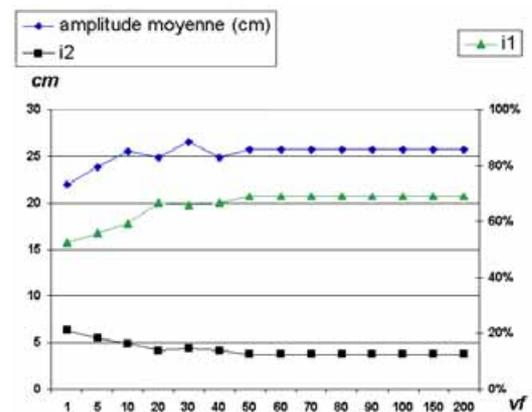


Figure 12-3 : influence de la méthode de relâchement par valeur fixe par rapport à la méthode de relâchement par retrait

La Figure 11-4 illustre les deux cas extrêmes :  $\nu f = 1$  cm et  $\nu f = 200$  cm. Il apparaît alors très clair que le choix de la valeur  $\nu f$  est sans influence notable sur les résultats et que l'incidence du mode de relâchement est à peine plus importante. Un relâchement avec une valeur  $\nu f$  élevée tend bien vers un rapprochement avec la méthode par retrait, mais de petites différences subsistent (cf., Figure 12-4b)

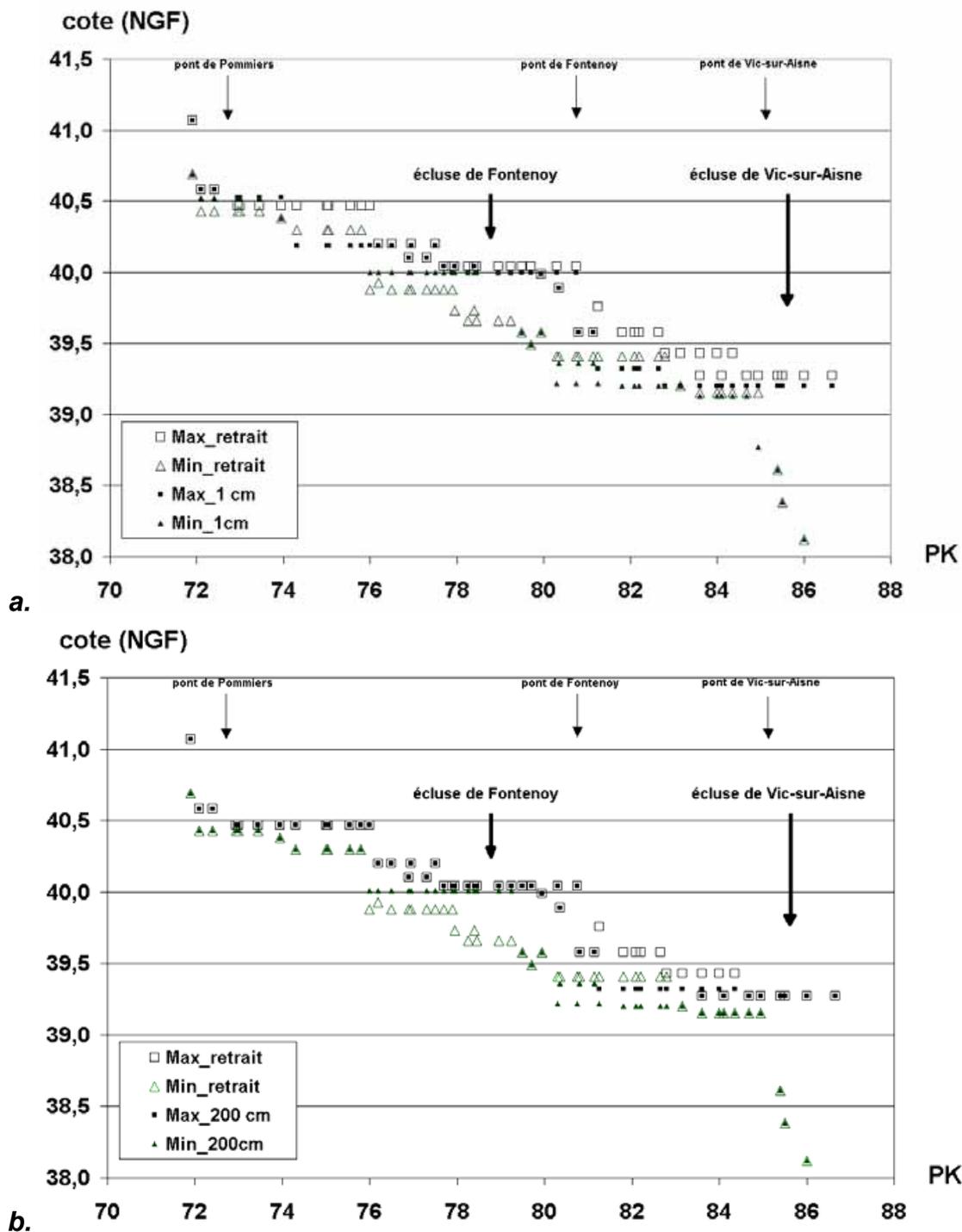


Figure 12-4 : comparaison des résultats obtenus avec un relâchement par retrait et avec un relâchement d'une valeur fixe de 1 cm (a) ou 200 cm (b)

**En conclusion, la méthode de relâchement influence très faiblement les résultats de "l'approche-photo"** puisque seuls de rares secteurs (cf., Figure 12-4) présentent des différences notables. Il est intéressant de noter également que la méthode de retrait, qui remet l'information supposée erronée dans le degré de préférence moins élevé, ne permet pas sur l'Aisne de gagner en précision. Cela soulève la question suivante : faut-il retirer définitivement ou non l'information jugée erronée ? Des tests supplémentaires devront être menés pour y répondre.

### 12.3. Influence du nombre d'informations {NE} sur l'amplitude des estimations finales

Dans ce paragraphe, il est question de rechercher l'influence du nombre d'informations initiales du groupe {NE} sur la précision du résultat. L'idée est de tester l'existence d'une relation statistique entre le nombre d'informations initiales et l'amplitude des estimations à laquelle on peut s'attendre. Une retombée possible est de fournir, à un utilisateur de "l'approche-photo", une première idée du nombre d'informations à recueillir pour atteindre un objectif donné sur la précision des estimations.

Il est bien entendu que la qualité des informations initiales, ainsi que leur répartition spatiale au sein de la plaine, jouent un rôle prépondérant dans cette relation. En effet, un seul minorant et un seul majorant par compartiment peuvent suffire pour établir l'estimation finale ... si toutefois leur valeur est "correcte". À l'extrême, il en faut même beaucoup moins puisqu'une partie des bornes d'estimation de la solution finale est acquise par propagation d'informations provenant d'autres compartiments.

Si l'on veut extraire une fraction des informations {NE} disponibles pour tester le comportement de "l'approche-photo", il apparaît alors primordial de s'affranchir du choix des informations prises en compte. Pour cela, un procédé par tirage aléatoire a été retenu. Répété un grand nombre de fois pour la même fraction, il permet en effet de reconstituer une situation moyenne, qui devient équivalente à un nombre donné d'informations sans dépendre du choix du sous-groupe d'informations.

Cette démarche a été mise en œuvre sur le site Hérault. L'analyse de l'amplitude des estimations issues de "l'approche-photo" a été réalisée grâce aux indicateurs  $\hat{A}mp_{100}$  et  $Nc_{100}$  présentés au § 10.2. On rappelle que  $\hat{A}mp_{100}$  est l'amplitude moyenne des estimations sur les seuls compartiments  $Nc_{100}$  ayant une plage inférieure à 1 m. Sept valeurs du ratio entre le nombre d'informations {NE} utilisées et le nombre d'informations initialement disponibles ont été testées : l'équivalent de 1 information par compartiment, puis 2, puis 3, ... , jusqu'à 7 informations par compartiment (100 % des informations disponibles sur l'Hérault). Le nombre de tirages aléatoires effectué pour chaque valeur du ratio a été fixé à **100**. Ce chiffre semble un bon compromis entre une représentation comprenant une grande diversité de configurations possibles et des temps de calcul raisonnables. Cependant un test statistique aurait peut-être été utile pour étayer le choix de cette valeur.

Une gestion simplifiée des équilibres ( $\delta = 0$ ) a été retenue pour réduire le temps de calcul qui passe ainsi à moins de 10 minutes pour chaque test de "l'approche-photo" sur l'application Hérault. Les statistiques sur les résultats des estimations [Min ; Max] obtenues pour chaque valeur testée du ratio ont été ensuite établies. Elles sont regroupées dans le Tableau 12-1 sous forme de moyenne sur les 100 tirages.

<i>Nombre d'informations par compartiment et %</i>	<i>1 (15 %)</i>	<i>2 (29 %)</i>	<i>3 (43 %)</i>	<i>4 (57 %)</i>	<i>5 (71 %)</i>	<i>6 (85 %)</i>	<i>7 (100 %)</i>
<i><math>\hat{A}mp_{100}</math> (cm)</i>	60,98	53,42	47,95	44,02	40,91	38,12	35,60
<i><math>Nc_{100} / N_{tot}</math> (% en "super-compartiment")</i>	50,88	70,85	80,49	85,38	88,56	91,00	92,31
<i>Surface (%)</i>	59,49	79,93	88,74	92,72	95,13	96,57	97,01

*Tableau 12-1 : statistiques sur les estimations [Min ; Max] issues de "l'approche-photo" en fonction du nombre d'informations {NE} par compartiment (moyennes sur les 100 tirages aléatoires, cas de l'Hérault)*

L'augmentation du nombre d'informations par compartiment s'accompagne d'une baisse de l'amplitude moyenne de ces estimations ainsi que d'une hausse du nombre de compartiments ayant une amplitude d'estimation inférieure à 100 cm. La Figure 12-5 illustre ce comportement.

La décroissance de l'indicateur d'amplitude  $\hat{A}mp_{100}$  suit une courbe puissance avec un exposant proche de  $-0,28$ .

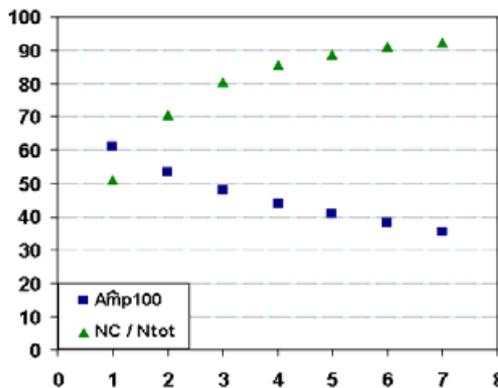


Figure 12-5 : évolution de  $\hat{A}mp_{100}$  et  $Nc_{100}$  avec le nombre d'information par compartiment

Dans la mesure où "l'approche-photo" est une méthode qui estime une grandeur à partir d'un grand nombre de mesures indépendantes, chacune étant de qualité médiocre, on pourrait s'attendre à observer une décroissance de l'imprécision de l'estimation avec une loi en  $\sqrt{n}$  où n est le nombre de mesures (loi des grands nombres). La logique voudrait donc que la décroissance de l'amplitude suive une loi puissance avec un exposant proche de  $-0,5$ .

Comme le montre la Figure 12-6, cette valeur est approchée si les statistiques sont effectuées sur le même "noyau" de super-compartiments pour l'ensemble des divisions du nombre d'informations utilisées. Cela revient à masquer l'influence de la croissance du nombre de compartiments  $Nc_{100}$  estimés.

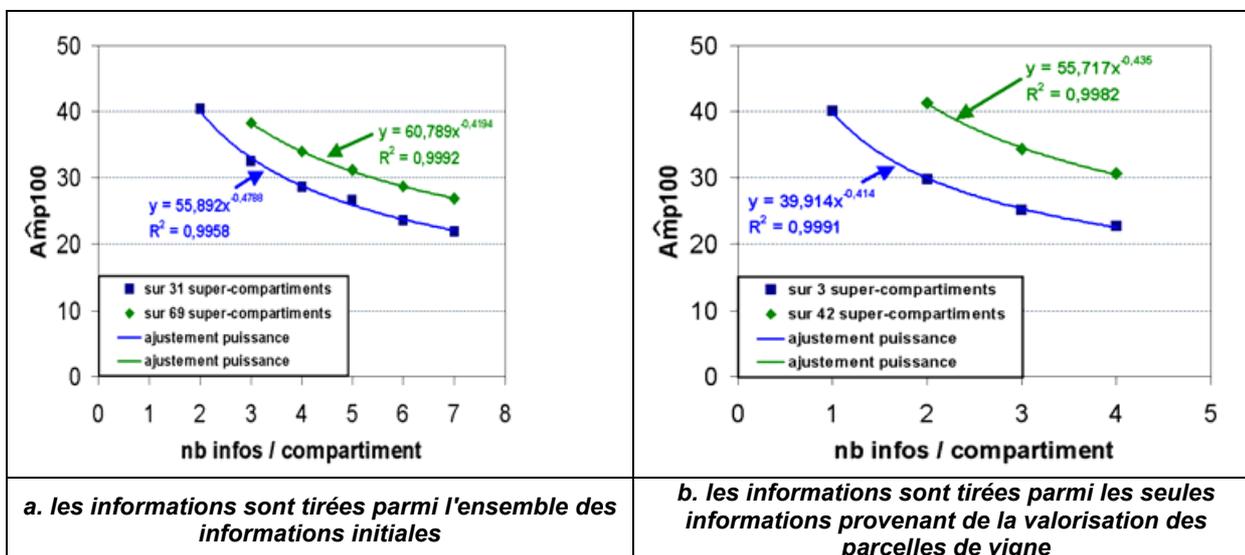


Figure 12-6 : décroissance de l'amplitude moyenne sur des noyaux de "super-compartiments" toujours estimés sur les 100 tirages.

En conclusion, le nombre d'informations {NE} en entrée de "l'approche-photo" a une influence assez élevée sur la précision des estimations à sa sortie puisqu'il a pu être mis en évidence que la décroissance de l'amplitude des estimations se rapproche d'une loi racine : si l'on multiplie le nombre d'informations initiales par 2, alors on peut s'attendre à voir décroître l'amplitude des estimations d'un facteur proche de  $\sqrt{2}$ .

## 12.4. Conclusion de l'analyse de sensibilité

"L'approche-photo" semble être une méthode stable à la vue des différents tests effectués. En l'occurrence, elle est apparue peu sensible à la méthode de relâchement et très peu sensible à la taille des compartiments si les structures linéaires potentiellement actives ont bien été repérées.

Par contre sa précision, vue au travers de l'amplitude des estimations [Min ; Max] qu'elle produit, est fortement liée au nombre d'informations initiales. Toutes les sources de données sur la cote du toit de l'eau doivent donc être recherchées et valorisées.

----- oOo -----



## 13. Confrontation de "l'approche-photo" avec la modélisation hydraulique sur le site Hérault

Dans la mesure où l'articulation de "l'approche-photo" avec la modélisation hydraulique paraît être une perspective majeure de ce travail, une mise en œuvre des deux approches a été menée sur le site Hérault pour la crue de novembre 1994. Ce chapitre vise à présenter la modélisation hydraulique et à confronter ses résultats avec ceux issus de "l'approche-photo".

### 13.1. Caractéristiques générales du modèle utilisé

#### 13.1.1. Type de modélisation

La présence d'une très forte densité de digues qui, pour la plupart, sont submersibles pour des crues de période de retour allant de 5 et 15 ans, nous a fait pencher pour une **modélisation bidimensionnelle** au détriment d'une modélisation à casiers ou d'une modélisation 1D. La motivation de ce choix est triple.

*Premièrement*, les écoulements sur le site Hérault sont suffisamment complexes pour éliminer d'emblée la modélisation hydraulique 1D. *Deuxièmement*, la représentation bidimensionnelle (2D) est a priori plus adaptée à la modélisation de phénomènes à forte variabilité spatio-temporelle comme le sont les crues de l'Hérault. *Troisièmement*, ce choix permet de limiter le nombre de paramètres à caler aux seuls paramètres de rugosité. À moins de posséder une grande quantité d'informations bien réparties sur la plaine, le calage des lois exprimant le comportement hydraulique des liaisons entre les casiers (*e.g.*, loi d'ouvrage de type seuil) me semble en effet assez délicat et discutable en terme d'objectivité.

*Pour l'ensemble de ces raisons, une modélisation bidimensionnelle (2D) avec représentation des structures (e.g., digues, fossés) sous forme de topographie a été retenue.*

#### 13.1.2. Code de calcul : RUBAR 20

Le choix du code de calcul s'est porté sur RUBAR 20, développé par le Cemagref de Lyon. Une présentation détaillée de ces caractéristiques est disponible dans [Paquier, 2002].

Initialement conçu pour le calcul de propagation d'onde de rupture de barrage, RUBAR 20 est particulièrement adapté pour tout calcul hydraulique du ressort des équations de SAINT-VENANT bidimensionnelles (*cf.*, § 1.2.5.2.1). Il permet de propager une onde de crue sur une zone initialement sèche, même lorsque les variations temporelles des caractéristiques hydrauliques sont importantes. Il paraît donc tout à fait approprié au cas d'application Hérault.

Le code de calcul s'appuie sur la méthode des volumes finis appliquée à un maillage constitué de quadrilatères et de triangles. Le calcul des flux entrants et sortants, pour chaque pas de temps et pour chaque maille, est réalisé grâce à un schéma de Van Leer d'ordre 2 en temps et en espace. Des ouvrages (*e.g.*, déversoirs) peuvent également être introduits.

### 13.1.3. Secteur modélisé

Le secteur modélisé est sensiblement identique à celui de "l'approche-photo". Il débute au droit de Pézenas à l'aval de la confluence entre la Peyne et l'Hérault, et s'étend jusqu'à Agde où la ligne de chemin de fer et le seuil sur l'Hérault constituent une section de contrôle intéressante pour la modélisation.

Il couvre ainsi une surface de plus de 4750 ha dont la délimitation est présentée en Figure 13-1. Sur ce secteur, l'Hérault comprend deux seuils en lit mineur et reçoit la Thongue comme affluent notable.

### 13.1.4. Présentation du maillage

Le choix retenu d'éviter toute représentation des éléments topographiques structurants sous forme de lois d'ouvrage impose, en contrepartie, qu'ils soient insérés sous forme topographique dans le maillage.

La densité des structures linéaires à incorporer, identifiées au cours de "l'approche-photo", a rendu cette phase extrêmement longue et fastidieuse. Chaque structure a dû être incorporée dans un schéma de sections en travers ou de lignes directrices, puis renseignée en altimétrie. À partir de ce schéma de sections en travers et lignes directrices, une interpolation sous contraintes [Farissier, 1992] a ensuite permis d'établir le maillage de calcul final. Il en résulte un lissage de la topographie dans les zones situées entre les structures (*cf.*, Figure 13-2a et b), lissage dont les répercussions sur les résultats de modélisation sont très faibles [Metzger et Consuegra, 1998].

Au final, plus de 21 000 mailles ont été définies sur les 4508 ha (*i.e.*, la taille moyenne d'une maille est inférieure à 40\*40 m). Ce maillage peut être visualisé en Figure 13-1. La Figure 13-2c en détaille un extrait, faisant apparaître le réalisme et la qualité de superposition du maillage avec une orthophotographie réalisée à partir des clichés en crue de 1994.

## 13.2. Simulations réalisées

### 13.2.1. Configurations communes aux simulations

Toutes les simulations correspondent à la reconstitution de l'événement de crue de novembre 1994, entre le 04/11/1994 à 14H00 et le 07/11/1994 à 17H00.

Les **conditions aux limites**, présentées en Figure 13-1, sont :

- une loi de tarage pour la section aval (source : DiREn Languedoc-Roussillon) ;
- des hydrogrammes d'entrée du modèle (un pour l'Hérault et un pour La Thongue).

Ces deux hydrogrammes ont été reconstitués en s'appuyant sur ceux observés à Montagnac et Agde (station hydrométriques de la DiREn Languedoc-Roussillon), et sur différents résultats d'études antérieures sur le secteur (*e.g.*, [DDE34, 1998]). L'imprécision/incertitude des valeurs retenues est grossièrement estimée entre 10 et 20 %.

L'**état initial** a été calculé avec un régime permanent proche du débit de plein bord, *i.e.*, 400 m<sup>3</sup>/s pour l'entrée principale "Hérault" et 40 m<sup>3</sup>/s pour l'entrée secondaire "Thongue". En fait, cette situation de régime permanent ne correspond pas à la situation réelle : si le débit entrant est bien représenté, le débit sortant à Agde, en début de calcul, ne dépasse pas encore 150 m<sup>3</sup>/s (*cf.*, hydrogramme observé à Agde en Figure 13-1). Par conséquent, l'état de remplissage de la plaine en début de simulation est fortement sur-estimé, ce qui va perturber la phase de montée des eaux. L'examen des débits en sortie du modèle devra donc en tenir compte.

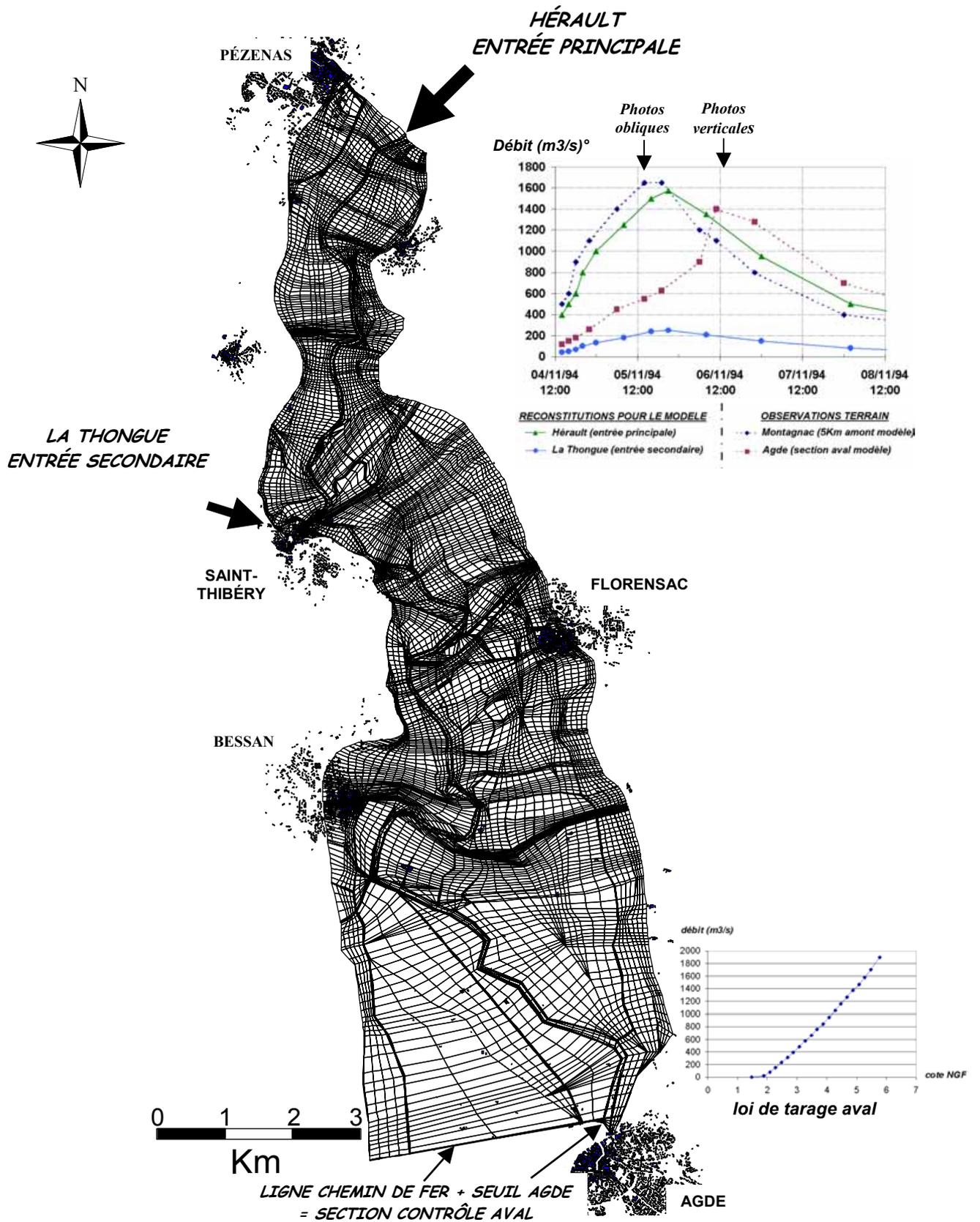
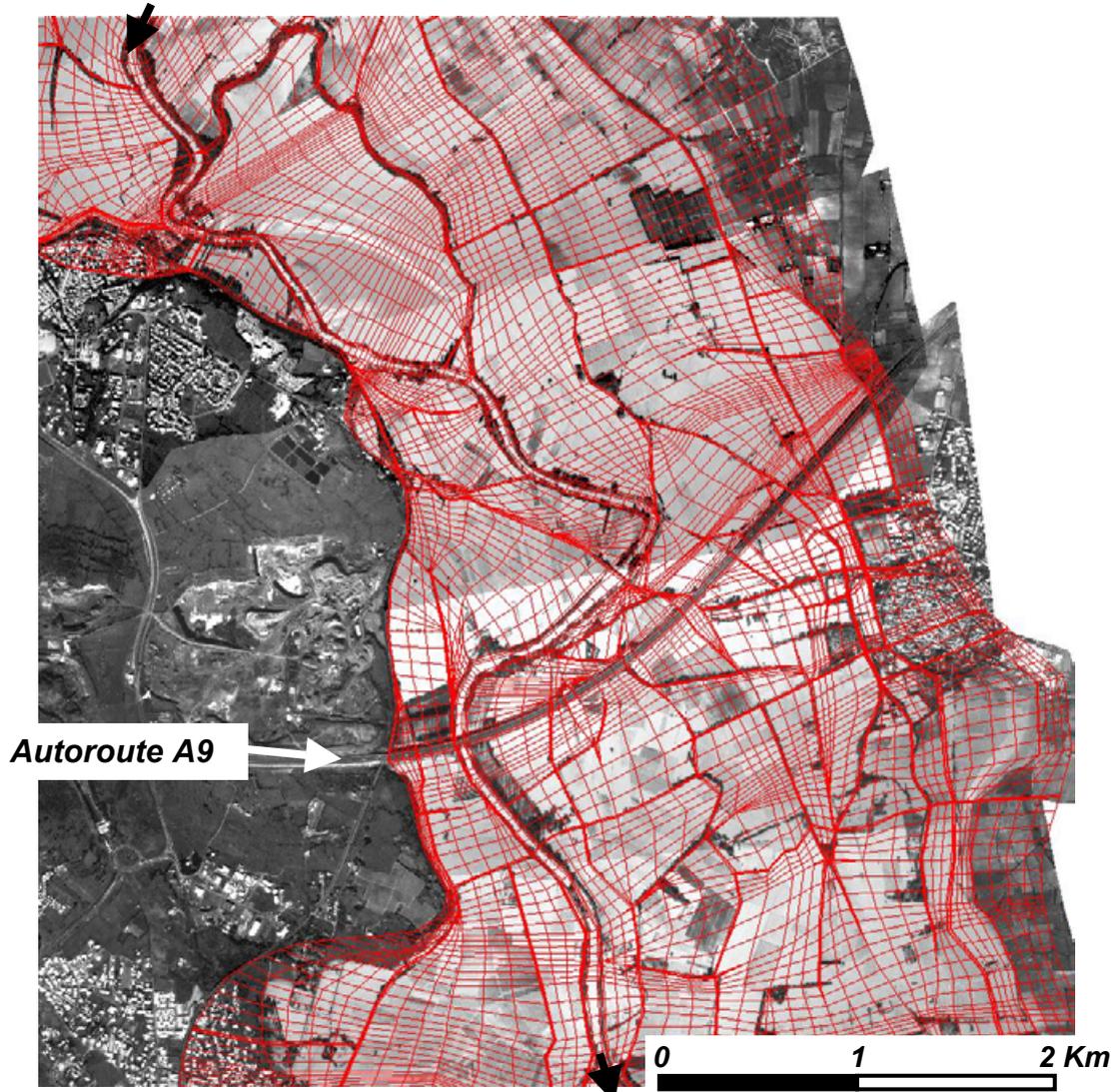
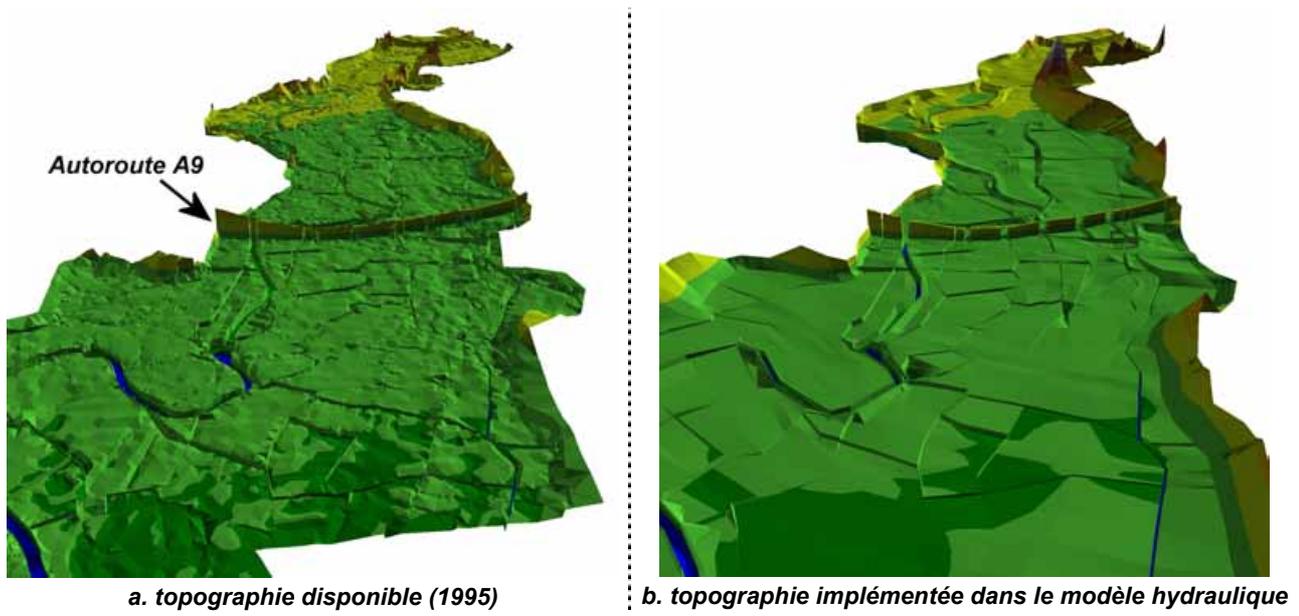


Figure 13-1 : présentation du maillage et des conditions aux limites du modèle hydraulique 2D mis en œuvre (basse vallée de l'Hérault entre Pézenas et Agde)



c. superposition du maillage hydraulique avec les photographies verticales de crues

Figure 13-2 : illustration sur une vue 3D du lissage entre la topographie\_1995 (a) et la topographie implémentée dans le modèle 2D (b), et extrait du maillage (c)

### 13.2.2. Configurations variables d'une simulation à l'autre

Pour l'affectation des valeurs des coefficients de frottement, seule une distinction entre le lit majeur et le lit mineur a été retenue. Les trois configurations suivantes ont été testées :

Valeur du Strickler	lit majeur	lit mineur
<i>S5_20</i>	5	20
<i>S10_25</i>	10	25
<i>S15_30</i>	15	30

Tableau 13-1 : les trois configurations de strickler testées

### 13.2.3. Exécution

La faible taille de certaines mailles (jusqu'à 2 m<sup>2</sup>) et la forte dynamique temporelle de la crue ont imposé un pas de temps de calcul très faible, *i.e.*, une itération tous les 6/100 de seconde. Cette considération a conduit à des temps de calcul de l'ordre de 20 jours avec un pentium III à 1Ghz pour les trois jours de crue de novembre 1994. La ferme de calcul nouvellement acquise par le Cemagref permet de réduire ce temps de calcul à 8 jours environ.

Une fois résolus des problèmes d'instabilités liées à une configuration particulière du maillage pour les bourrelets de berge, le schéma de résolution a montré une très bonne stabilité.

## 13.3. Analyse "classique" des résultats de simulation

### 13.3.1. À partir de l'hydrogramme de sortie du modèle

L'analyse des différentes simulations a tout d'abord consisté à comparer les hydrogrammes simulés avec celui observé à Agde sur la section aval du modèle (*cf.*, Figure 13-3). La disposition relative des hydrogrammes provenant des différentes configurations de strickler apparaît tout à fait conforme aux attentes (*cf.*, § A3\_3).

Globalement, la simulation S15\_30 se dégage assez nettement, en reconstituant de façon tout à fait correcte le débit de pointe et la phase de décrue. Une légère anticipation du passage du pic de crue d'environ deux heures est cependant perceptible.

Par contre la phase de montée des eaux est assez mal reconstituée, et cela pour toutes les simulations. Cela vient sans doute de l'initialisation du calcul à un état de remplissage beaucoup trop élevé sur la majeure partie du secteur modélisé.

Les deux autres simulations semblent avoir des valeurs de Strickler trop importantes. On peut donc s'attendre à ce qu'elles sur-estiment la cote de l'eau .

Débit au seuil d'Agde (m<sup>3</sup>/s) = sortie aval du modèle

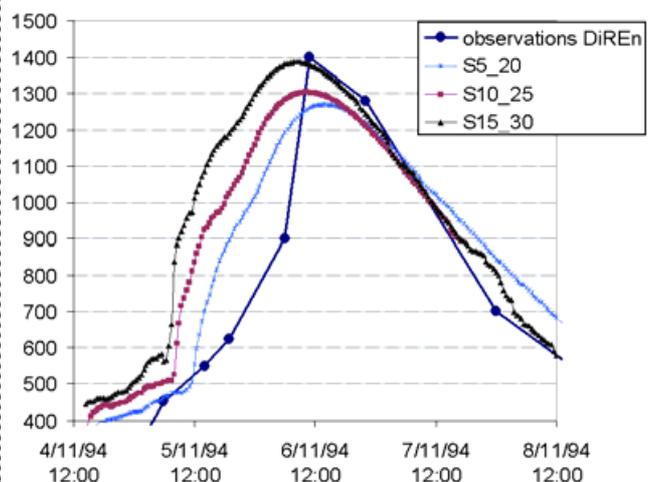


Figure 13-3 : hydrogrammes simulés et observés sur la section aval du modèle

### 13.3.2. À partir des repères de crue

La densité des repérages des plus hautes eaux sur la basse plaine de l'Hérault fournit une information distribuée de premier ordre pour valider les résultats de simulation à l'intérieur de la plaine. Il faut bien être conscient cependant que l'existence d'une telle densité de données est extrêmement rare.

Une comparaison des valeurs des repères de crue avec la hauteur d'eau maximale atteinte pour chaque simulation a été effectuée pour chaque maille contenant un repère. Les statistiques qui en découlent sont répertoriées dans le Tableau 13-2 (une valeur négative indique une sur-estimation du modèle).

$Z_{\text{repère de crue}} - Z_{\text{modèle hydraulique}}$	S5_20	S10_25	S15_30
<i>Moyenne (cm)</i>	-82	-24	-4
<i>Écart-type (cm)</i>	38	31	29
<i>Minimum / Maximum (cm)</i>	-217 / 17	-148 / 46	-109 / 66
<i>Moyenne des différences en valeur absolue (cm)</i>	82	28	22

**Tableau 13-2 : statistiques des différences entre les valeurs de repères de crue et hauteurs maximales atteintes pour chaque simulation**

Cette nouvelle confrontation conforte la meilleure concordance de la simulation S15\_30. Une cartographie des différences, pour cette simulation (*cf.*, Figure 13-4), fait cependant apparaître une forte hétérogénéité.

En l'occurrence, 2 zones (ellipses en pointillés) de surestimation de la simulation ressortent assez clairement. La première (Zone 1) est assez localisée à la confluence de la Thongue avec l'Hérault. Elle révèle soit un déphasage entre l'arrivée des deux hydrogrammes, soit une mauvaise configuration de la confluence. La seconde, plus étendue, est caractéristique d'une mauvaise reproduction des écoulements en rive gauche à partir du domaine dit de "Saint-Joseph". Malheureusement la topographie de la digue bordant l'Hérault à ce niveau, structure capitale dans la répartition des écoulements entre rive droite et rive gauche, n'a pu être vérifiée car la digue a été réédifiée suite à l'inondation du 19/12/1997 qui l'avait totalement emportée (*cf.*, Figure 13-5).

Près de l'autoroute A9, S15\_30 tend plutôt vers une légère sous-estimation des hauteurs d'eau maximales. La sous-estimation du repère de crue situé au nord immédiat de la zone 2 est très locale, liée à la présence d'un ruisseau dont les apports ont été négligés dans la modélisation.

*Étant donné que les repères de crue sont mesurés après le passage du phénomène, aucune information précise de date ne leur est associée. En conséquence, la comparaison ne porte que sur les valeurs de cotes maximales sans se soucier du problème de concomitance temporelle. Aucun renseignement ne peut donc être tiré quant à la reproduction de la dynamique temporelle de la crue.*

*La confrontation des repères de crue avec les cotes maximales atteintes pour les trois simulations permet cependant : 1) de confirmer la meilleure adéquation de la simulation S15\_30 avec les observations ; 2) de montrer des secteurs où le comportement de la crue est manifestement mal reproduit.*

*Certaines structures importantes peuvent être suspectées comme étant à la source de dysfonctionnements.*

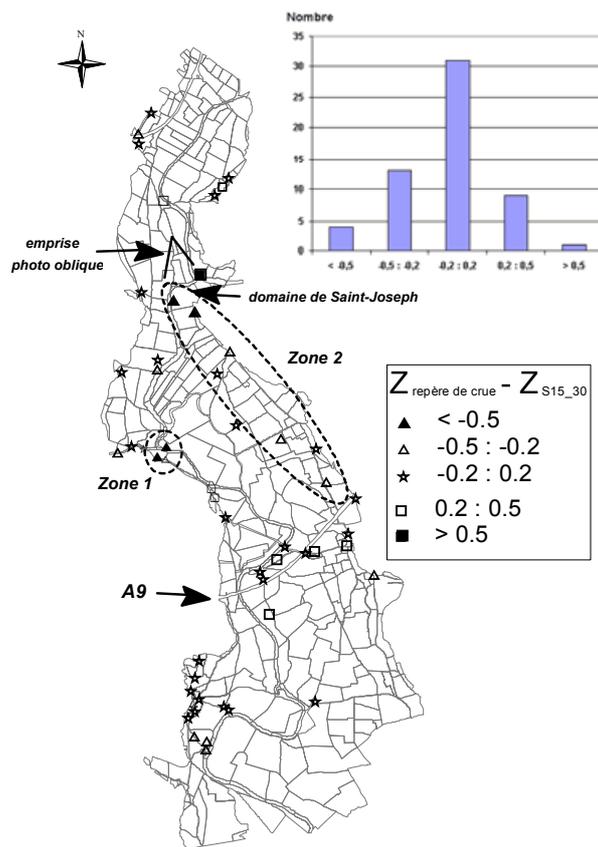


Figure 13-4 : cartographie des différences entre repères de crue et résultats de S15\_30



Figure 13-5 : brèche dans la digue de protection du domaine "Saint-Joseph", structure importante pour la répartition des eaux entre rive droite et rive gauche

## 13.4. Confrontation des résultats de simulation avec ceux de "l'approche-photo"

### 13.4.1. Sur la surface inondée au moment de la prise des photos verticales

La délimitation surfacique de la zone inondée est l'information provenant de télédétection en crue la plus utilisée pour estimer la qualité des modèles hydrauliques (cf., § 2.3.3 et 2.4.3.2.4).

Cependant les simulations réalisées avec les trois configurations de Strickler ont conduit à une différence de surface de 3% au maximum, avec un positionnement des bordures présentant très peu de différence (cf., Figure 13-6). **La délimitation surfacique n'apparaît donc pas comme un critère discriminant pour le cas d'application Hérault.**

Pour cette raison, aucune analyse quantitative (e.g., Eq. 2-4) n'a été réalisée. Un simple examen visuel permet de montrer que la délimitation surfacique de S15\_30 est meilleure sur les zones 1 et 2, et moins bonne sur la zone 3 située plus en aval.

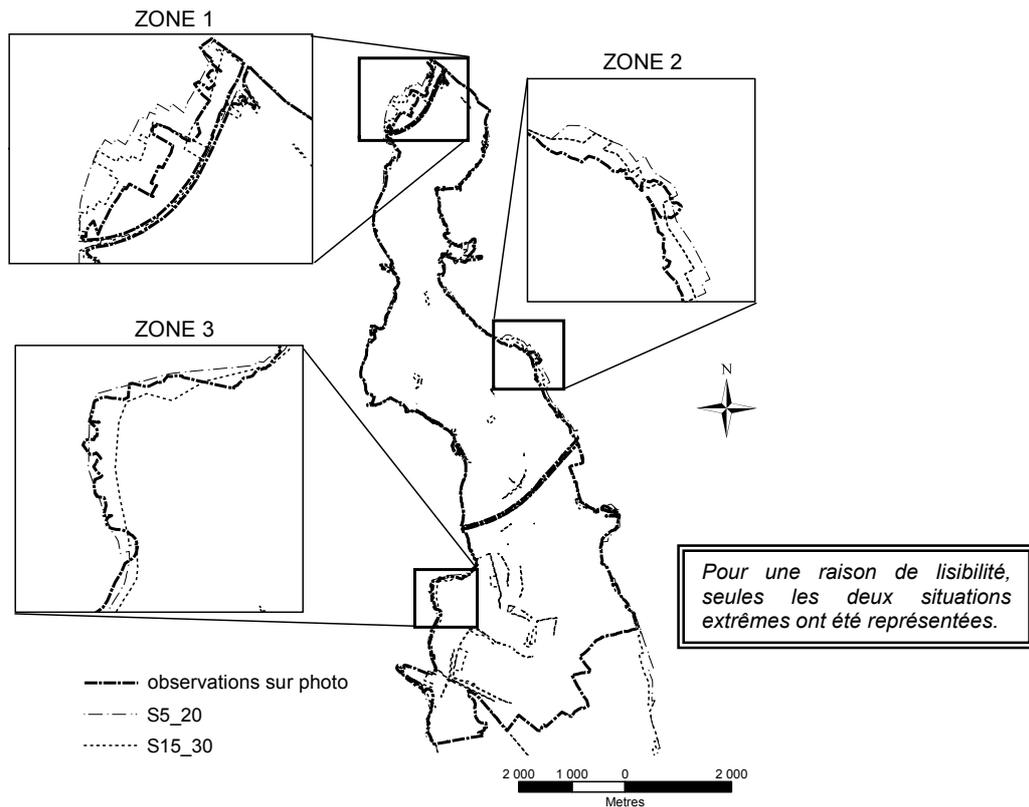


Figure 13-6 : comparaison avec l'observation "photo" des surfaces inondées obtenues avec les deux configurations "extrêmes" de strickler (analyse sur l'Hérault au moment de la prise des photographies aériennes verticales)

**13.4.2. Sur les cotes [Min ; Max] du toit de l'eau au moment des prises de vue oblique et verticale.**

Pour chaque campagne de prises de vue (oblique et verticale), la confrontation, entre les estimations de cote de l'eau issues de "l'approche-photo" et celles issues des simulations, a été effectuée sur toutes les mailles contenant un centroïde de compartiment. L'estimateur *écart*, entre la valeur donnée par le modèle hydraulique et la plage d'estimation "photo", a de nouveau été retenu. Les statistiques sur l'ensemble des comparaison sont fournies dans le Tableau 13-3.

Écart entre $Z_{\text{modèle}}$ et [Min ; Max]	Campagne de photos obliques			Campagne de photos verticales		
	S5_20	S10_25	S15_30	S5_20	S10_25	S15_30
<i>Moyenne (cm)</i>	50	5	1	84	30	10
<i>Écart-type (cm)</i>	31	10	8	46	31	21
<i>Minimum / Maximum cm)</i>	0 / 113	-19 / 60	-30 / 53	0 / 193	-19 / 124	-57 / 89
<i>% de valeurs conformes (écart = 0)</i>	13 %	58 %	76 %	4 %	20 %	37 %
<i>Moyenne des écarts en valeur absolue (cm)</i>	50	6	3	84	31	15

Tableau 13-3 : statistiques sur les écarts entre les hauteurs issues des simulations et les plages d'estimation de "l'approche-photo" (cas des photographies verticales et obliques sur le site de l'Hérault)

Les résultats trouvés sont tout à fait cohérents avec l'observation des hydrogrammes de sortie : 1) les simulations S5\_20 et S10\_25 ont tendance à sur-estimer fortement les hauteurs d'eau du fait de valeurs de Strickler trop faibles ; 2) l'estimation S15\_30 procure de loin la meilleure reproduction du comportement général de la crue. **Seule S15\_30 est conservée pour une analyse plus poussée.**

Une analyse plus fine de la confrontation des résultats de S15\_30 avec ceux issus de "l'approche-photo" (cf., Figure 13-7) montre, sans ambiguïté, une bonne similarité au moment de la campagne de photographies obliques. En revanche, de grosses différences apparaissent au moment des photographies verticales avec une tendance générale à la sur-estimation des hauteurs d'eau.

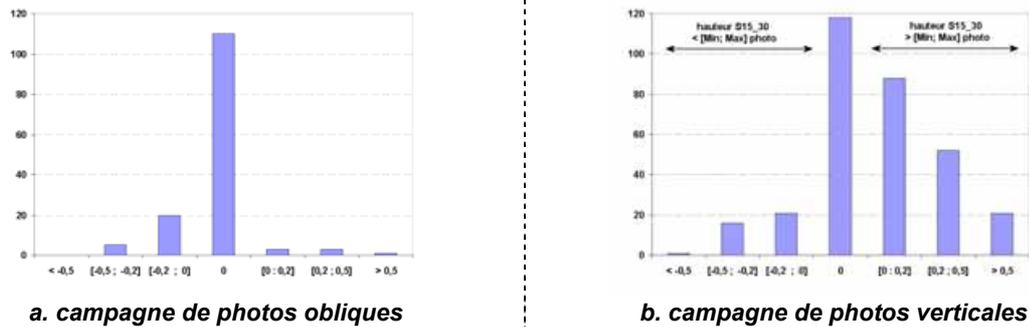


Figure 13-7 : histogrammes de répartition des écarts entre S15\_30 et les plages d'estimation issues de "l'approche-photo"

Afin d'estimer l'approche fournissant les meilleurs résultats, les mesures de la campagne GPS, initialement destinées à valider "l'approche-photo" (cf., § 11.3.3.1), ont été re-mobilisées.

Pour effectuer cette évaluation, les résultats de S15\_30 et le centre des estimations [Min ; Max] ont tous deux été comparés aux valeurs GPS.

Les résultats moyens, consignés dans le Tableau 13-4, montrent que **les valeurs centrales des plages d'estimation de "l'approche-photo" sont nettement plus proches des valeurs de référence GPS que celles de la meilleure simulation hydraulique, et cela pour les deux campagnes de clichés exploitées. Il est donc envisageable d'utiliser les estimations issues de "l'approche-photo" pour identifier les zones de dysfonctionnement de la simulation hydraulique, ou pour valider et/ou améliorer le calage des paramètres pour la simulation hydraulique.**

	Campagne de photos obliques (27 points de mesures GPS)		Campagne de photos verticales (33 points de mesures GPS)	
	1) Simulation $Z_{GPS} - Z_{S15\_30}$	2) "Approche-photo" $Z_{GPS} - Z_{(MIN + MAX)/2}$	1) Simulation $Z_{GPS} - Z_{S15\_30}$	2) "Approche-photo" $Z_{GPS} - Z_{(MIN + MAX)/2}$
Moyenne (cm)	8	3	-38	-16
Écart-type (cm)	38	34	42	25
Minimum / Maximum (cm)	-117 / 49	-125/68	-109 / 103	-69 / 45
Moyenne des différences en valeur absolue (cm)	23	21	49	23

Tableau 13-4 : statistiques sur les différences entre les mesures GPS et les cotes obtenues par 1) simulation hydraulique S15\_30 ; 2) "approche-photo" (cas de l'Hérault pour les clichés obliques et verticaux)

Faute de temps, le présent travail de comparaison avec les modélisations hydrauliques n'a pu aller au-delà de l'identification des secteurs sur lesquels la simulation présente un comportement divergeant par rapport à celui de "l'approche-photo".

La cartographie des écarts (*cf.*, Figure 13-8) entre les cotes issues de S15\_30 et les plages d'estimation de "l'approche-photo", au moment des clichés verticaux, **fait apparaître les mêmes secteurs que ceux identifiés lors de la confrontation des simulations avec les repères de crue, i.e.**, des valeurs trop élevées de la simulation hydraulique à la confluence de la Thongue et de l'Hérault (Zone 1) et surtout sur toute la rive gauche à l'aval du domaine de Saint-Joseph (Zone 2). Par ailleurs **de nouveaux secteurs de non-concordance peuvent être identifiés** : une tendance à la sur-estimation de S15\_30 à l'extrême aval du site (Zone 3), et un comportement inverse dans la Zone 4.

"L'approche-photo" permet donc d'identifier des zones de comportement anormal de la modélisation hydraulique. Les sources de ces "dysfonctionnements" peuvent provenir d'un problème de synchronisation ou d'un défaut dans la connaissance altimétrique de certaines structures importantes (*e.g.*, digue de "Saint-Joseph").

En rouge, tendance de la simulation hydraulique à la sur-estimation, en bleu, à la sous-estimation

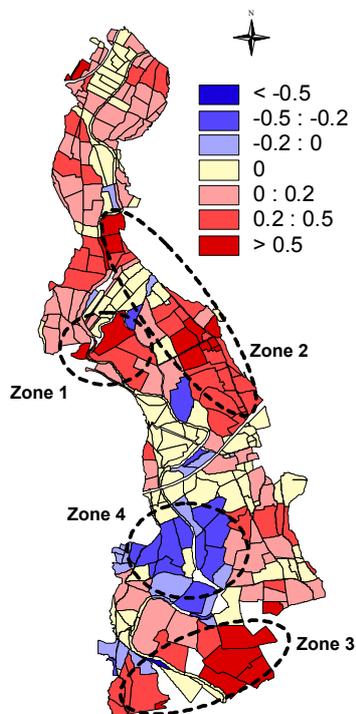


Figure 13-8 : écart entre S15\_30 et la plage [Min ; Max] de l'approche "photo" (cas des photos verticales)

En conclusion, il est intéressant de remarquer qu'avec la même topographie, "l'approche-photo" donne de meilleurs résultats que la meilleure des simulations hydrauliques testées. Cela semble démontrer une sensibilité plus faible à la topographie de "l'approche-photo" par rapport à la modélisation hydraulique.

"L'approche-photo" paraît finalement fournir des données distribuées de cote d'eau tout à fait pertinentes pour être intégrées dans des modélisations hydrauliques finement distribuées. Les perspectives de cette intégration sont une aide à la validation et/ou au calage.

## 14. Bilan et perspectives pour "l'approche-photo"

### 14.1. Réflexions sur la méthodologie développée

#### 14.1.1. Une approche multidisciplinaire

La valorisation des photographies aériennes en crue a été rendue possible grâce à l'intégration d'un schéma d'analyse spatiale et de techniques inspirées du domaine de l'intelligence artificielle. En orientant l'ensemble des démarches vers l'hydraulique, les nombreuses informations qualitatives ou semi-qualitatives contenues dans ces documents ont permis, malgré leur caractère imparfait, une caractérisation quantitative des cotes du toit de l'eau avec une qualité tout à fait satisfaisante pour des exigences de gestion du risque d'inondation.

L'originalité de la méthodologie développée provient, à mon sens, de l'interconnexion de ces quatre disciplines : hydraulique, télédétection, analyse spatiale et intelligence artificielle.

#### 14.1.2. Révision et traçabilité

L'ensemble de la démarche méthodologique a été développé dans un souci de minimiser les risques d'obtenir un résultat erroné. Pour cela, le processus de révision a été basé sur des règles les plus objectives et formalisées possibles. Le principal danger d'une telle démarche se situe au niveau de l'identification des sources d'informations à réviser.

C'est pourquoi une étape de validation interne (*cf.*, § 11.2) a été mise en place pour tester et contrôler le bon comportement général de la stratégie de révision adoptée.

Rappelons que le critère de révision retenu pour choisir l'information à réviser s'appuie sur un contrôle statistique : une information (ou un groupe d'informations) est révisée que si un nombre plus important d'informations la désigne comme source d'un conflit.

Il est donc possible qu'une information erronée soit maintenue dans des configurations particulières où aucune information correcte ne vient la remettre en cause. Ce maintien doit cependant rester exceptionnel, à moins que l'information initiale ne soit majoritairement erronée auquel cas, la qualité du résultat ne peut être bonne, et ce, quelle que soit la méthode utilisée.

Par ailleurs, la formalisation de l'approche au sein d'un SIG permet de maîtriser les différentes étapes de l'approche depuis les données sources jusqu'aux résultats. Cette traçabilité constitue un véritable atout et donne à l'utilisateur la possibilité de vérifier, non seulement la cohérence du résultat obtenu, mais également les diverses étapes de révision. L'environnement SIG, avec ses capacités d'affichage et de confrontation de données, va également dans ce sens.

#### 14.1.3. Un large champ d'application

Les différents cas d'application, développés sur des contextes très différents (prise de vue, émulsions, vecteur, hydrologie, morphologie..), ont montré le large champ d'application de "l'approche-photo".

En fournissant de nouvelles données altimétriques, le développement des bases de données environnementales devrait contribuer au développement d'une telle approche.

## 14.2. Positionnement vis-à-vis des approches "classiques" d'analyse de l'aléa

La méthodologie proposée se situe globalement entre l'approche hydrogéomorphologique et la modélisation hydraulique. Le Tableau 14-1 synthétise les points fondamentaux de chaque approche dans un contexte français d'inondation de plaine : philosophie, exigences, facilité/rapidité de mise en oeuvre, limites, nature de résultats, et intérêt.

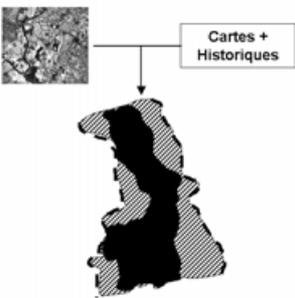
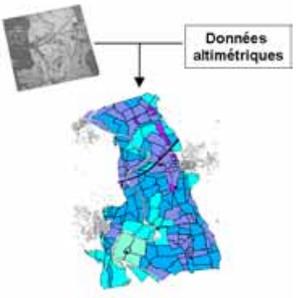
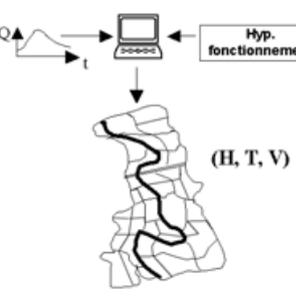
	APPROCHE HYDRO-GÉOMORPHOLOGIQUE	APPROCHE "PHOTO"	MODÉLISATION HYDRAULIQUE (transitoire)
<b>Philosophie</b>	Approche inter-événementielle basée sur observations du façonnement de la plaine (démarche inductive)	Approche événementielle (à un instant précis) basée sur observations de la crue par P.A. (démarche inductive)	Approche événementielle (en continu) basée sur des simulations numériques. (démarche déductive)
<b>Schématisation</b>			
<b>Exigences</b> Dont	** - P.A. hors inondation - cartes et archives sur les différentes crues et sur l'évolution du milieu	*** - P.A. en crue - altimétrie du sol hors structures - altimétrie d'éléments du sursol (végétation ...)	**** - modèle numérique - altimétrie du sol + structures - hyp. de fonctionnement (frottement, loi d'ouvrage)
<b>Facilité/Rapidité</b>	***	**	*
<b>Limites / Difficultés</b>	Prise en compte des modifications anthropiques	Disponibilité en photographies pendant la crue	Choix <i>a priori</i> de modélisation Calage et validation
<b>Résultats</b>	Appréciation générale de l'aléa Rendu qualitatif et global par grands secteurs (fort, moyen ou faible)	Niveaux d'eau au seul instant de prise des photos Rendu quantifié sous forme de plages par compartiments de quelques ha	Niveaux d'eau et vitesse tout au long de la crue Rendu quantifié sans incertitude associée par élément de calcul (du m <sup>2</sup> à plusieurs ha)
<b>Intérêts</b>	Cartographie réglementaire dans zones à faibles enjeux	<i>cf.</i> , § 14.3	Cartographie réglementaire dans zones à forts enjeux + scénarios d'aménagement

Tableau 14-1 : positionnement de "l'approche-photo" par rapport à l'approche hydrogéomorphologique et à la modélisation hydraulique numérique

(\* : faible ; \*\* : moyen ; \*\*\* : élevé ; \*\*\*\* : très élevé --- P.A. = Photographie Aérienne)

Par son entrée géographique basée sur l'observation, "l'approche-photo" s'apparente beaucoup à l'approche hydrogéomorphologique. Elle en diffère cependant assez nettement du fait de sa spécialisation sur un événement précis pour fournir des résultats quantitatifs sur les niveaux d'eau.

D'un autre côté, ses exigences en données altimétriques la rapprochent du champ d'action de la modélisation hydraulique. Toutefois, le schéma utilisé est tout à fait l'inverse de celui de la modélisation puisqu'il ne fait aucune hypothèse hydraulique (*i.e.*, ni frottements, ni tenue de digues...) mais s'appuie sur une observation des niveaux d'eau atteints. Cette différence de philosophie s'apparente à l'opposition entre démarche inductive et démarche déductive.

En se démarquant ainsi des deux grandes approches "classiques", "l'approche-photo" vient enrichir la panoplie des méthodes existantes. Son intérêt principal vient alors de sa complémentarité, même si la caractérisation des niveaux d'eau atteints peut déjà constituer un résultat en soi.

### 14.3. Intérêts

#### 14.3.1. Retombée directe : une base SIG facilement consultable et de grand intérêt pour les gestionnaires du risque d'inondation

Une retombée intéressante de "l'approche-photo" concerne la création d'une base de données référençant les crues traitées. En étant structurée au sein d'un SIG, cette base, aisément consultable, répertorie :

- le contexte hydrologique de la crue (*e.g.*, fréquence du phénomène, hydrogrammes observés...);
- les clichés aériens repérés par leur empreinte au sol, et remis dans le contexte hydrologique de la crue (*i.e.*, positionnement de l'instant de prise de vue par rapport au le pic de crue);
- les limites de débordement et les compartiments touchés par la crue.
- le niveau d'eau dans chaque compartiment inondé (avec une plage de variation associée).
- la hauteur d'eau estimée à l'aplomb de tout point coté (avec une plage de variation associée).

La Figure 14-1 illustre, sur la Moselle, une partie de cette base : empreinte de photos obliques pour chaque crue étudiée avec les photographies rapidement accessibles par simple click ; structuration en compartiments avec les niveaux d'eau atteints pour chaque crue étudiée ; semis de points cotés avec les estimations de hauteurs d'eau associées.

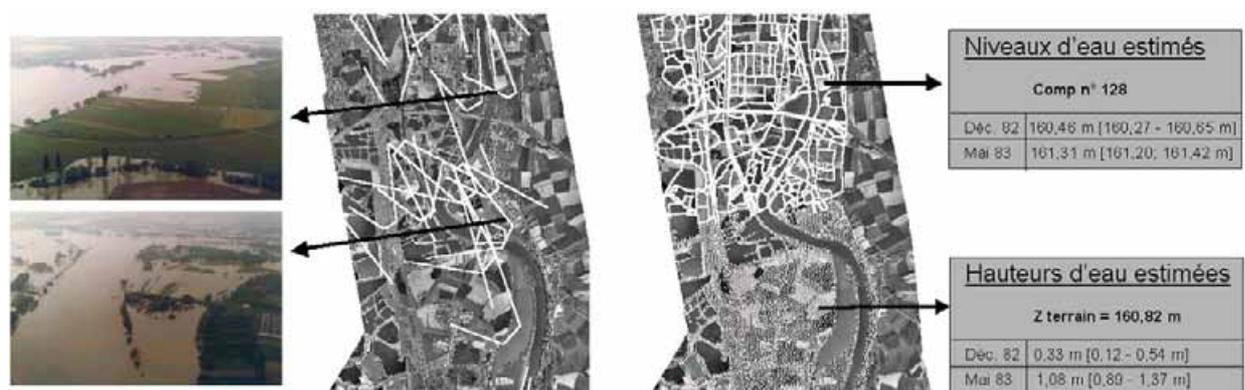


Figure 14-1 : illustration des possibilités offertes par la base opérationnelle

Le SIG rend ces données disponibles à tout moment et en particulier en période de risque de crue (*i.e.*, pré-crise). Il est alors possible d'interroger immédiatement la base pour connaître l'état atteint lors d'une crue de même ampleur que celle redoutée. Les photographies indiquent alors, sous forme analogique, les routes coupées et les terres inondées, tandis que la valorisation numérique, sous forme de cotes et hauteurs d'eau attachées, affine les possibilités de la base. Cette forme d'archivage, facilement mobilisable, peut être fort utile à tous les niveaux de la gestion du risque d'inondation :

- en période d'alerte et de crise pour l'organisation des secours (*e.g.*, routes potentiellement coupées) en référence aux événements historiques ;
- en post-crise, pour une première évaluation des dégâts par les compagnies d'assurances ;
- en retour d'expérience pour aider à comprendre le phénomène et à envisager des solutions d'aménagement... ;
- en communication au grand public pour améliorer la culture du risque ou pour faciliter l'acceptation de zonage réglementaire (caractère incontestable de présence d'eau sur les clichés) ;

L'idée est d'enrichir cette base de connaissances par chaque observation de crue, afin de fournir, *in fine*, une large panoplie de crues pouvant servir de référence. Une discussion sur l'organisation nécessaire des observations est abordée ci-après (*cf.*, § 14.4).

### 14.3.2. Retombée indirecte : Articulation avec les approches "classiques"

#### Avec l'approche hydrogéomorphologique

En produisant des résultats quantitatifs sur une crue ou mieux sur une série de crues, "l'approche-photo" fournit une matière première très précieuse pour le développement de l'approche hydrogéomorphologique. En effet, l'environnement SIG offre des potentialités beaucoup plus larges que le simple accès à l'information. Il facilite par exemple 1) l'analyse inter-événementielle ; 2) les analyses diachroniques pour déterminer les évolutions naturelles et anthropiques du milieu ; 3) la cartographie des enjeux 4) le croisement entre aléa et enjeux pour déterminer la cartographie hydrogéomorphologique finale du risque d'inondation.

"L'approche-photo" permet par ailleurs, par son apport en estimations quantitatives sur la cote de l'eau, d'affiner le zonage hydrogéomorphologique tant dans sa configuration spatiale que dans son niveau de précision.

Étant donné que l'analyse géographique du milieu est commune aux deux approches, il y a tout intérêt à associer "l'approche-photo" à l'approche hydrogéomorphologique dès lors que les conditions requises sont satisfaites (*i.e.*, existence de clichés en crue et de données altimétriques).

#### Avec la modélisation hydraulique

Tout comme l'approche hydrogéomorphologique, "l'approche-photo" est largement utile en amont de la modélisation pour orienter l'acquisition des données topographiques (ne serait-ce que l'emprise global du champ d'inondation), et pour permettre de faire les bons choix de modélisation. On pense notamment à la désignation d'un niveau adéquat de simplification (*i.e.*, modèle 1D, 2D ou à casiers), ou à la définition de la géométrie du modèle (*i.e.*, positionnement des sections en travers ou des limites des éléments de calcul de type maille et casier).

Par ailleurs, ce travail a montré que la caractérisation de l'état de la plaine, produite par "l'approche-photo", est suffisamment précise et fiable pour servir dans la phase de calage ou de validation des

modélisations hydrauliques. Sa force est de partir de l'observation sans avoir besoin d'émettre d'hypothèses sur la tenue des digues, la valeur des frottements... Cela permet d'effectuer en retour un contrôle des hypothèses de fonctionnement des modélisations numériques (e.g., déversement, rupture de digue), ou encore de se faire une idée sur le rôle réel de telle ou telle digue au moment de la prise des clichés (y a-t-il surverse ?, si oui quel est l'ordre de grandeur de la dénivelée de part et d'autre de la digue ? ...). Cette phase très fine de diagnostic est illustrée sur le site Hérault à travers la Figure 14-2. Si elle ne permet pas de résoudre toutes les questions, elle permet au moins de localiser les sources potentielles d'erreurs (e.g., topographie de structures importantes, brèche non prise en compte...).

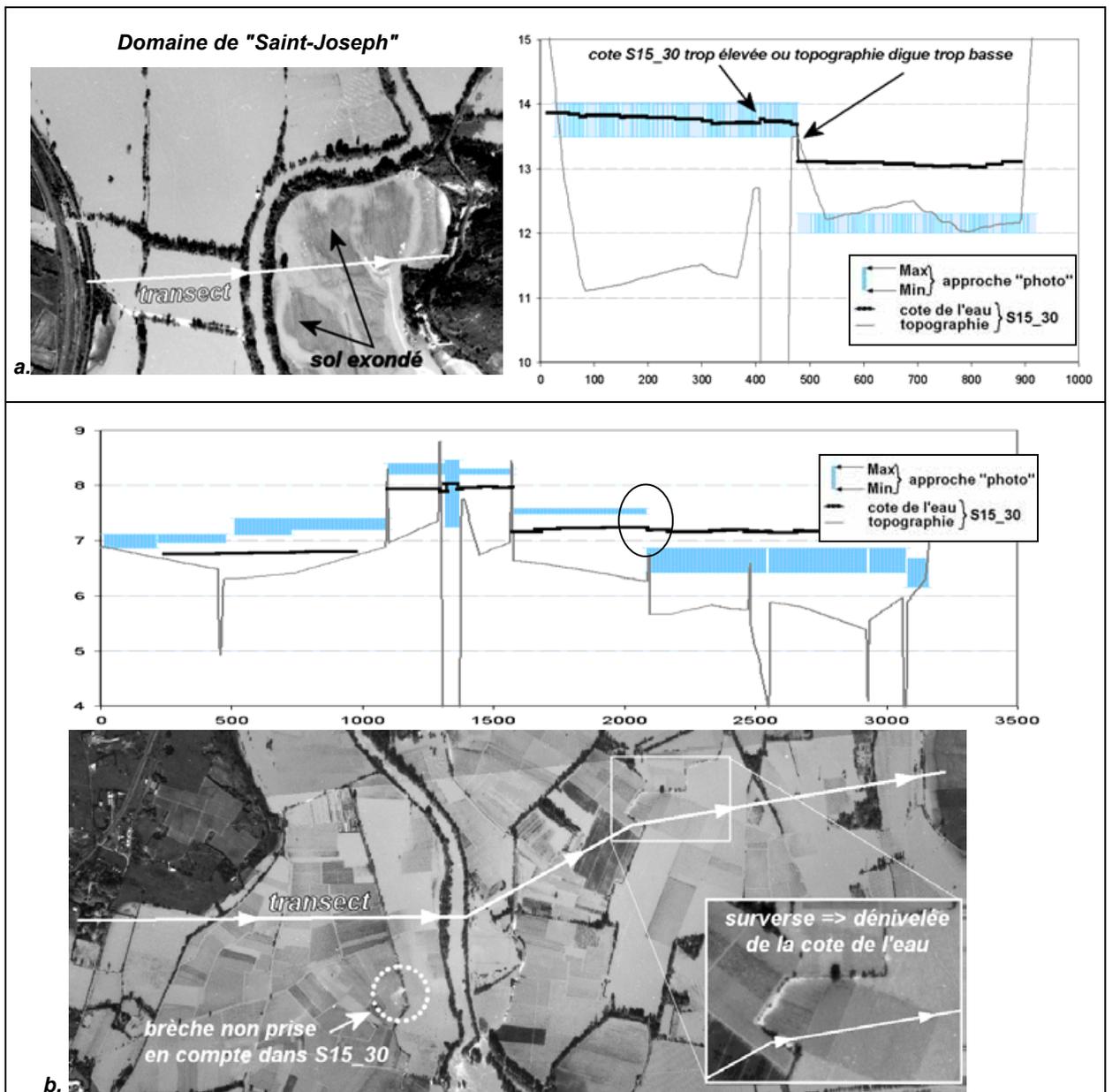


Figure 14-2 : diagnostic, grâce à "l'approche-photo", des sources d'erreurs présumées dans la simulation hydraulique (transects sur l'Hérault au moment de la prise des photographies verticales)

## 14.4. Limites

La principale limite de cette approche est incontestablement la disponibilité de photographies en crue, si possible à un instant proche du pic de crue. Actuellement, les prises de vue au cours des crues sont encore rarement réalisées d'une façon continue, et restent souvent orientées vers une optique journalistique focalisée sur les seuls points particuliers "à sensation".

Il faut donc organiser ce recueil, d'autant plus que les crues sont des phénomènes fugitifs. La démarche pour organiser une campagne de prise de vue, *i.e.*, trouver une société de service, débloquer les fonds... est souvent trop longue si aucune préparation ne permet de l'accélérer. Ainsi en novembre 1999, dans les inondations dites « du grand sud » (Aude, Hérault, Tarn), la prise de vue aérienne systématique des zones inondées a commencé 10 jours après le pic de crue ! Le succès d'une telle campagne pendant une crue semble donc tributaire d'une bonne organisation anticipée : réserve financière prévue à cet effet, contrat de veille avec une société de service, consigne de prise de vue systématique et continue de l'ensemble de la plaine... Le recueil de photographies peut alors devenir facile et d'un coût marginal par rapport aux dommages causés par l'inondation. Il l'est d'autant plus qu'il a été montré que des systèmes très légers comme les avions d'aéroclub (Moselle) ou même les ULM (Aisne) conviennent parfaitement. Les contraintes climatiques s'en trouvent de plus réduites puisque de tels dispositifs sont capables de voler sous le plafond nuageux.

Le point le plus fastidieux de la méthode reste la phase préparatoire hors crue avec la mise en place de la base SIG, l'acquisition d'une topographie fiable, le repérage de l'occupation du sol et de toutes les données altimétriques pouvant servir à estimer la cote de l'eau. Une fois ce travail réalisé, la ré-application de la méthode devient très rapide. La base de connaissances sur les crues peut ainsi s'enrichir du traitement de multiples événements, ce qui augmente alors les retombées potentielles pour la gestion du risque d'inondation.

Finalement, cela revient à militer pour la mise en place d'observatoires des plaines d'inondation, extension de la proposition faite par le MATE de création d'observatoires des enjeux et de leur vulnérabilité aux inondations [MATE, 2001].

## 14.5. Perspectives

### 14.5.1. Liées à la validation de "l'approche-photo"

Même si la validation de "l'approche-photo" a été un souci constant tout au long de ce travail, elle doit encore être poursuivie. Mais comme son résultat est une quantification distribuée des niveaux d'eau qui vient combler certaines lacunes de mesures sur le terrain, la phase de validation est très délicate à mener. Il faut donc favoriser les tests sur des plaines, dont le comportement en crue est bien connu. Cela exige des actions de planification pour organiser des campagnes de prises de vue sur toute future crue.

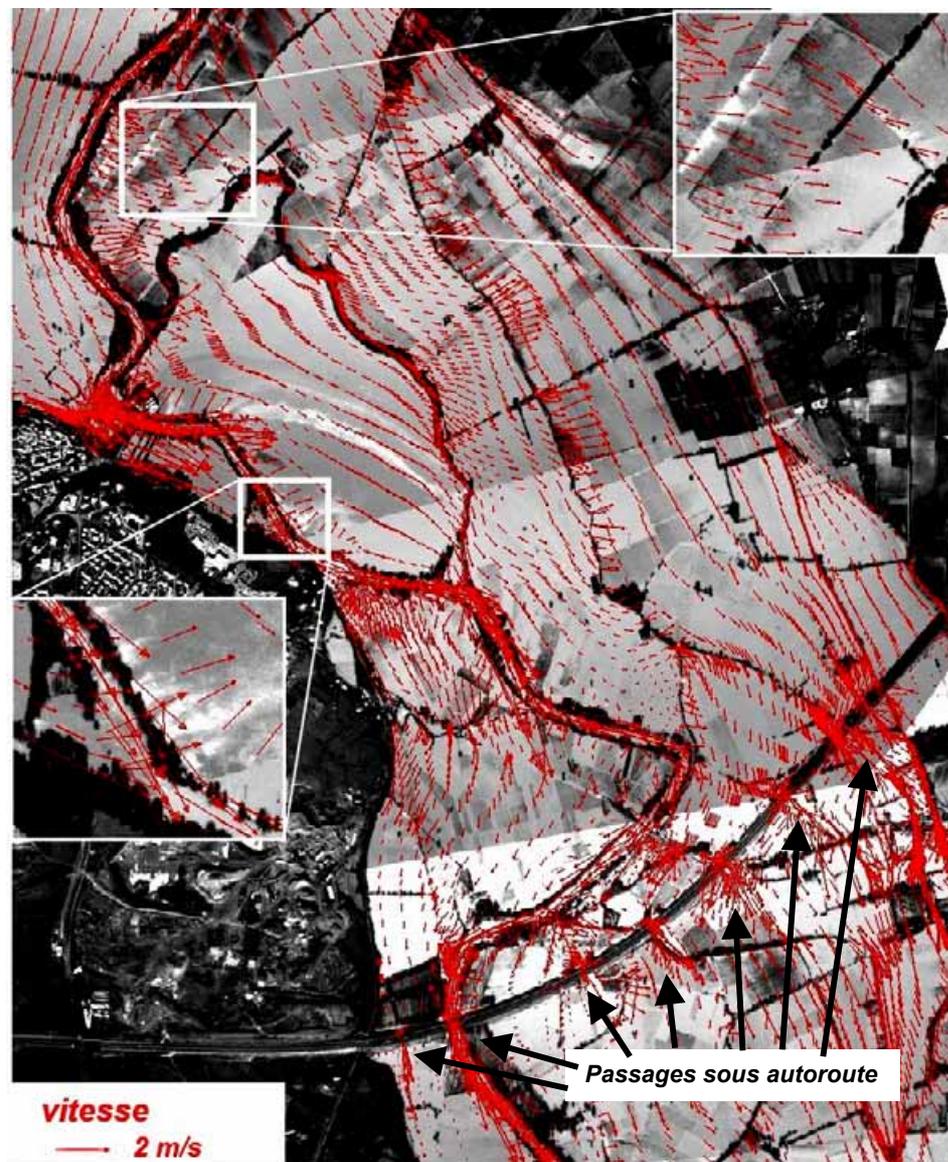
En parallèle, des protocoles d'acquisition sur le terrain, du type de celui mis en place avec le GPS différentiel, doivent permettre d'augmenter les mesures pouvant servir de référence. Un tel dispositif pourrait judicieusement accompagner le repérage des laisses réalisé juste après la crue, en permettant de quantifier, en altimétrie, les informations issues de témoignages. Au final, des connaissances sur la crue pourrait être acquises plus rapidement, en un plus grand nombre de points, et dans une forme plus facilement mobilisable pour les approches quantitatives .

### 14.5.2. Liées à l'articulation avec les autres approches d'analyse de l'aléa

Après la validation, l'articulation de "l'approche-photo" avec les autres modes d'analyse de l'aléa reste, sans aucun doute, une voie à approfondir. Abordé dans cette thèse pour la modélisation hydraulique bidimensionnelle, ce chantier n'a pu aboutir que très partiellement. La principale raison vient de la qualité de la topographie disponible qui s'est avérée être très en deçà des attentes.

Par ailleurs, d'autres voies de validation que la confrontation des niveaux d'eau sont envisageables. Parmi celles-ci, une confrontation des vitesses modélisées avec les écoulements visibles sur photographies (*cf.*, Figure 14-3) pourrait par exemple apporter des éléments de réponse quant à l'origine de certaines zones de non-concordance.

**Grâce à la superposition, les comparaisons sont faciles et permettent par exemple de répondre rapidement à la question suivante : "les écoulements produits par la modélisation sont-ils en accord avec ceux visibles sur photographie (panaches de turbidité) ?"**



*Figure 14-3 : superposition des vitesses estimées par la simulation numérique avec les photographies en crue orthorectifiées (cas de l'Hérault au moment de la prise des clichés verticaux)*

### 14.5.3. Liées aux sources de données de télédétection

Bien que la télédétection satellitaire soit fortement tributaire de la concomitance du passage de satellite avec la crue (et des conditions météorologiques pour les données optiques), certaines images existent et comportent des informations nouvelles pouvant étoffer à la connaissance hydrologique habituelle. En ce sens elles méritent d'être valorisées.

Il pourrait être intéressant de tester la philosophie de "l'approche-photo" en confrontant les bordures du champ d'inondation issues d'images satellites avec des données topographiques pour des plaines à encaissement doux et progressif. Avec la venue d'images satellitaires à très haute résolution spatiale, la valorisation d'objets internes devient également réaliste. Dès lors, le facteur limitant risque bien de se retrouver, non pas au niveau des images, mais au niveau de la connaissance altimétrique du terrain naturel (*cf.*, [Robin, 2000]).

A l'inverse, le développement de petits vecteurs téléguidés pouvant embarquer des appareils photographiques (*e.g.*, drone<sup>25</sup>) peut également constituer une alternative intéressante. La seule contrainte actuelle se situe au niveau du pilotage qui, réalisé à vue, limite à un kilomètre environ le rayon d'action d'un tel dispositif. L'opérateur est donc tenu de se déplacer, ce qui, en période de crue, peut poser quelques problèmes.

### 14.5.4. Liées à une analyse multi-temporelle d'une même crue

L'idée de l'analyse multi-temporelle est de valoriser conjointement, sur un même site, plusieurs jeux de photographies en crue pour lesquels les niveaux d'eau sont clairement étagés. Cette configuration peut correspondre à des prises de vue d'une même crue à des instants différents, ou de plusieurs crues ayant des périodes de retour bien distinctes.

Supposons, par exemple, avoir à disposition deux jeux de photographies aériennes prises, pour une même crue, à des dates  $t1$  et  $t2$  différentes. Il devient alors possible d'utiliser, en plus des contraintes spatiales déduites des circulations hydrauliques (un ensemble à  $t1$  et un autre à  $t2$ ), des contraintes temporelles déduites de l'évolution présumée de la cote d'eau entre  $t1$  et  $t2$  (*cf.*, Figure 14-4). On imagine par exemple pouvoir valoriser le fait que les cotes de l'eau estimées vers le pic de crue sont supérieures aux cotes de l'eau estimées en période de montée ou de descente des eaux.

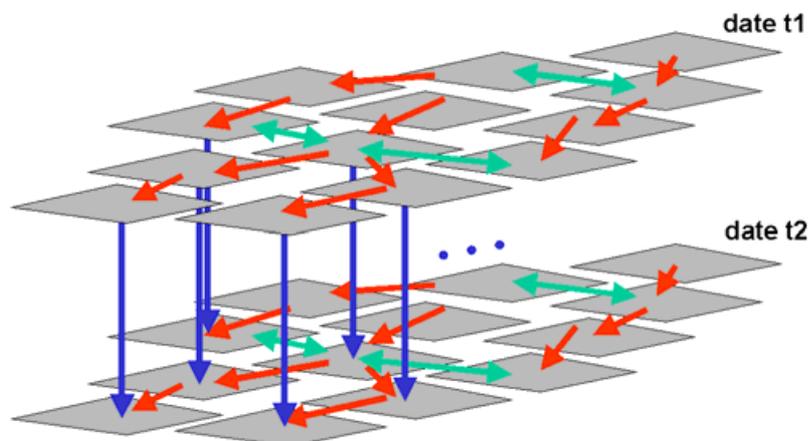


Figure 14-4 : contraintes temporelles entre deux dates venant s'ajouter aux contraintes spatiales liées au fonctionnement hydraulique à chacune des dates

<sup>25</sup> <http://www.drone-pixy.net/>

Il s'agit donc d'introduire, par secteur géographique, une connaissance exogène aux images sur la dynamique temporelle de la crue. Celle-ci peut par exemple être provenir de mesures de terrain (e.g., limnigrammes de la crue) ou de témoignages recueillis auprès de la population.

La connaissance introduite peut alors s'exprimer dans l'une des trois formes suivantes :

1. la cote de l'eau d'un compartiment à l'instant  $t1$  doit être supérieure à celle du même compartiment à l'instant  $t2$  ;
2. la cote des compartiments à  $t1$  doit être à peu près égale à la cote des compartiments à la date  $t2$  ;
3. la cote des compartiments à  $t1$  doit être inférieure à la cote des compartiments à la date  $t2$ .

Les contraintes temporelles peuvent donc se retranscrire dans le même formalisme que les contraintes spatiales, les cas de la zone A et C correspondant à un flux et le cas de la zone B à un équilibre. Il devient donc tout à fait intéressant de les gérer au sein d'un même système de contraintes spatio-temporelles pour améliorer la cohérence hydraulique et la qualité des résultats finaux. Cette perspective intéresse fortement les personnes travaillant dans le domaine de l'intelligence artificielle qui trouverait là un cas d'application "école" pour illustrer une partie de leurs travaux.

Faute de temps, et parce que les données ne s'y prêtaient pas vraiment, seul l'intérêt de la démarche est illustré à travers une application séquentielle des contraintes : après avoir appliqué les contraintes spatiales aux instants  $t1$  et  $t2$  , l'effet de la prise en compte des contraintes temporelles a été testé (cf., Annexe 11).

#### 14.5.5. Liées à l'estimation de paramètres par méthode inverse

Une dernière idée est d'insuffler la connaissance issue de "l'approche-photo" dans la modélisation hydraulique afin d'en déterminer directement certains paramètres. Cette démarche, appelée parfois problème, méthode ou encore modèle inverse, a déjà été entreprise avec plus ou moins de succès dans l'assistance au calage des coefficients de frottements [Barros, 1996]. Les travaux engagés dans cette voie sur le site de l'Aisne [Roux et al., 2003] en diffèrent dans le sens où ils se placent dans le cas d'une méconnaissance forte de la géométrie de la plaine. L'idée est d'assimiler la délimitation surfacique provenant de télédétection dans le modèle hydraulique afin de reconstituer une géométrie équivalente, et non pas d'agir sur les coefficients traditionnels de calage. La multiplication des observations à des intensités de crue différentes devient alors nécessaire pour que la démarche puisse aboutir à une caractérisation réaliste de la géométrie.

----- oOo -----



## **Conclusion générale**



### *CONCLUSION GÉNÉRALE*

L'ambition de ce travail était de proposer une méthodologie qui permette de dépasser la faible valorisation actuelle des photographies aériennes prises en période de crue, et ainsi de rendre ces documents plus attractifs pour l'analyse de l'aléa.

La démarche développée, exposée dans la PARTIE III, permet de transformer la vision planimétrique offerte par les photographies en une caractérisation quantitative des niveaux d'eau sur l'ensemble de la plaine inondée à l'instant de la prise des clichés (*i.e.*, vision 3D). D'une précision de l'ordre de un à deux décimètres (*cf.*, PARTIE IV), cette caractérisation est une avancée conséquente puisqu'elle procure des résultats tout à fait compatibles avec les exigences de gestion du risque d'inondation. Elle permet, notamment, de faciliter et améliorer l'intégration des photographies dans les approches traditionnelles d'analyse de l'aléa que sont l'approche hydrogéomorphologique et la modélisation hydraulique (*cf.*, PARTIE V).

Le caractère original et novateur de cette thèse provient du développement méthodologique qui allie, dans un schéma unique guidé par l'hydraulique, des techniques de télédétection, d'analyse spatiale et d'intelligence artificielle.

Rajoutons que ce travail se positionne parfaitement bien dans la mouvance actuelle de la recherche française dans les domaines de l'information géographique et de l'analyse spatiale. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder les activités du Groupe De Recherche CASSINI- SIGMA<sup>26</sup> pour s'apercevoir que cette thèse s'inscrit pleinement dans 4 des 6 thèmes qui y sont développés. Le thème 6, dont l'objectif général est "*le développement de méthodes d'analyse des images aériennes et spatiales à très haute résolution et leur intégration dans les méthodes d'analyse et de modélisation des processus spatiaux afin d'améliorer la caractérisation des milieux naturels et urbains*" est particulièrement concerné. Les trois autres thèmes en relation portent sur la gestion de l'environnement et des risques naturels (thème 1), l'analyse spatiale (thème 2) et les problèmes de qualité de données (thème 3).

Cette conclusion revient dans un premier temps sur les intérêts et avancées méthodologiques de l'approche développée, et analyse ensuite les retombées potentielles pour la gestion du risque d'inondation et les méthodes existantes d'analyse de l'aléa.

#### **Point de vue méthodologique : télédétection, analyse spatiale et intelligence artificielle**

Un premier point fort de ce travail provient de l'**intégration de l'analyse spatiale dans le traitement d'images de télédétection**. En effet, la définition d'un **schéma spatial fonctionnel** adapté à l'objectif hydraulique a permis de gérer conjointement le grand nombre d'informations contenues dans les photographies en crue, même si chacune d'entre elles paraissait de qualité médiocre et pouvait par ce fait être considérée comme trop faiblement informative pour mériter d'être valorisée.

La démarche entreprise s'intègre donc parfaitement dans une **approche de type objet** qui permet de dépasser l'information radiométrique contenue dans le pixel pour aller vers une prise en compte des **relations d'espace** entre ces objets. Une telle appréhension des images a vocation à se développer

---

<sup>26</sup> <http://cassini.univ-lr.fr/index.html>

avec la venue des images à très haute résolution spatiale, sur lesquelles les traitements classiques de type classification automatique pixel à pixel ont tendance à être peu efficaces .

Elle s'oppose philosophiquement à la démarche traditionnelle de caractérisation d'un phénomène, qui, pour des raisons évidentes de coût et de disponibilité en hommes et matériels, consiste à le mesurer de manière très précise et en un nombre de points extrêmement limités (quelques limnigrammes). En fait elle rejoint l'idée qu'un phénomène peut être bien appréhendé avec des observations non quantitatives si tant est que le nombre d'observations est suffisant. En ce sens, elle s'inscrit dans la lignée du **raisonnement qualitatif** qui cherche à formaliser ce mode de compréhension. Cette démarche qui consiste à essayer de valoriser toute donnée disponible, même de médiocre qualité, apparaît tout à fait **complémentaire** à la démarche hydrologique/hydraulique "classique". En privilégiant, avec un relatif succès, le nombre d'observations au détriment de leur qualité, ce travail peut être vu comme un **plaidoyer en faveur de la télédétection**.

Tout appel à des informations ou des connaissances exogènes aux images est alors fortement encouragé pour augmenter la valorisation des informations contenues dans les images de télédétection. Sans apport de données altimétriques, les photographies aériennes n'auraient certainement pas livrées autant de secret !

Pour la phase de recueil et de mise en relation des données spatiales, le **SIG** s'avère être un **outil de structuration et de manipulation très performant**. Par contre, la multiplicité des sources d'imperfections liées aux informations spatiales nécessite de trouver un mode de représentation commun de la qualité. La réponse proposée dans ce mémoire consiste à la gérer **sous une forme globalisée par un degré de préférence**. En cela, elle constitue un point original de ce travail et une alternative intéressante au schéma probabiliste traditionnel.

Quant à l'intégration de l'analyse spatiale dans la valorisation des images de télédétection, elle a soulevé des problématiques relevant du domaine de **l'intelligence artificielle (IA)** : **satisfaction de système de contraintes**, problèmes de **fusion/mise en cohérence d'informations de qualités disparates**... L'appropriation de ces techniques, et/ou le rapprochement avec des équipes travaillant dans ce domaine, constitue, à mon avis, un enjeu fondamental pour les sciences de l'environnement. Cette voie de rapprochement est d'autant plus convaincante que :

- la demande d'une telle collaboration est mutuelle, comme en témoigne l'intérêt suscité par l'application "photo" auprès des membres du projet européen REVIGIS ;
- les problèmes de fusion et de mise en cohérence vont se multiplier en sciences de l'environnement, ne serait-ce que par la prolifération actuelle des bases de données.

Ces trois années de recherche m'ont conforté dans l'idée qu'un "bon" traitement de télédétection devait s'appuyer sur des connaissances fortes de la thématique d'étude. Le recours à des techniques IA semble suivre la même règle puisque l'heuristique développée pour l'algorithme de mise en cohérence est avant tout orientée par des considérations hydrauliques.

Pour finir sur l'aspect méthodologique, il est intéressant de noter que le schéma de pensée utilisé dans ce mémoire est tout à fait transposable à la dimension temporelle. Si l'analyse multi-temporelle n'a pu, ici, dépasser le stade de l'esquisse, la gestion de contraintes à la fois spatiales et temporelles reste une ouverture très prometteuse pour aller véritablement vers la modélisation (dynamique) qualitative.

### *Point de vue application : hydraulique – analyse de l'aléa*

Avant d'aborder des points plus pratiques, il me semble utile de revenir sur un problème méthodologique majeur dans l'étude des phénomènes difficilement observables : **celui de la validation**. En effet, **comment valider une approche dont l'objet est de produire une information spatialisée qui n'existe pas traditionnellement ?** Une telle configuration conduit forcément à l'absence de données de référence. Il devient alors indispensable de **repenser certains protocoles d'acquisition** afin de les adapter à une collecte d'informations permettant de répondre aux besoins des approches spatialisées. La solution retenue pour "l'approche-photo", basée sur un GPS cinématique différentiel, en est une illustration.

Un point important est la capacité de "l'approche-photo" à s'adapter à un panel très large d'inondations de plaine, les trois applications mises en œuvre en sont la preuve. Sa faible sensibilité aux paramètres d'entrée constitue également un atout non négligeable. Dans la mesure où "l'approche-photo" est tout à fait semblable à l'estimation d'une grandeur à partir d'un grand nombre de mesures indépendantes, mais de faible qualité, la précision de ses résultats est fortement liée au nombre d'informations initiales. Toutes les sources de données sur la cote du toit de l'eau doivent donc être recherchées et valorisées.

En se démarquant des approches traditionnelles, "l'approche-photo" vient compléter la panoplie des méthodes existantes d'analyse de l'aléa inondation de plaine. Sa complémentarité avec l'approche hydrogéomorphologique et avec la modélisation hydraulique constitue une retombée majeure de ce travail. La structuration, au sein d'une base SIG, des informations sur les crues traitées forme, quant à elle, une retombée secondaire en permettant un accès rapide à des caractérisations de crues pouvant servir de référence.

Il est également nécessaire de rappeler les deux points suivants :

- Les campagnes de prises de vue systématiques et continues restent rares et demandent d'anticiper leur organisation. Dans ce cadre, la création d'observatoires des plaines d'inondation nous paraît être une bonne voie pour stimuler la prise d'informations.
- "L'approche-photo" a fortement favorisé la dimension spatiale par rapport à la dimension temporelle. C'est pourquoi l'articulation avec la modélisation hydraulique reste une voie à privilégier dans les futurs développements. Les conclusions tirées dans ce mémoire, quant aux possibilités réelles d'articulation entre ces deux approches, mériteraient d'être affinées sur un site présentant une qualité de topographie plus élevée que celle utilisée sur l'Hérault. Pour cela, une topographie acquise avec des données d'origine Lidar pourrait convenir.

Enfin, j'espère que ce mémoire aura, au moins, démontré l'intérêt de mener des approches multidisciplinaires dans les sciences de l'Environnement, et notamment celles ayant trait à l'hydrologie.

----- oOo -----



## Références bibliographiques

- Alchourrón C. E., Gärdenfors P., Makinson D.** *On the logic of theory change: Partial meet contraction and revision functions.* Journal of Symbolic Logic, 1985, vol. 50, p. 510-530
- Alcrudo F., Garcia-Navarro P.** *Computing two dimensional flood propagation with a high resolution extension of MacCormack's method.* In: Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas, Milan, ITALY, 1994. ASCE. 29 June - 1 July 1994. p. 3-17
- Ambroise B.** *Génèse des débits dans les petits bassins versant ruraux en milieu tempéré : 2- Modélisation systémique et dynamique.* Revue des Sciences de l'Eau, 1999, vol. 12, n° 1, p. 123-153
- Amighetti F. F., Congiatu P. P., Filippo A. D., Molinaro P.** *Geographical Information Systems and Remote Sensing : a possible support in 2D modelling of flood propagation.* In: Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas, Milan, ITALY, 1994. ASCE. 29 June - 1 July 1994. p. 143-155
- Amilhastre J., Fargier H., Marquis P.** *Consistency restoration and explanations in dynamic CSPs - Application to configuration.* Artificial Intelligence, 2002, vol. 135, n° 1-2, p. 199-234
- Amoros C., Petts G.** MASSON. *Hydrosystèmes fluviaux.* Paris: Collection d'écologie 24, Masson, 1993. 300 p.
- Anastasiadou-Partheniou L., Samuels P. G.** *Automatic calibration of computational river models.* Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy, 1998, n° 130, p. 154-162
- Anderson M. G., Bates P. D.** *Hydrological Science : Model credibility and scientific integrity.* In: "Model Validation: Perspectives in Hydrological Sciences". ANDERSON M. G. , BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 2001. p. 1-10
- Anselmo V., Galeati G., Palmieri S., Rossi U., Todini E.** *Flood risk assessment using an integrated hydrological and hydraulic modelling approach: a case study.* Journal of Hydrology, 1996, vol. 175, n° 1-4, p. 533-554
- Aplin P., Atkinson P. M., Curran P. J.** *Fine spatial resolution satellite sensors for the next decade.* International Journal of Remote Sensing, 1997, vol. 18, n° 18, p. 3873-3881
- Aronica G., Bates P. D., Horritt M. S.** *Assessing the uncertainty in distributed model predictions using observed binary pattern information within GLUE.* Hydrological Processes, 2002, vol. 16, n° 10, p. 2001-2016
- Aronica G., Hankin B., Beven K.** *Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data.* Advances in Water Resources, 1998, vol. 22, n° 4, p. 349-365
- Axes F.** *Définition d'une méthodologie de classification avec intégration de données exogènes - Contribution à la cartographie de l'occupation du sol en Languedoc-Roussillon.* Mémoire de DEA, Université de PARIS VII, ENSG, 1991. 58 p.
- Bachelard S.** *Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles.* In: Actes du colloque "Elaboration et justification des Modèles : application en Biologie", Tome I, Paris, 1979. P. DELATTRE et M. THELLIER (ed), Maloine Editeur. p. 3-19
- Bachoc A., Belleudy P., Cornet J. M., Gautheron A., Gazull L., Montgaillard M., Mauclair X., Rouas G.** *Cartographie des zones inondables par simulation numérique. L'outil Ophyca.* Revue Internationale de Géomatique, 2002, vol. 12, n° 1, p. 77-92
- Badji M., Dautrebande S.** *Characterization of flood inundated areas and delineation of poor drainage soil using ERS-1 SAR imagery.* Hydrological processes, 1997, vol. 11, p. 1441-1450
- Baltsavias E. P.** *Airborne laser scanning: basic relations and formulas.* Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999a, vol. 54, n° 2-3, p. 199-214
- Baltsavias E. P.** *A comparison between photogrammetry and laser scanning.* Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999b, vol. 54, n° 2-3, p. 83-94
- Barros E.** *Estimation de paramètres dans les équations de Saint-Venant.* EDF, Biologie, sciences de la terre et protection de l'environnement - Collection de notes internes de la Direction des Etudes et Recherches, 1996. 214 p.
- Barton I. J., Bathols J. M.** *Monitoring floods with AVHRR.* Remote Sensing of Environment, 1989, vol. 30, n° 1, p. 89-94
- Bates P. D.** *Development and testing of a subgrid-scale model for moving- boundary hydrodynamic problems in shallow water.* Hydrological Processes, 2000, vol. 14, n° 11-12, p. 2073-2088
- Bates P. D., Anderson M. G.** *A preliminary investigation into the impact of initial conditions on flood inundation predictions using a time/space distributed sensitivity analysis.* CATENA, 1996, vol. 26, n° 1-2, p. 115-134
- Bates P. D., Anderson M. G.** *Validation of hydraulics models.* In: "Model Validation: Perspectives in Hydrological Sciences". ANDERSON M. G., BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 2001. p. 325-356
- Bates P. D., Anderson M. G., Horritt M.** *Terrain Information in Geomorphological Models : Stability, Resolution and Sensitivity.* In: "Landform Monitoring, Modelling and Analysis". LANE S., RICHARDS K., CHANDLER J. (Eds), John Wiley & Sons, 1998a. p. 279-309
- Bates P. D., Anderson M. G., Price D. A., Hardy R. J., Smith C. N.** *Analysis and development of hydraulic models for floodplain flows.* In: "Floodplain Processes". ANDERSON M. G., WALLING D. E., BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 1996. p. 215-254
- Bates P. D., De Roo A. P. J.** *A simple raster-based model for flood inundation simulation.* Journal of Hydrology, 2000, vol. 236, n° 1-2, p. 54-77
- Bates P. D., Horritt M., Hervouet J. M.** *Investigating two-dimensional, finite element predictions of floodplain inundation using fractal generated topography.* Hydrological Processes, 1998b, vol. 12, p. 1257-1277

- Bates P. D., Horritt M. S., Smith C. N., Mason D.** *Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling*. Hydrological processes, 1997, vol. 11, p. 1777-1795
- Bates P. D., Stewart M. D., Siggers G. B., Smith C. N., Hervouet J. M., R.H.J.Sellin.** *Internal and external validation of a two-dimensional finite element code for river flood simulations*. Proc. Instn. Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy, 1998c, p. 127-141
- Bates P. D., Wilson C. A. M. E., Hervouet J.-M., Stewart M. D.** *Two dimensional finite element modelling of floodplain flow*. Houille Blanche, 1999, vol. 54, n° 3-4, p. 82-88
- Bekkal A.** *Élaboration d'un prototype d'exploitation de photographies aériennes dans le cadre de la gestion du risque d'inondation*. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur topographe de l'IAVH II (Rabat) - Cemagref, 2003. 70 p.
- Benferhat S., Dubois D., Kaci S., Prade H.** *Possibilistic merging and distance-based fusion of propositional information*. Annals of Mathematics and Artificial Intelligence, 2002, vol. 34, n° 1-3, p. 217-252
- Bertoni J. C.** *Etude hydrologique et analyse des incertitudes sur trois bassins versants semi urbanisés de la région centrale d'Argentine*. Thèse de doctorat, Spécialité "Mécanique, génie mécanique, génie civil", Université Montpellier II, 2001. 305 p.
- Berz G.** *Flood disasters: lessons from the past - worries for the future*. Proc. Instn Civ. Engrs Water & Mar. Engng, 2000, vol. 142, p. 3-8
- Beven K.** *Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models*. Journal of Hydrology, 1989, vol. 105, n° 1-2, p. 157-172
- Beven K., Binley A.** *The future of distributed models : Model calibration and uncertainty prediction*. Hydrological Processes, 1992, n°6, p. 279-298
- Beven K., Freer J.** *Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology*. Journal of Hydrology, 2001, vol. 249, n° 1-4, p. 11-29
- Beven K., Musy A., Higy C.** *Tribune Libre : L'unicité de lieu, d'action et de temps*. Rev. Sci. Eau, 2001, vol. 14, n° 4, p. (sous presse)
- Biggin D. S., Blyth K.** *A comparison of ERS-1 satellite radar and aerial photography for river flood mapping*. Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management, 1996, vol. 10, n° 1, p. 59-64
- Birkett C. M.** *Contribution of the TOPEX NASA radar altimeter to the global monitoring of large rivers and wetlands*. Water Resources Research, 1998, vol. 34, n° 5, p. 1223-1239
- Birkett C. M.** *Synergistic remote sensing of Lake Chad: Variability of basin inundation*. Remote Sensing of Environment, 2000, vol. 72, n° 2, p. 218-236
- Blasco F., Bellan M. F., Chaudhury M. U.** *Estimating the extent of floods in Bangladesh using SPOT data*. Remote Sensing of Environment, 1992, vol. 39, n° 3, p. 167-178
- Bloch I.** *Incertitude, imprécision et additivité en fusion de données : point de vue historique*. Traitement du signal, 1996, vol. 13, n° 4, p. 267-288
- Blöschl G., Grayson R.** *Spatial observations and interpolation (chapt. 2)*. In: "Spatial patterns in catchment hydrology. Observations and modelling". GRAYSON R., BLÖSCHL G. (Eds), Cambridge University Press, 2000. p. 17-50
- Blöschl G., Sivapalan M.** *Scale issues in hydrological modelling: a review*. Hydrological Processes, 1995, vol. 9, p. 251-290
- Blyth K.** *FLOODNET: A telenetwork for acquisition, processing and dissemination of earth observation data for monitoring and emergency management of floods*. Hydrological Processes, 1997, vol. 11, n° 10, p. 1359-1375
- Blyth K., Nash G. P.** *Aerial infrared photography for flood plain investigations*. J. Inst. Water Eng. & Sci., 1980, vol. 34, p. 425-434
- Bonn F., Rochon G.** *Précis de télédétection. Volume1 : Principes et Méthodes*. Presses de l'université du Québec/AUPELF, 1993. 485 p.
- Bouchon-Meunier B.** *La logique floue*. Paris: PUF, Que sais-je ?, 1999. 126 p.
- Brakenridge G. R., Tracy B. T., Knox J. C.** *Orbital SAR remote sensing of a river flood wave*. International Journal of Remote Sensing, 1998, vol. 19, n° 7, p. 1439-1445
- Brivio P. A., Colombo R., Maggi M., Tomasoni R.** *Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas*. International Journal of Remote Sensing, 2002, vol. 23, n° 3, p. 429-441
- Brown R., Fletcher P.** *Satellite images and GIS : making it work*. Mapping Awareness, 1994, vol. 8, p. 20-22
- Brunet R., Ferras R., Théry H.** *Les mots de la Géographie*. Montpellier-Paris: Reclus - La documentation française (3<sup>ème</sup> édition), 1983. 518 p.
- Bryant R. B., Gilvear D. J.** *Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing : River Tay, Scotland*. Geomorphology, 1999, vol. 29, p. 307-321
- Burrough P. A., McDonnell R. A.** *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press, Collection "Spatial Information Systems and Geostatistics", 1998. 333 p.
- Caloz R., Puech C.** *Hydrologie et imagerie satellitaire*. In: "Précis de télédétection : vol.2 : applications thématiques". BONN F. (Eds), 1996. p. 161-195
- Campbell J. B.** *Introduction to remote sensing*. Londres: Taylor & Francis, 1996. 622 p.
- Carroll R. W. H., Warwick J. J., Heim K. J., Bonzongo J. C., Miller J. R., Lyons W. B.** *Simulation of mercury transport and fate in the Carson River, Nevada*. Ecological Modelling, 2000, vol. 125, n° 2-3, p. 255-278

- Cazemier D. R.** *Utilisation de l'information incertaine dérivée d'une base de données sol - Application à la cartographie des propriétés hydriques à l'échelle régionale.* Thèse de doctorat, Spécialité "Sciences du sol", ENSA Montpellier, 1999. 171 p. + annexes.
- CETMEF, Cete.** *Etude de sensibilité des modélisations 1D - Etape 1 : recensement et quantification des sources d'incertitude externes.* 2001. 67 p. + annexes.
- Champagnol F.** *Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale.* Montpellier: Dehan, 1984. 351 p.
- Charleux J.** *Qualité des Modèles Numériques de Terrain pour l'Hydrologie - Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants.* Thèse de doctorat, Spécialité "Sciences de l'Information Géographique", Université de Marne-la-Vallée, Cemagref-Engref Montpellier, 2001. 273 p. + annexes.
- Cobby D. M., Mason D. C., Davenport I. J.** *Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2001, vol. 56, n° 2, p. 121-138
- Colby J. D., Mulcahy K. A., Wang Y.** *Modeling flooding extent from Hurricane Floyd in the coastal plains of North Carolina.* Global Environmental Change Part B: Environmental Hazards, 2000, vol. 2, n° 4, p. 157-168
- Colin F., Raclot D., Puech C.** *Traitement d'image en mode parcellaire couplé à un système de règles de décision.* In: Journées Cassini 2001 "Géomatique et espace rural", Montpellier, France, 2001. 26-28 septembre. p. 203-217
- Collectif sur les CSP.** *Autour du problème de satisfaction de contraintes.* In: Actes des 5ièmes journées nationales du PRC-GDR Intelligence Artificielle, 1995. p. 159-178
- Congalton R. G.** *A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data.* Remote Sensing of Environment, 1991, vol. 37, n° 1, p. 35-46
- Connell R. J., Painter D. J., Beffa C.** *Two dimensional flood plain flow. II : Model validation.* Journal of hydrologic engineering, 2001, vol. 6, n° 5, p. 406-415
- Consuegra D., Di Giammarco P., JOERIN F., Todini E., Vitalini F.** *Combining a 2D flood plain model with GIS for flood delineation and damage assessment.* In: Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas, Milan, ITALY, 1994. ASCE. 29 June - 1 July 1994. p. 171-185
- Consuegra D., Vez E.** *Régionalisation et subsidiarité : un exemple d'approche hiérarchisée de la gestion des crues.* In: FRIEND - Third report (1994-1997), 1997. Cemagref Editions. 06/1997. p. 417-418
- Cooper M. A. R.** *Datums, coordinates and differences.* In: "Landform Monitoring, Modelling and Analysis". LANE S., RICHARDS K., CHANDLER J. (Eds), John Wiley & Sons, 1998. p. 21-35
- Crosetto M., Moreno Ruiz J. A., Crippa B.** *Uncertainty propagation in models driven by remotely sensed data.* Remote Sensing of Environment, 2001, vol. 76, n° 3, p. 373-385
- Dagorne A., Castex J.-M., Ottavi J.-Y.** *De l'analyse des inondations à la mise en route d'un plan de prévention des risques prévisibles (PPR) - Application à la commune de Mandelieu - La napoule, vallée de la Siagne (Alpes-Maritimes).* Comité Français de Cartographie, 1999, vol. 161, p. 48-61
- David B., Fasquel P.** *Qualité d'une base de données géographiques : concepts et terminologie.* Bulletin d'Information de l'IGN, 1997. 51 p.
- DDE34.** *Etude hydraulique sur les communes de Florensac - Bessan - Saint Thibéry. Définition des zones inondables.* Rapport d'étude BRL Ingénierie, 1998. 56 p.
- De Jonge T., Kok M., Hogeweg M.** *Modelling floods and damage assessment using GIS.* In: HydroGIS 96 : Application of Geographical Information Systems in Hydrology and Water Resources Management, Vienna, 1996. IAHS Publ. avril 1996. p. 299-306
- De Roo A., Van Der Knijff J., Horritt M., Schmuck G., De Jong S.** *Assessing flood damages of the 1997 Oder flood and the Meuse flood.* In: 2nd International Symposium on Operationalization of Remote Sensing, Enschede (Netherlands), 1999. 16-20 aout 1999.
- Decrop G.** *Les acteurs de la négociation du risque inondation.* Ingénieries EAT, 1995, vol. . Risques naturels, Numéro spécial 1995 "Inondation, du constat à la décision", p. 69-78
- Defant A.** *Physical Oceanography.* New York: Pergamon Press, 1961. 52 p.
- Delmeire S.** *Use of ERS-1 data for the extraction of flooded areas.* Hydrological Processes, 1997, vol. 11, n° 10, p. 1393-1396
- Desachy J., Roux L., Zahzah E.-H.** *Numeric and symbolic data fusion: a soft computing approach to remote sensing images analysis.* Pattern Recognition Letters, 1996, vol. 17, n° 13, p. 1361-1378
- Desbordes M.** *La gestion urbaine du risque d'inondation : problématique et enjeux.* La Houille Blanche, 1997, vol. 7, p. 20-24
- Desbos E.** *Qualification de la vulnérabilité du territoire face aux inondations.* DEA INSA de Lyon "Conception en bâtiments et techniques urbaines". Cemagref de Lyon, 1995. 44 p.
- Deutsch J.-C.** *La gestion des risques, questions et réponses.* La Houille Blanche, 1997, vol. 7, p. 25-28
- Di Giammarco P., Todini E.** *A control volume finite element method for the solution of 2-D overland flow problems.* In: Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas, Milan, ITALY, 1994. ASCE. 29 June - 1 July 1994. p. 82-101
- Didier M.** *Utilité et valeur de l'information géographique.* Ed. Economica, 1990. 255 p.
- Doridot M., Garry G.** *Application de la télédétection à l'évaluation du risque d'inondation.* Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, 1987, vol. . Risques Naturels, N° 150-151, p. 169-184

- Du Plessis L. A., Viljoen M. F.** *Determining the benefits of flood mitigation measures in the lower Orange River : a GIS application.* Water SA, 1999, vol. 25, n° 2, p. 205-213
- Dubois D., Prade H.** *Bayesian conditioning in possibility theory.* Fuzzy Sets and Systems, 1997a, vol. 92, n° 2, p. 223-240
- Dubois D., Prade H.** *A Synthetic View of Belief Revision With Uncertain Inputs in the Framework of Possibility Theory.* International Journal of Approximate Reasoning, 1997b, vol. 17, n° 2-3, p. 295-324
- Dubois D., Prade H.** *Fuzzy sets in approximate reasoning, Part 1: Inference with possibility distributions.* Fuzzy Sets and Systems, 1999, vol. 100, n° 1, p. 73-132
- Dubois D., Prade H.** *La problématique scientifique du traitement de l'information.* Information-Interaction-Intelligence, 2001, vol. 1, n° 2, p. 79-98
- EDF.** *Modèles hydrauliques fluviaux.* Direction des Études et Recherches, 1993. 61 p.
- Endreny T. A., Wood E. F., Lettenmaier D. P.** *Satellite-derived digital elevation model accuracy: Hydrogeomorphological analysis requirements.* Hydrological Processes, 2000a, vol. 14, n° 1, p. 1-20
- Endreny T. A., Wood E. F., Lettenmaier D. P.** *Satellite-derived digital elevation model accuracy: Hydrological modelling requirements.* Hydrological Processes, 2000b, vol. 14, n° 2, p. 177-194
- Engman E. T., Gurney R. J.** *Remote sensing in hydrology.* Londres: Chapman and Hall, Collection "Remote Sensing Applications", 1991. 239 p.
- Ervine D. A., MacLeod A. B.** *Modelling a river channel with distant floodbanks.* Proc. Instn Civ. Engrs Wat., Marit. & Energy, 1999, n° 136, p. 21-33
- Faivre R., Lardon S., Monestier P., Triboulet P.** *Formalisation MDQ de processus spatio-temporels.* Revue Internationale de Géomatique, 1999, vol. 9, n° 1, p. 103-121
- Falcidieno B., Spagnuolo M.** *A new method for the characterization of topographic surfaces.* International Journal of GIS, 1991, vol. 5, n° 4, p. 397-412
- Farissier P.** *Etude d'un modèle cartographique adapté à la simulation des écoulements en rivière.* Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1, 1992. 187 p.
- Fisher P.** *Improving modeling of elevation error with geostatistics.* GeoInformatica, 1998, vol. 2, n° 3, p. 215-233
- Flood M., Gutelius B.** *Commercial implications of topographic terrain mapping using scanning airborne laser radar.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1997, vol. 63, n° 4, p. 327-329+363-366
- François J.** *Fusion de connaissances expérimentales et expertes : une approche évolutive du diagnostic.* Thèse de doctorat de l'Université Technologique de Compiègne, Spécialité "Contrôle des Systèmes", Cemagref, 2000. 164 p.
- Franks S. W., Gineste P., Beven K. J., Merot P.** *On constraining the predictions of a distributed model: The incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process.* Water Resources Research, 1998, vol. 34, n° 4, p. 787-797
- Fraser C. S., Baltasvias E., Gruen A.** *Processing of Ikonos imagery for submetre 3D positioning and building extraction.* Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2002, vol. 56, n° 3, p. 177-194
- Freuder E. C., Wallace R. J.** *Partial constraint satisfaction.* Artificial Intelligence, 1992, vol. 58, n° 1-3, p. 21-70
- Fung K. B., Yatabe S. M., Pultz T. J., Fedosejevs G.** *Application of Remote Sensing to Environmental Monitoring : A Case Study of the 1996 Saguenay Flood in Québec.* In: Annual meeting of the Geological Association of Canada, Quebec, 1998. Mineralogical Assoc. of Canada. 14 p.
- Gärdenfors P.** *Knowledge in Flux: Modeling the Dynamics of Epistemic States.* Cambridge: Bradford Books. MIT Press, 1988. 262 p.
- Gärdenfors P.** *Belief revision and nonmonotonic logic: two sides of the same coin ?* In: Proceeding of the ninth european conference on artificial intelligence. ACAI'90, 1990. p. 768-773
- Gärdenfors P., Makinson D.** *Revisions of knowledge systems using epistemic entrenchment.* In: Proceedings of the Second Conference on Theoretical Aspects of Reasoning about Knowledge, edited by M. Vardi, Los Altos, CA, 1988. p. 83-95
- Garry G.** *Evolution et rôle de la cartographie dans la gestion des zones inondables en France.* Mappemonde, 1994a, vol. 4, p. 10-16
- Garry G., Grassin J.** *La prise en compte du risque d'inondation dans l'urbanisme et le droit des sols.* In: Crues et inondations. 23èmes journées de l'hydraulique, Nîmes (France), 1994b. Société hydrotechnique de France. 14-15-16 sept. 1994. p. 763-770
- Gendreau N., Longhini M., Combe P.-M.** *Gestion du risque d'inondation et méthode inondabilité : une perspective socio-économique.* Ingénieries EAT, 1998b, vol. Vol. 14, p. 3-14
- Gilard O.** *Connaître les inondations : l'exemple de la Bourbe (Isère).* Ingénieries EAT, 1995, vol. Risques naturels, n° Numéro spécial 1995. Inondation, du constat à la décision, p. 7-16
- Gilard O.** *Guide pratique de la méthode inondabilité.* Agences\_de\_l'Eau / MATE, Etudes inter-agences, 1998. 158 p.
- Gilvear D. J., Waters T. M., Milner A. M.** *Image Analysis of Aerial Photography to Quantify the Effect of Gold Placer Mining on Channel Morphology, Interior Alaska.* In: "Landform Monitoring, Modelling and Analysis". LANE S., RICHARDS K., CHANDLER J. (Eds), John Wiley & Sons, 1998. p. 195-216
- Gineste P.** *Contribution de l'imagerie satellitale radar ERS à la détection des zones saturées et à la modélisation hydrologique d'un petit versant agricole par TOPMODEL.* Thèse de doctorat de l'ENGREF - spécialité Sciences de l'eau, Montpellier, 1998. 224 p. + annexes.

- Girard M. C., Girard C. M.** *Traitement des données de télédétection*. Paris: Dunod, Collection Technique et Ingénierie - Environnement, 1999. 529 p.
- Givone P.** *Risques naturels et transcriptions cartographiques*. Ingénieries EAT, 1998, Numéro spécial "Risques Naturels", p. 87-96
- Gomes Pereira L. M., Wicherson R. J.** *Suitability of laser data for deriving geographical information; A case study in the context of management of fluvial zones*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, vol. 54, n° 2-3, p. 105-114
- Gonzales Alonzo F., Lopez Soria S.** *Using contextual information to improve land use classification of satellite images in central Spain*. International Journal of Remote Sensing, 1991, vol. 12, n° 11, p. 2227-2235
- Goodchild M. F.** *Data models and data quality : Problems and prospects*. In: "Environmental modeling with GIS". GOODCHILD M. F., PARKS B. O. , STEYAERT L. T. (Eds), New-York: Oxford University Press, 1993. p. 91-103
- Goodchild M. F., Jeansoulin R., (Eds).** *Data quality in geographic information : From error to uncertainty*. Paris: Editions Hermès, 1998. 192 p.
- Goodenough David G., Goldberg M., Plunkett G., Zelek J.** *EXPERT SYSTEM FOR REMOTE SENSING*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986, vol. GE-25, n° 3, p. 349-359
- Gourbesville P.** *Intérêt de l'approche spatiale dans la gestion des risques d'inondation : hydroinformatique et SIG*. In: Conférence Française des Utilisateurs ESRI 2000, Paris, 2000. ESRI France. 27-28 sept 2000. 8 p.
- Grayson R., Blöschl G.** *Spatial modelling of catchment dynamics (chapt. 3)*. In: "Spatial patterns in catchment hydrology. Observations and modelling". GRAYSON R. , BLÖSCHL G. (Eds), Cambridge University Press, 2000. p. 51-81
- Green I. R. A., Stephenson D.** *Criteria for comparison of single event models*. Hydrological Sciences Journal, 1986, vol. 31, n° 3, p. 395-409
- Guerif M., Gu Xing F., Guinot Jean P.** *Crop-system characterization by multitemporal SPOT data in the South-East of France*. International Journal of Remote Sensing, 1992, vol. 13, n° 10, p. 1843-1851
- Guilloux P.** *Application de la télédétection radar à la gestion des inondations en Camargue*. In: "ESPACE ET ENVIRONNEMENT : L'apport de l'outil spatial à l'observation et à la compréhension de l'environnement. Collection Enseignement et Espace", 1996. p. 347-363
- Gupta R. P., Banerji S.** *Monitoring of reservoir volume using Landsat data ( India)*. Journal of Hydrology, 1985, vol. 77, n° 1-4, p. 159-170
- Hardy R. J., Bates P. D., Anderson M. G.** *The importance of spatial resolution in hydraulic models for floodplain environments*. Journal of Hydrology, 1999, vol. 216, p. 124-136
- Hardy R. J., Bates P. D., Anderson M. G.** *Modelling suspended sediment deposition on a fluvial floodplain using a two-dimensional dynamic finite element model*. Journal of Hydrology, 2000, vol. 229, n° 3-4, p. 202-218
- Harvey F.** *Quality needs more than standards*. In: "Data quality in geographic information. From Error to uncertainty." GOODCHILD F. , JEANSOULIN R. (Eds), Paris: Hermès, 1996. p. 37-42
- Henderson F. M.** *Environmental-Factors and the Detection of Open Surface-Water Areas with X-Band Radar Imagery*. International Journal of Remote Sensing, 1995, vol. 16, n° 13, p. 2423-2437
- Hervouet J. M.** *A high resolution 2-D dam-break model using parallelization*. Hydrological Processes, 2000, vol. 14, n° 13, p. 2211-2230
- Hervouet J. M., Moulin C.** *Modèles mathématiques bidimensionnels aux éléments finis pour l'analyse des crues et des inondations*. In: Crues de la normale à l'extrême, Lyon (France), 1994. Société hydrotechnique de France. 10 et 11 mars 1999. p. 251-255
- Hervouet J. M., Van Haren L.** *Recent Advances in Numerical Methods for Fluid Flows*. In: "Floodplain Processes". ANDERSON M. G., WALLING D. E. , BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 1996. p. 183-214
- Hess L. L., Melack J. M., Filoso S., Wang Y.** *Delineation of Inundated Area and Vegetation Along the Amazon Floodplain with the Sir-C Synthetic-Aperture Radar*. Ieee Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, vol. 33, n° 4, p. 896-904
- Hess L. L., Melack J. M., Simonett D. S.** *Radar detection of flooding beneath the forest canopy : a review*. International Journal of Remote Sensing, 1990, vol. 11, n° 7, p. 1313-1325
- Higgitt D. L., Warburton J.** *Applications of differential GPS in upland fluvial geomorphology*. Geomorphology, 1999, vol. 29, n° 1-2, p. 121-134
- Hill D. R. C.** *Contribution à la modélisation de systèmes complexes. Application à la simulation d'écosystèmes*. HDR: CLERMONT-FERRAND, Université Blaise Pascal, 2000. 123 p.
- Hill J. M., Graham L. A., Henry R. J., Cotter D. M., Ding A., Young D.** *Wide-area topographic mapping and applications using airborne light and ranging (LIDAR) technology*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2000, vol. 66, n° 8, p. 908-914
- Hingray B.** *Comportement et modélisation hydraulique des zones bâties en situation d'inondation : le cas des zones cloisonnées d'habitat individuel de Ouagadougou.*: Thèse de doctorat de l'ISTEEM - spécialité Géosciences, Montpellier, université des "Sciences et Techniques du Languedoc", 1999. 316 p. + annexes.
- Horritt M. S.** *A statistical active contour model for SAR image segmentation*. Image and Vision Computing, 1999, vol. 17, n° 3-4, p. 213-224
- Horritt M. S.** *Calibration of a two-dimensional finite element flood flow model using satellite radar imagery*. Water Resources Research, 2000, vol. 36, n° 11, p. 3279-3291
- Horritt M. S., Bates P. D.** *Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow*. Journal of Hydrology, 2001a, vol. 253, n° 1-4, p. 239-249

- Horritt M. S., Bates P. D.** *Predicting floodplain inundation: Raster-based modelling versus the finite-element approach.* Hydrological Processes, 2001b, vol. 15, n° 5, p. 825-842
- Horritt M. S., Bates P. D.** *Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation.* Journal of Hydrology, 2002, vol. 268, n° 1-4, p. 87-99
- Horritt M. S., Mason D. C., Luckman A. J.** *Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model.* International Journal of Remote Sensing, 2001, vol. 22, n° 13, p. 2489-2507
- Hubert G., Ledoux B.** *Le coût du risque ... L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations.* Presse de l'école nationale des Ponts et Chaussées., 1999. 229 p.
- Hubert-Moy L., Ganzetti I., Bariou R., Mounier J.** *Une cartographie des zones inondables en Ille-et-Vilaine par télédétection.* Norois, Poitiers, 1992, vol. 39, n° 155, p. 337-347
- Huisig E. J., Pereira L. M. G.** *Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications.* Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, vol. 53, n° 5, p. 245-261
- Hydrologic Engineering Center.** *HEC-GeoRAS, An extension for support of HEC-RAS using ArcView, User's manual (version 3.0).* Davis CA: U.S. Army Corps of Engineers, 2000. 60 p. (Available: + annexes)
- Ibrahim M., Cracknell A. P.** *Bathymetry using Landsat MSS data of Penang Island in Malaysia.* International Journal of Remote Sensing, 1990, vol. 11, n° 4, p. 557-559
- Imhoff M. L., Vermillion C., Story M. H., Choudhury A. M., Gafoor A., Polcyn F.** *Monsoon flood boundary delineation and damage assessment using space born imaging radar and Landsat data.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1987, vol. 53, n° 4, p. 405-413
- Islam Khan N.** *The effects of urbanization on urban storm water runoff : A case study on greater Dahaka metropolitan city.* In: Operational Remote Sensing for Sustainable Development, Enschede, Netherlands, 1999. A.A. Balkema, Rotterdam. 1999. p. 285-294
- Jansen L. F. J., Molenaar M.** *Terrain objects, their dynamics and their monitoring by the integration of GIS and remote sensing.* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, vol. 33, n° 3, p. 749-758
- Jian-Kang W., Dou-Shen C., Wen-Tao W., Deng-Lin C.** *Model-based remotely-sensed imagery interpretation.* International Journal of Remote Sensing, 1988, vol. 9, n° 8, p. 1347-1356
- Kannen A.** *Use of SAR data for flood mapping and monitoring in Thuringia, Germany.* In: First ERS Thematic Working Group Meeting on FLOOD MONITORING, Frascati - Italy, 1995. ESRIN. 4 p.
- Kauark Leite L. A.** *Réflexions sur l'utilité des modèles mathématiques dans la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole.* Thèse: Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1990. 342 p.
- Kavvas M. L.** *On the coarse-graining of hydrologic processes with increasing scales.* Journal of Hydrology, 1999, vol. 217, n° 3-4, p. 191-202
- Kettig R. L., Landgrebe D. A.** *Classification of multispectral image data by extraction and classification of homogeneous objects.* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1976, vol. 14, n° 4, p. 19-26
- Kjelds J. T., Jorgensen G. H.** *Flood watch; GIS based management system for flood forecast applications.* In: ESRI User Conference, 1997. ESRI. 8-11 July 1997. p. 8 p.
- Knight D. W., Shiono W.** *River channel and floodplain hydraulics.* In: "Floodplain Processes". ANDERSON M. G., WALLING D. E., BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 1996. p. 139-181
- Koblinsky C. J., Clarke R. T., Brenner A. C., Frey H.** *Measurement of river level variations with satellite altimetry.* Water Resources Research, 1993, vol. 29, n° 6, p. 1839-1848
- Konieczny S.** *Sur la logique du changement : révision et fusion de bases de connaissances.* Thèse de doctorat - Spécialité Informatique, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2000. 205 p.
- Koriche F.** *Raisonnement approximatif dans les systèmes à base de connaissances coopératifs.* Thèse de doctorat, Spécialité "Informatique", Université Montpellier II, 1998. 122 p.
- Kraus K., Pfeifer N.** *Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1998, vol. 53, n° 4, p. 193-203
- Kraus R. A., Dodson Associates I.** *Flood plain determination using ArcView and HEC-RAS.* In: ESRI User Conference, 1999. ESRI. 26-30 July 1999. 8 p.
- Lagacherie P., Andrieux P., Bouzigues R.** *Fuzziness and uncertainty of soil boundaries: from reality to coding in GIS.* In: "Geographical objects with indeterminate boundaries". BURROUGH P. A., FRANK A. U. (Eds), London: GISDATAT Series II. Taylors Francis, 1996. p. 275-302
- Lalanne-Bertoudicq G.** *Aspects méthodologiques de la reconstitution des écoulements des grandes crues historiques.* In: Crues et inondations. 23èmes journées de l'hydraulique., Nîmes (France), 1994. Société hydrotechnique de France. 14-15-16 sept. 1994. p. 111-119
- Lambert R., Gazelle F., Gholamil M., Prunet C.** *La cartographie informative des zones inondables : l'exemple de Midi-Pyrénées.* In: Medi-Terra, Perpignan, 2000. Presses Universitaires de Perpignan. 26-28 juin 2000. p. 147-164
- Lane S. N.** *Hydraulic modelling in hydrology and geomorphology : A review of high resolution approaches.* Hydrological Processes, 1998, vol. 12, p. 1131-1150

- Lane S. N., Richards K. S.** *The "validation" of hydrodynamic models : somme critical perspectives.* In: "Model Validation: Perspectives in Hydrological Sciences". ANDERSON M. G. , BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 2001. p. 413-438
- Lang M., Coeur D., Lallement C., Naulet R.** *Valorisation de l'information historique pour la prédétermination du risque d'inondation : application au bassin du Guiers.* Ingénieries EAT, 1998, vol. 16, p. 3-13
- Largouët C.** *Aide à l'interprétation d'une séquence d'images par modélisation de l'évolution du système observé.* Thèse de doctorat, Université de Rennes I, 2000. 188 p.
- Laurini R., Milleret-Raffort F.** HERMÈS. *Les bases de données en géomatique.* Paris: Hermès, Série géomatique, 1993. 340 p.
- Ledoux B.** *Editorial.* Mapped Monde, 1994, n° Reclus n°4, p. 1
- Lin J. X.** *Integration of weighted knowledge bases.* Artificial Intelligence, 1996, vol. 83, n° 2, p. 363-378
- Lin J. X., Mendelzon A. O.** *Merging databases under constraints.* International Journal of Cooperative Information Systems, 1998, vol. 7, n° 1, p. 55-76
- Maidment D. R.** *GIS and hydrologic modeling - A assessment of progress.* In: Proceedings of the Third International Conférence on GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, New Mexico, 1996. NCGIA. 13 p.
- Marceau D. J., Gratton D. J., Fournier R. A., Fortin J.-P.** *Remote sensing and the measurement of geographical entities in a forested environment. 2. The optimal spatial resolution.* Remote Sensing of Environment, 1994, vol. 49, n° 2, p. 105-117
- Marinelli L., Michel R., Beaudoin A., Astier J.** *Flood mapping using ERS tandem coherence image : a case study in southern France.* In: 3rd ERS Symposium on Space at the service of our environment, Florence, ITALIE, 1997. 17-21 march 1997. p. 531-536
- Marks K., Bates P. D.** *Integration of high-resolution topographic data with floodplain flow models.* Hydrological Processes, 2000, vol. 14, p. 2109-2122
- MATE.** *Etude de faisabilité d'un observatoire des enjeux et de leur vulnérabilité aux inondations. Cahier des charges pour la consultation de bureaux d'études.* Document MATE/DPPR/SDPRM, 2001. 10 p.
- MATE/METL.** *Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles.* La documentation Française, 1997. 76 p.
- MATE/METL.** *Plans de Prévention des Risques naturels (PPR) - Risques d'inondation.* La documentation Française, 1999. 123 p.
- Maurel P., Tourment R., Halbecq W.** *Systèmes d'information et zones endiguées. Exemples aux niveau national, régional et local.* In: "Gestion spatiale des risques". BRUGNOT G. (Eds), Paris: Hermès, 2001. p. 227-248
- METL/CETMEF.** *Guide méthodologique RIVICAD.* La documentation Française, 1999. 24 p. + annexes
- METL/CETMEF/CETE.** *Etude de sensibilité des modélisation 1D. Etape 1 : Recensement et quantification des sources d'incertitude externes.* 2001. 67 p.
- METL/MATE.** *Cartographies des zones inondables : approche hydrogéomorphologique.* Paris: Edition Villes et Territoires, 1996. 100 p.
- Metzger R., Consuegra D.** *Evaluation des Modèles Numérique d'Altitude en zone de plaine - Implications pour la Cartographie des Inondations.* Lausanne: EPFL, 1998. 14 p. + annexes.
- Miller J. A.** *Living systems.* Behavioral science, 1965, vol. 10, n° n°3-4, p. 103-411
- Moller-Jensen L.** *Knowledge-based classification of an urban area using texture and context information in Landsat-TM imagery.* Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1990, vol. 56, n° 6, p. 899-904
- Morris C. S., Gill S. K.** *Variation of Great Lakes water levels derived from Geosat altimetry.* Water Resources Research, 1994, vol. 30, n° 4, p. 1009-1017
- Muraz J., Durrieu S., Labbé S., Andréassian V., Tangara M.** *Comment valoriser les photos aériennes dans les SIG ?* Ingénieries EAT, 1999, n° 20, p. 39-58
- Nash J. E., Sutcliffe J. V.** *River flow forecasting through conceptual models, part I : a discussion of principles.* Journal of Hydrology, 1970, vol. 10, n°3, p. 282-290
- National Research Council.** *Groundwaters models, scientific and regulatory applications.* Washington: National Academy Press, 1990. 303 p.
- Nicholas A. P., Walling D. E.** *Investigating spatial patterns of medium-term overbank sedimentation on floodplains: a combined numerical modelling and radiocaesium-based approach.* Geomorphology, 1997, vol. 19, n° 1-2, p. 133-150
- Nico G., Pappalepore M., Pasquariello G., Refice A., Samarelli S.** *Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods-a GIS application.* International Journal of Remote Sensing, 2000, vol. 21, n° 8, p. 1619-1631
- Noyelle J.** *The human vulnerability to the risks of flood. Report and information.* Urgences Médicales, 1995, vol. 14, n° 3, p. 110-117
- Nunes Correia F., Castro Rego F., da Graca Saraiva M., Ramos I.** *Coupling GIS with hydrologic and hydraulic flood modelling.* Water Resources Management, 1998, vol. 12, n° 3, p. 229-249
- Nunes Correia F., Da Graca Saraiva M., Nunes Da Silva F., Ramos I.** *Floodplain management in urban developing areas. Part II. GIS-based flood analysis and urban growth modelling.* Water Resources Management, 1999, vol. 13, n° 1, p. 23-37
- Oberstadler R., Honsch H., Huth D.** *Assessment of the mapping capabilities of ERS-1 SAR data for flood mapping: A case study in Germany.* Hydrological Processes, 1997, vol. 11, n° 10, p. 1415-1425
- Openshaw S.** *Developing appropriate spatial analysis methods for GIS.* In: "Geographical Information Systems: Principles and Application (vol. 1)". MAGUIRE D., GOODCHILD M. F. , RHIND D. (Eds), London: Longman, 1991. p. 389-402

- Oreskes N., Belitz K. *Philosophical issues in model assessment*. In: "Model Validation: Perspectives in Hydrological Sciences". ANDERSON M. G. , BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 2001. p. 23-41
- Pacaud L. *La gestion du risque d'inondation par les S.I.G. - Eléments de méthodologie appliqués au bassin cersant de la Sarre.*: Strasbourg, ENGEES - ULP Strasbourg - Service de la Navigation de Strasbourg, 1996. 101 p.
- Pantazis D. N., Donnay J. P. *La conception de SIG : méthode et formalisme*. Paris: Éditions Hermès, collection géomatique, 1996. 343 p.
- Paquier A. *Modélisation des écoulements en rivière en crue : pour une utilisation adaptée des équations de Saint Venant. Partie I : Synthèse des activités scientifiques*. HDR: Université Claude Bernard Lyon I, 2002. 42 p.
- Paquier A., Sigrist B. *Couplage de modèles 1D et 2D pour la gestion des inondations*. In: 27th congress of the International Association of Hydraulic Research, San Fransisco, 1997. ASCE. 10-15 août 1997. p. 639-644
- Payraudeau S. *Modélisation distribuée des flux d'azote sur des petits bassins versants méditerranéens*. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Spécialité "Sciences de l'eau", UMR3S Cemagref-Engref Montpellier, 2002. 436 p.
- Pearson D., Horritt M. S., Gurney R. J., Mason D. C. *The use of remote sensing to validate hydrological models*. In: "Model Validation: Perspectives in Hydrological Sciences". ANDERSON M. G. , BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 2001. p. 163-196
- Pedley M. I., Curran P. J. *Per-field classification : an example using SPOT HRV imagery*. International Journal of Remote Sensing, 1991, vol. 12, n° 11, p. 2181-2192
- Petit-Renaud S. *Application de la théorie des croyances et des systèmes flous à l'estimation fonctionnelle en présence d'informations incertaines ou imprécises*. Thèse de doctorat de l'Université Technologique de Compiègne, Laboratoire HeuDiaSyc - UMR CNRS 6599, 1999. 204 p.
- Piaton H., Puech C. *Apport de la télédétection pour l'évaluation des ressources en eau d'irrigation pour la mise en valeur des plans d'eau à caractère permanent ou semi-permanent au Niger*. Comité Interafricain d'Études Hydrauliques. Série Hydraulique Agricole. Rapport d'étude, 1992. 150 p. env.
- Pietroniro A., Prowse T. D. *Applications of remote sensing in hydrology*. Hydrological Processes, 2002, vol. 16, n° 8, p. 1537-1541
- Polidori L. *Cartographie radar*. Amsterdam (NLD): Gordon and Breach Science, OPA, 1997. 287 p.
- Pons M. *Annonces de crues, projet de modernisation du système de collecte et de transmission des données hydroclimatiques du bassin de l'Hérault*. Rapport d'études. DDE34, 1991. 58 p.
- Pornon H. *Les SIG : mise en oeuvre et applications*. Paris: Hermès, Collection "Traité des Nouvelles Technologies", 1995. 158 p.
- Pottier N. *L'utilisation des outils juridiques de prévention des risques d'inondation : évaluation des effets sur l'homme et l'occupation des sols dans les plaines alluviales (application à la Saône et à la Marne)*. Thèse de doctorat de Sciences et Techniques de l'Environnement, Paris, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées - Cereve, 1998. 436 p. + annexes.
- Priestnall G., Jaafar J., Duncan A. *Extracting urban features from LiDAR digital surface models*. Computers, Environment and Urban Systems, 2000, vol. 24, n° 2, p. 65-78
- Prunet C. *Géographie des zones inondables de la Dordogne Moyenne*. Thèse de doctorat de Géographie-Aménagement, Université de Toulouse, 1998. 369 p.
- Puech C. *Suivi des inondations en Afrique du Nord à l'aide de la télédétection satellitaire*. In: 9ème Conférence régionale afro-asiatique de la CIID, Alger, 1995. 7 p.
- Puech C. *Utilisation de la télédétection et des modèles numériques de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes*. HDR: GRENOBLE, INPG Grenoble, 2000. 83 p.
- Puech C., Ousmane A. *Gestion régionale de plans d'eau sahéliens par télédétection : courbes de fonctionnement, suivi annuel et reconstitution de chroniques hydrologiques*. In: Conférence internationale "Eau et développement durable : témoignages de la société civile", Paris. 19-20 mars 1998, 1998. p. 42-44
- Puech C., Raclot D. *Using geographical information systems and aerial photographs to determine water levels during floods*. Hydrological Processes, 2002, vol. 16, n° 8, p. 1593-1602
- Puech C., Raclot D., Wilson N. *Reasoning with uncertain constraints in the Flooding Problem*. REV!GIS Report Year 2 - R213 - Annex task 1.3, 2002. 17 p.
- Puech C., Vidal A. *Suivi des inondations au Maroc*. In: Colloque Cemagref-FAO, Use of Remote Sensing Techniques in Irrigation and Drainage, MONTPELLIER, 1995. 2-4 Novembre 1993. p. 151-154
- Pugh S. A., Congalton R. G. *Applying spatial autocorrelation analysis to evaluate error in new England forest-cover-type maps derived from Landsat Thematic Mapper data*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2001, vol. 67, n° 5, p. 613-620
- Puricelli A., Ubeda T., Laurini R., Servigne S. *Spatial database inconsistency checking and correcting*. In: "Data quality in Geographic Information : From Error to Uncertainty". GOODCHILD M. F. , JEANSOULIN R. (Eds), Paris: Editions Hermès, 1998. p. 111-119
- Raclot D., Maurel P., Puech C. *Apports de la télédétection à très haute résolution spatiale à l'étude du risque d'inondation*. In: Colloque SIRNAT (Systèmes D'information pour les Risques NATurels), Sophia Antipolis, 2001. 17 p.
- Raclot D., Puech C. *Photographies aériennes et inondation : globalisation d'informations floues par un système de contraintes pour définir les niveaux d'eau en zone inondée*. Revue Internationale de Géomatique, 1998, vol. 8, n° 1-2, p. 191-206
- Raclot D., Puech C. *What does AI contribute to hydrology? Aerial photos and flood levels*. Applied Artificial Intelligence, 2003, vol. 17, n° 1, p. 71-86

- Ramsey E. W., Nelson G. A., Laine S. C., Kirkman R. G., Topham W.** *Generation of coastal marsh topography with radar and ground-based measurements*. Journal of Coastal Research, 1997, vol. 13, n° 4, p. 1335-1342
- Rango A.** *Applications of remote sensing by satellite, radar and other methods to hydrology*. Genève: World Meteorological Organization, Collection WMO n° 804, Operational Hydrology Report n°39, 1994. 33 p.
- Revesz P. Z.** *On the semantics of arbitration*. International Journal of Algebra and Computation, 1997, vol. 7, n° 2, p. 133-160
- Richards K. S., Hughes F. M. R., El-Hames A. S., Harris P., Pautau G., Peiry J. L., Girel J.** *Integrated field, laboratory and numerical investigations of hydrological influences on the establishment of riparian tree species*. In: "Floodplain Processes". ANDERSON M. G., WALLING D. E., BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 1996. p. 399-440
- Rieu T.** *Modélisation de la nappe alluviale de l'Hérault*. Rapport d'études. Cemagref Antony HHAN, Service régional d'aménagement des eaux du Languedoc-Roussillon, 1985. 224 p.
- Robin M.** *Télé-détection des inondations : l'exemple du marais de Monts (Vendée - Ouest-France)*. Norois, Poitiers, 1992, vol. 39, n° 155, p. 317-335
- Robin M.** *La télé-détection*. Editions Nathan, 1995. 318 p.
- Robin N.** *Analyse du risque d'inondation à partir de données satellitaires SPOT - Application à la crue de la Seille de mars 1999*. Strasbourg, ENGEES - ULP Strasbourg - Cemagref, 2000. 97 p.
- Romanowicz R., Beven K. J., Tawn J.** *Bayesian Calibration of Flood Inundation Models*. In: "Floodplain Processes". ANDERSON M. G., WALLING D. E., BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 1996. p. 333-360
- Roux H., Raclot D., Dartus D., Puech C.** *Hydraulic parameter identification using satellite earth imagery*. In: EGS - AGU - EUG, Nice (France), 2003. 2 p. (Available: <http://www.cosis.net/abstracts/EAE03/01130/EAE03-J-01130.pdf>)
- S.I.E.E.** *Inventaire de digues de la basse vallée de l'Hérault - Usages, fonctions, gestions*. Rapport SIEE/STRATEGIS/Conseil général de l'Hérault, 1997. 81 p. + 10 planches + annexes
- Samuels P. G.** *Cross-section location in 1-D models*. International conference on river flood hydraulics. Wallingford, 1990, Published by Wiley, for Hydraulics Research Ltd, Editors White W.R., 1990, p. 339-350
- Sanders L., Gautier D., Mathian H.** *Concepts de système spatial et de dynamique, un essai de formalisation*. Revue Internationale de Géomatique, 1999, vol. 9, n° 1, p. 25-44
- Sanders R., Tabuchi S.** *Decision support system for flood risk analysis for the River Thames, United Kingdom*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2000, vol. 66, n° 10, p. 1185-1193
- Sanders R. A.** *Flood modelling using airborne synthetic aperture radar data*. In: ESRI User Conference, 1999. ESRI. 26-30 July 1999. 8 p.
- Sauvagnargnes-lesage S.** *De la prévention à la gestion de crise : l'utilisation des SIG*. In: "Gestion spatiale des risques". BRUGNOT G. (Eds), Paris: Hermès, 2001. p. 25-46
- Schiex T., Fargier H., Verfaillie G.** *Problèmes de satisfaction de contraintes valués*. Revue d'intelligence artificielle, 1997, vol. 11, n° 3, p. 339-373
- Schultz G. A.** *REMOTE SENSING IN HYDROLOGY*. Journal of Hydrology, 1988, vol. 100, n° 1-3, p. 239-265
- Secretan Y., Leclerc M., Duchesne S., Heniche M.** *A methodology to construct a numerical terrain model for two-dimensional hydrodynamic simulations*. Revue des Sciences de l'Eau, 2002, vol. 14, n° 2, p. 187-212
- Shafer G.** *A mathematical Theory of Evidence*. Princeton University Press. Princeton, N.J., 1976.
- Shankar Narayana G., Lakshmaiah N., Prakash Goud P.** *Hydrogeomorphological study based on remote sensing of Mulug Taluk, Warangal District, Andhra Pradesh, India*. Hydrological Sciences, 1996, vol. 41, n° 2, p. 137-151
- Sharma P. K., Chopra R., Verma V. K., Thomas A.** *Flood management using remote sensing technology: the Punjab (India) experience*. International Journal of Remote Sensing, 1996, vol. 17, n° 17, p. 3511-3521
- Sheng Y., Gong P., Xiao Q.** *Quantitative dynamic flood monitoring with NOAA AVHRR*. International Journal of Remote Sensing, 2001, vol. 22, n° 9, p. 1709-1724
- Singh A. K., Porey P. D., Raju K. G. R.** *Criterion for location of downstream control for dynamic flood routing*. Journal of Hydrology, 1997, vol. 196, n° 1-4, p. 66-75
- Smets P.** *The combination of evidence in the transferable belief model*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1990, vol. 12, n° 5, p. 447-458
- Smith L. C.** *Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge : a review*. Hydrological processes, 1997, vol. 11, p. 1442-1439
- Smith L. C., Isacks B. L., Forster R. R., Bloom A. L., Preuss I.** *Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS 1 synthetic aperture radar: first results*. Water Resources Research, 1995, vol. 31, n° 5, p. 1325-1329
- SOGREAH.** *Atlas des zones inondables de la Moselle et de la Meurthe. Vol. 2, étude hydrologique*. Rapport Ministère de l'Environnement, Navigation du Nord-Est, 2000. 28 p. + annexes.
- Sombe L.** *A Glance at Revision and Updating in Knowledge Bases*. International Journal of Intelligent Systems, 1994, vol. 9, n° 1, p. 1-27
- Stewart M. D., Bates P. D., Anderson M. G., Price D. A., Burt T. P.** *Modelling floods in hydrologically complex lowland river reaches*. Journal of hydrology, 1999, vol. 223, p. 85-106

- Tate E. C., Maidment D. R., Olivera F., Anderson D. J.** *Creating a terrain model for floodplain mapping*. Journal of Hydrologic Engineering, 2002, vol. 7, n° 2, p. 100-108
- Tate E. C., Olivera F., Maidment D. R.** *Floodplain Mapping Using HEC-RAS and ArcView GIS*. CRWR Online Report 99-1. Center for research in water resources. University of Texas, 1999. 215 p. (Available: <http://www.crwr.utexas.edu/reports/1999/rpt99-1.shtml>)
- Tchamen G. W., Kahawita R. A.** *Modelling wetting and drying effects over complex topography*. Hydrological Processes, 1998, vol. 12, n° 8, p. 1151-1182
- Tholey N., Clandillon S., DeFraipont P.** *The contribution of spaceborne SAR and optical data in monitoring flood events: Examples in northern and southern France*. Hydrological Processes, 1997, vol. 11, n° 10, p. 1409-1413
- Todini E., Di Giammarco P., Consuegra D., Joerin F., Vitalini F.** *Combining a 2-D flood plain model with GIS for flood delineation and damage assessment*. In: Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas, Milan, ITALY, 1994. ASCE. 29 June - 1 July 1994. p. 171-198
- Torterotot J.-P.** *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes*. Thèse de doctorat de Sciences et Techniques de l'Environnement, Paris, École Nationale des Ponts et Chaussées, 1993. 261 p. + annexes (1 vol.).
- Toutin T., Gray L.** *State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data*. Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, vol. 55, n° 1, p. 13-33
- Townsend P. A.** *Relationships between forest structure and the detection of flood inundation in forested wetlands using C-band SAR*. International Journal of Remote Sensing, 2002, vol. 23, n° 3, p. 443-460
- Townsend P. A., Walsh S. J.** *Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing*. Geomorphology, 1998, vol. 21, n° 3-4, p. 295-312
- Travé-Massuyès L., Dague P., Guerrin F.** *Le raisonnement qualitatif*. Paris: Edition Hermès, 1997. 505 p.
- Veregin H.** *Developing and testing of an error propagation model for GIS overlay operations*. International Journal of Geographical Information System, 1995, vol. 9, n° 6, p. 595-619
- Veregin H., Lanter D. P.** *Data-quality enhancement techniques in layer-based geographic information systems*. Computers, Environment and Urban Systems, 1995, vol. 19, n° 1, p. 23-36
- Vidal J. J., Watrin N., Lambert R., Gholami M., Prunet C.** *Cartographie informative des zones inondables en Midi-Pyrénées. Une démarche à l'échelle de la région*. In: SIRNAT, Grenoble, 2000. 28 septembre 2000. 15 p.
- Walling D. E., Hé Q., Nicolas A. P.** *Floodplain as suspended sediment sinks*. In: "Floodplain Processes". ANDERSON M. G., WALLING D. E., BATES P. D. (Eds), John Wiley & Sons, 1996. p. 399-440
- Wang Y., Koopmans B. N., Pohl C.** *The 1995 flood in the Netherlands monitored from space - a multi-sensor approach*. International Journal of Remote Sensing, 1995, vol. 16, n° 15, p. 2735-2739
- Wassenaar T.** *Reconnaissance des états de surface du sol en milieu viticole méditerranéen par télédétection à très haute résolution spatiale*. Thèse de doctorat, Spécialité "Sciences de la vie", École Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, 2001. 194 p. + annexes.
- Werner M. G. F.** *Impact of grid size in GIS based flood extent mapping using a 1D flow model*. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, 2001, vol. 26, n° 7-8, p. 517-522
- Whigham P. A., Young W. J.** *Modelling river and floodplain interactions for ecological response*. Mathematical and Computer Modelling, 2001, vol. 33, n° 6-7, p. 635-647
- Wilson C. A. M. E., Bates P. D., Hervouet J.-M.** *Comparison of turbulence models for stage-discharge rating curve prediction in reach-scale compound channel flows using two-dimensional finite element methods*. Journal of Hydrology, 2002, vol. 257, n° 1-4, p. 42-58
- Wilson N.** *A survey of numerical uncertainty formalisms, with reference to GIS applications*. REV!GIS Report Year 2 - Annex 21.1., 2002. 26 p.
- Würbel E.** *Révision de connaissances géographiques*. Thèse de doctorat - Spécialité Informatique, Université d'Aix-Marseille I, 2000. 151 p.
- Würbel E., Jeansoulin R., Papini O.** *Révision : an application in the framework of GIS*. In: KR2000, Principles of Knowledge Representation and Reasoning, Breckenridge, Colorado, USA, 2000. April 11-15, 2000. p. 505-515 (Available: <http://sis.univ-tln.fr/~wurbel/>)
- Würbel E., Jeansoulin R., Papini O.** *Spatial Information Revision : a Comparison between 3 Approaches*. In: ECQCARU2001, Sixth European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty, Toulouse, France, 2001. Sept. 2001. p. 505-515 (Available: <http://sis.univ-tln.fr/~wurbel/>)
- Zadeh L. A.** *Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility*. Fuzzy Sets and Systems, 1978, vol. 1, p. 3-28
- Zerger A.** *Examining GIS decision utility for natural hazard risk modelling*. Environmental Modelling & Software, 2002, vol. 17, n° 3, p. 287-294

# ANNEXES

**Annexe 1 : Incertitudes et imprécisions liées aux données externes des modèles hydrauliques**

**Annexe 2 : Exemple de fiche des plus hautes eaux connues**

**Annexe 3 : Sensibilité des modélisations hydrauliques finement distribuées**

**Annexe 4 : La photographie aérienne**

**Annexe 5 : Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)**

**Annexe 6: Principales théories de gestion de l'incertitude**

**Annexe 7: Relations et ordres**

**Annexe 8 : Caractéristiques du bassin versant de l'Hérault**

**Annexe 9: Validation des résultats de "l'approche-photo" sur la Moselle à partir de repères de crue**

**Annexe 10: Évaluation sur l'Hérault de la qualité de la topographie**

**Annexe 11 : Amorce d'analyses multi-temporelles**



# Annexe 1 : Incertitudes et imprécisions liées aux données externes des modèles hydrauliques

## DONNEES GEOMETRIQUES<sup>1</sup>

Types de données	nature des données	Nature de l'incertitude (origine)	Ecart le plus probable (ou précision)	Ecart possible (ou tolérance)	Ecart exceptionnel envisageable <sup>2</sup>	Commentaires
topographiques BD Topo	semis, CDN	Précision (spécifications IGN)	± 1 m (XY) + 1.5 m (Z)	± 2.7 m (XY) + 4 m (Z)	+ 10 m (XY, Z)	valeurs réglementaires
topogr./ photogrammétrie / aérotriangulation Cas Ec=1/8000*(prises de vue)	semis (couples)	Tolérance (arrêté du 21/01/80)	± 0.1 m (XY) ± 0.1 m (Z)	± 0.27 m (XY) ± 0.22 m (Z)	± 0.4 m (XY, Z)	valeurs réglementaires
topogr./ photogrammétrie / restitution Cas Fc=1/8000*(prises de vue)	semis, linéaires 3D	Tolérance (arrêté du 21/01/80)	± 0.15 m (XY) ± 0.15 m (Z)	± 0.40 m (XY) ± 0.45 m (Z)	± 0.8 m (XY, Z)	valeurs réglementaires
levés terrestres (levés en long, en travers, canevas de géomètres,...)	semis, linéaires 3D	Précision (arrêté du 21/01/80 et arbitraire)	+ 5 à 10 cm (XY) ± 20 cm (Z)	+ 10 à 20 cm (XY) ± 50 cm (Z)	+ 0.5 m (XY) ± 0.7 m (Z)	proche des valeurs réglementaires
levés terrestres / ouvrages en lit majeur	semis, linéaires 3D	Précision (arrêté du 21/01/80 et arbitraire)	+ 2 cm (XY, Z)	+ 1 à 5 cm (XY, Z)	+ 10 cm (XY, Z)	proche des valeurs réglementaires
bathymétrie / profils en travers ou semis	semis, linéaires 3D	Précision (arrêté du 21/01/80 et arbitraire)	+ 5 à 10 cm (XY) ± 20 cm (Z)	+ 10 à 20 cm (XY) ± 50 cm (Z)	+ 0.5 m (XY) ± 1 m (Z)	proche des valeurs réglementaires
bathymétrie : ouvrages en lit mineur	semis, linéaires 3D	Précision (arrêté du 21/01/80 et arbitraire)	+ 2 cm (XY, Z)	+ 1 à 5 cm (XY, Z)	+ 10 cm (XY, Z)	proche des valeurs réglementaires

## DONNEES HORS GEOMETRIE<sup>1</sup>

Types de données	Nature de l'incertitude (origine)	Ecart le plus probable (ou précision)	Ecart maximum possible	Ecart exceptionnel envisageable <sup>2</sup>	Commentaires
<b>Données hydrologiques</b>					
débits	Erreur relative (expériences a posteriori)	T<30/50 ans : 10 à 20% 30/50<T<100 ans : 30% T>100 ans : >100%	T<30/50 ans : 20% 30/50<T<100 ans : 40% T>100 ans : >100%	T<30/50 ans : 30 à 40% 30/50<T<100 ans : 50%	on peut disposer pour chaque débit d'un intervalle de confiance (incertitude due à la méthode statistique seule)
<b>Données hydrométriques</b>					
hauteurs d'eau	Erreur relative ou précision	capteurs : 5% échelle : 1 à 10 cm	capteurs : 10% échelle : 5 à 20 cm	capteurs : 30% échelle : 20 à 40 cm	Ecart exceptionnel du aux conditions hydrauliques
débits	Erreur relative	hors crues fortes: 5 à 10% crues fortes : 10 à 20%	hors crues fortes: 10% crues fortes : 20 à 30%	50%	Ecart exceptionnel du à l'extrapolation du tarage
<b>Paramètres de calage</b>					
coefficient de Strickler	Erreur relative	15 à 20%	20 à 30%		pas de limite / signification pour l'écart exceptionnel
pertes de charges singulières, lois d'ouvrages	Erreur relative	15 à 20%	20%		pas de limite / signification pour l'écart exceptionnel
laisses de crues	Précision en altimétrie	20 à 30 cm (crues récentes)	30 cm (crues récentes)	30 à 60 cm	

<sup>1</sup> Il s'agit de **valeurs interprétées** : il s'agit de valeurs issues d'enquêtes et de recueils d'expériences, et toujours en ordre de grandeur.

En *italiques* : valeurs non consensuelles.

<sup>2</sup> Il s'agit de **valeurs arbitraires** déterminées de manière subjective en tenant compte des contraintes physiques (site, type de mesure, variabilité du phénomène physique...) représentant une éventualité réelle maximum. Mais cela ne concerne pas les données manifestement erronées que l'on suppose exclues du jeu de données par le manipulateur avant livraison à l'hydraulicien (erreurs de mesures, perte de l'origine,...)

Source : [CETMEF et Cete, 2001]



## Annexe 2 : Exemple de fiche des plus hautes eaux connues

DIRECTION DEPARTEMENTALE DE L'EQUIPEMENT DE L'HERAULT - SERVICE HYDRAULIQUE

101  
2

## Fiche des Plus Hautes Eaux

## Reperes de Nivellement

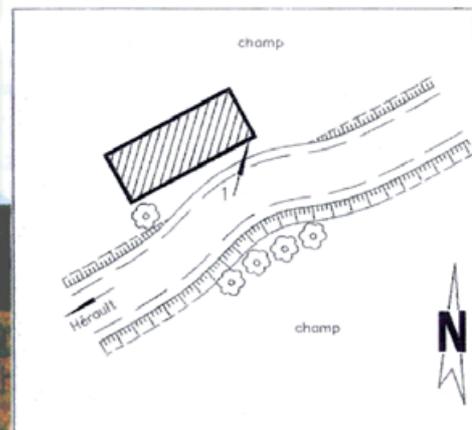
Numero	Nature	Support	Altitude N.G.F.	Hauteur /T.N.
1	spit	façade	10.80	1.30
2	seuil	cuisine	9.45	0

## Localisation de la P.H.E.

Commune : FLORENSAC  
 Adresse : bâtisse blanche  
 dans la plaine des Noyers  
 Cadastre :  
 Cours d'eau : Hérault  
 Echelle plans de référence 1/10000

Coordonnées LAMBERT : X : 689220  
 Y : 123030

Support : maison



## Resultats d'Enquete

Date Crue	Hauteur /repère	Numero	Altitude N.G.F.	Marque	Observations	Nom témoins	Date	Enqueteur
1969 ?	0.10	2	9.55		datation incertaine	SOGREAH	84	MP
1970	0.02	2	9.47		laisses de crues sûres	SOGREAH	"	"
1982	0	1	10.80	x	"spité" à la laisse visible	M. Villeneuve	86	"
?	0.99	2	10.44		laisses visibles	" " "	"	"
?	1.13	2	10.58		" " "	" " "	"	"
?	1.19	2	10.64		" " "	" " "	"	"
?	1.33	2	10.78		" " "	" " "	"	"
5-11-94	-0.08	1	10.72				94	HC
nov.95	-0.23	1	10.57				95	MA

Source : DDE 34



## Annexe 3 : Sensibilité des modélisations hydrauliques finement distribuées

L'objectif de cette annexe est de compléter l'Annexe 1, relative aux imperfections (incertitudes et imprécisions) liées aux données externes des modèles hydrauliques ; Il s'agit d'essayer de synthétiser les connaissances actuelles concernant l'influence de ces imperfections sur les résultats des modèles finement distribués. Cette problématique de sensibilité des modèles touche un sujet très délicat étant donné la multiplicité et l'interdépendance des différentes sources d'erreurs possibles. De plus la très forte dépendance au contexte physique ne facilite pas les généralisations :

*We have demonstrated that topographic specification, mesh resolution and calibration procedure would all vary depending on the particular model application attempted [Bates et al., 1998b].*

Ceci explique le peu de connaissance dans ce domaine et le caractère très réservé des conclusions. [Bates et al., 1998b] et [Marks et Bates, 2000] évoquent également le caractère inadéquat des techniques actuelles d'analyse de sensibilité, conçues essentiellement pour des modèles globaux et non des approches finement distribuées dans le temps et l'espace. Ces derniers manquent par ailleurs cruellement de données adéquates pour paramétrer, caler et surtout valider ces approches.

### A3\_1. Découpage spatial

En tant que support du calcul, il est en quelque sorte le représentant du niveau de simplification de la réalité (*i.e.*, des processus modélisés) et de la méthode numérique associée. Mais il est également le support d'implémentation de la topographie qui a très souvent été saisie sur une discrétisation différente de l'espace. Au final, un double filtrage de la topographie réelle, source de nombreuses dégradations, doit être mené (*cf.*, Fig. A3\_1).

Le découpage doit donc permettre une représentation simplifiée de la topographie qui soit en accord avec le niveau de représentation des processus modélisés. Ainsi, pour des objectifs dépassant la détermination d'un hydrogramme à l'aval, [Bates et al., 1998b] ont montré que l'influence de la résolution en bidimensionnel n'est plus négligeable devant l'influence des autres sources d'erreurs (*e.g.*, procédures d'estimation des paramètres). [Hardy et al., 1999] concluent même à sa prépondérance, affectant à la fois le débit, l'extension de l'inondation et de façon très brutale toutes les variables locales (*i.e.*, hauteurs et vitesses) !

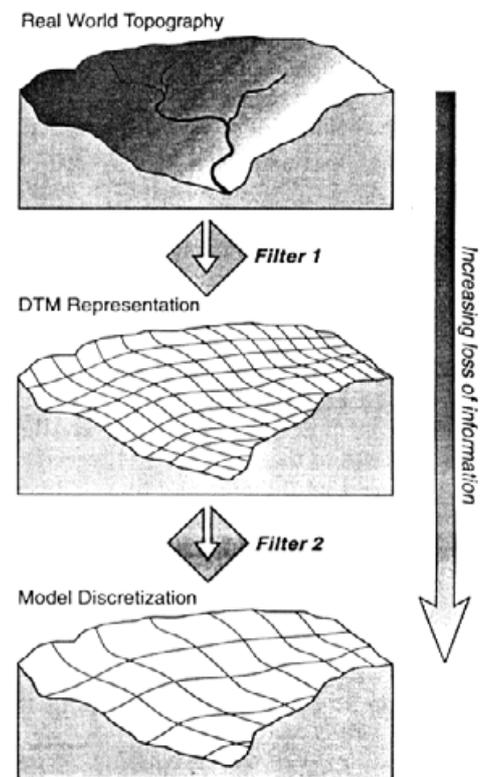


Fig. A3\_1 : les différents filtres agissant sur le monde réel [Bates et al., 1996]

En unidimensionnel, le problème se pose également, cette fois-ci en terme de densité et de positionnement des sections en travers [Samuels, 1990], sachant que la forme du terrain entre ces sections est interpolée sous l'hypothèse d'interpolation linéaire.

## A3\_2. Topographie

L'extrême sensibilité des résultats à la topographie dès que l'on rentre dans des schémas un peu complexes constitue un des résultats les plus marquants de cette revue bibliographique :

*It is obvious that, for instance, a change of a few decimeters in the evaluation of the height of an embankment can introduce large modifications of the flooded areas in a near flat region [Amighetti et al., 1994].*

L'importance du paramétrage topographique des structures présentes dans la plaine apparaît comme fondamentale. [Metzger et Consuegra, 1998] l'expriment clairement en disant que l'importance de l'altimétrie du fond des casiers (la notion de casier est vue ici comme la surface comprise entre les grandes structures morphologiques) est d'autant plus faible que la densité et la hauteur des obstacles est grande.

[Bates et al., 1998a] ont également montré la complexité du lien entre la réponse d'un modèle distribué et la qualité de l'implémentation de la topographie. Ils ont conclu à une sensibilité à la topographie des modèles hydrauliques 2D aux éléments finis hautement variable, à la fois dans le temps et dans l'espace. Ils ont en effet illustré le très large impact de changements très localisés de la topographie, réponse complexe résultant des interactions entre le local et le global (sujet déjà abordé au § 1.1.7).

Si bien que la qualité de la topographie forme un critère limitant de la modélisation [Connell et al., 2001], d'autant plus apparent que la modélisation cherche à représenter des phénomènes complexes :

*Two dimensional finite element models are, therefore, currently constrained by the lack of topographic data of a resolution and accuracy commensurate with their ability [Marks et Bates, 2000].*

L'intérêt suscité par les nouvelles techniques aériennes pour obtenir ce type de données est donc facilement compréhensible (cf., 2.2.1).

## A3\_3. Rugosité

Même si les coefficients représentant la rugosité (e.g., coefficients de Manning ou de Strickler) ont une analogie physique qui permet de délimiter l'espace des valeurs possibles [Hardy et al., 1999], il est impossible de leur donner une valeur *a priori* [Bates et Anderson, 1996]. En effet, comment mesurer cette rugosité sur le terrain ? et à quelle échelle sachant qu'il y a une relation évidente entre le niveau de description de la micro-topographie et la représentation intuitive que l'on se fait de la rugosité ?

*It should be noted, however, that friction and topography are not independent parameters and, furthermore, that this relationship is scale dependent, since the form drag associated with microtopography at subgrid scales forms part of the friction parameterization in a given model application [Bates et al., 1998b].*

De ce fait elle constitue le paramètre de calage par excellence, ce qui permet d'ailleurs de compenser d'éventuels autres défauts de la modélisation.

Son influence sur l'hydrogramme à l'aval du site étudié est maintenant bien connue : une augmentation des coefficients représentant la rugosité le retarde et l'atténue (cf., Fig. A3\_2).

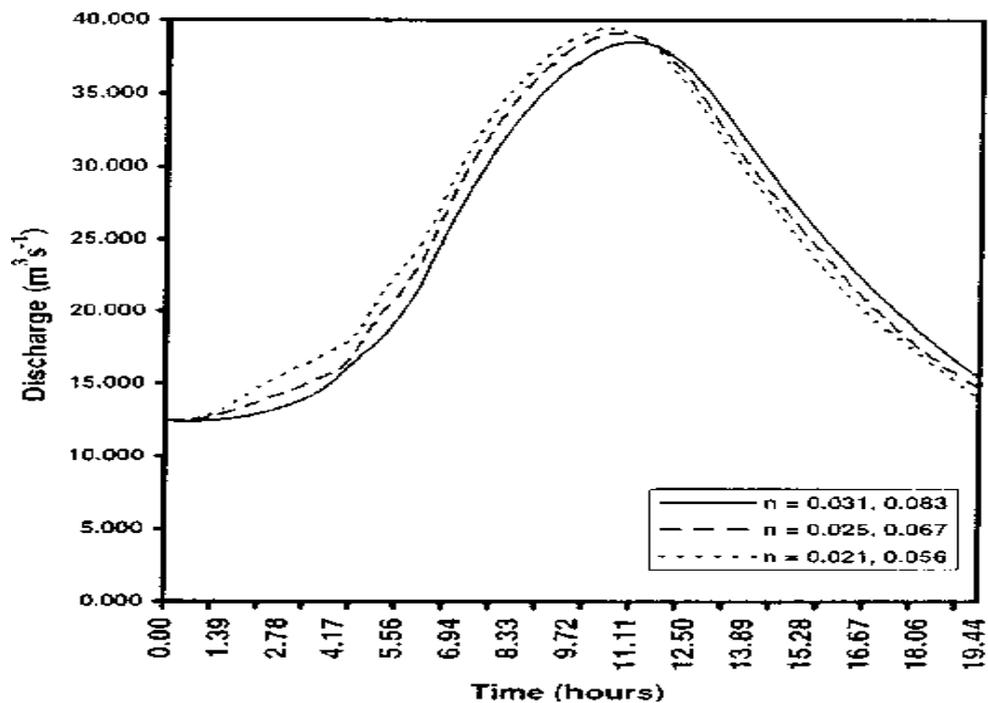


Fig. A3\_2 : influence des coefficients de rugosité sur l'hydrogramme aval (in [Bates et al., 1998b])

Cependant, [Bates et al., 1998b] ont montré dans cette même étude qu'un changement uniforme de la valeur des coefficients de rugosité engendre une réponse complexe du modèle sur les variables locales, c'est-à-dire une réponse très hétérogène de la hauteur d'eau et de la vitesse. Si la "paramétrisation" de la rugosité a un impact évident en terme de réponse du modèle, l'importance de ces impacts par rapport à ceux produits par les autres facteurs l'est beaucoup moins et semble dépendre fortement du cas d'étude et des équations utilisées. En effet, sur le même site d'étude et avec les mêmes données de calage et de validation mais avec un code de calcul différent, Horritt conclut tantôt que la rugosité du lit majeur apparaît comme le paramètre le plus sensible en terme de surface inondée, tantôt à sa faible sensibilité :

*Analysis shows that floodplain friction is the dominant factor affecting inundation extent when compared to channel friction, turbulence parameterization, and downstream boundary conditions [Horritt, 2000].*

*Initial simulations exhibited little sensitivity of the inundated area to floodplain friction [Horritt et Bates, 2001a].*

#### A3\_4. Coefficients des lois d'ouvrage

Très souvent, le modélisateur a recourt à des lois d'ouvrages de type orifice, déversoir, vanne... pour modéliser des ouvrages de franchissements tels que les ponts ou les digues. Ce passage par une équivalence introduit de nouveaux paramètres qui ne sont pas connus parfaitement (cf., Annexe 1). De ce fait ils viennent bien souvent accroître le nombre de paramètres à ajuster par calage. Leur impact au niveau des variables locales de sortie du modèle est mal maîtrisé du fait de manque de données adéquates.

### **A3\_5. Conditions aux limites et conditions initiales (hydrométrie)**

L'importance des conditions initiales d'une modélisation en régime transitoire est mal appréhendée et peu étudiée car le problème est en fait contourné en commençant les simulations avec des débits inférieurs ou égal au débit de plein bord. La contrepartie repose dans des temps de simulation qui peuvent être très longs.

Par contre les conditions aux limites (hydrométriques) ont une influence majeure dans la simulation numérique [METL/CETMEF/CETE, 2001]. Les données d'entrée sont le plus souvent un débit, en amont de la zone du cours d'eau étudié (un hydrogramme ou un limnigramme pour le régime non permanent), et une cote d'eau en aval (un limnigramme ou une courbe de tarage en régime non permanent) car cette combinaison fournit un problème bien défini selon la théorie des caractéristiques [Marks et Bates, 2000]. Hormis les ordres de grandeur des incertitudes présentes sur de telles données (*cf.*, Annexe 1), aucune conclusion nette n'existe à notre connaissance sur leur influence en condition réelle d'inondation de plaine. Seules quelques rares études sur des cas théoriques et simplifiés existent, comme par exemple la recherche de la distance d'influence d'une condition aval [Singh et al., 1997]. L'idée sous-jacente est d'étendre la zone modélisée de cette distance et de s'affranchir ainsi de son influence.

### **A3\_6. Méthodes numériques**

Dans ce domaine, les axes principaux de recherche résident dans le développement de schémas numériques stables pour :

1. améliorer le traitement de la turbulence (*e.g.*, [Wilson et al., 2002]) ;
2. limiter les instabilités créées par les éléments des frontières du champ d'inondation qui ont des hauteurs d'eau très faibles et fortement variables dans le temps (problème regroupé sous le vocable anglo-saxon de "wetting and drying process") (*e.g.*, [Tchamen et Kahawita, 1998; Bates, 2000]).

Même si des améliorations sont toujours possibles, les schémas de résolution numérique des équations de Saint-Venant (*e.g.*, éléments finis) ne semblent plus, dans leur état de développement actuel, être un facteur limitant comparé aux nombreuses autres sources d'erreurs [Lane, 1998].

### **A3\_7. Conclusion**

La revue bibliographique des études de sensibilité des modélisation hydrauliques finement distribuées a fait apparaître l'importance de l'influence de presque tous les facteurs passés en revue et surtout l'impossibilité de les départager, à l'exception peut-être des schémas de résolution qui semblent présenter un caractère moins limitant. La cause principale est l'interdépendance complexe de ces facteurs et le manque de données adéquates pour caler et valider des modèles en situation réelle.

## Annexe 4 : La photographie aérienne

L'appareil photographique constitue le capteur le plus ancien et le plus répandu en télédétection aérienne. Les campagnes systématiques de l'IGN (Institut Géographique National) et de l'IFN (Inventaire Forestier National) sur l'ensemble du territoire français en témoignent. Ces principaux avantages proviennent à la fois de sa forte répétitivité qui est uniquement liée à la disponibilité du vecteur et de sa prise d'information analogique (négatifs puis tirage papier) qui permet d'obtenir une résolution spatiale très fine.

### A4\_1. émulsions

L'émulsion, qui recouvre le film photographique, est la surface sensible à la lumière. Seule la taille de ces grains élémentaires (de 0,1 à 1  $\mu\text{m}$ ) limite la résolution spatiale. En fait, l'émulsion conditionne avant tout les résolutions spectrales et radiométriques. La plus courante et la moins chère est l'émulsion panchromatique (noir et blanc) qui couvre le spectre du visible entre 370 nm et 720 nm. L'émulsion couleur permet l'enregistrement du spectre visible sur trois couches correspondant à trois émulsions différentes situées sur le même support. L'émulsion infrarouge, qu'elle soit noir et blanc ou couleur, englobe le proche ultra-violet et le proche infrarouge. Elle est utilisée pour des missions spécifiques plutôt basées sur la reconnaissance de la végétation (missions de l'Inventaire Forestier National par exemple).

### A4\_2. Géométrie et oblicité

Suivant l'angle de visée, la photographie aérienne sera dite oblique ou verticale (*cf.*, Fig. A4\_1). Une première différence s'exprime en terme de protocole de prise de vue : la photographie oblique ne nécessite aucune contrainte particulière et permet des vols à basse altitude (sous les nuages) alors que la photographie verticale requiert une préparation particulière du plan de vol (*cf.*, Fig. A4\_2), un matériel spécial (*e.g.*, une chambre de prise de vue photogrammétrique) et des altitudes de vol souvent supérieures à mille mètres ne permettant pas de s'affranchir des conditions météorologiques.

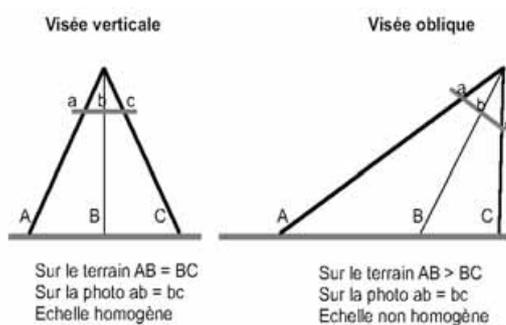


Fig. A4\_1 : typologie des photographies aériennes selon l'angle de visée [Muraz et al., 1999]

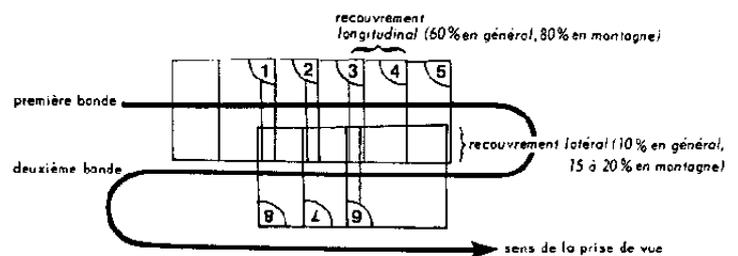


Fig. A4\_2 : plan de vol classique pour des photographies verticales

Dans le cas d'une prise de vue verticale et d'un terrain plat, l'échelle de la photographie est homogène et définie comme le rapport entre la focale et la hauteur de vol (*cf.*, Fig. A4\_3). Cette notion d'échelle perd son sens dès que la visée devient oblique. Par contre, si la prise de vue est verticale mais que la zone présente un certain relief (modéré par rapport à l'altitude de vol), l'échelle devient variable et seule une échelle moyenne peut être définie, comme le rapport entre la focale et la hauteur moyenne

de vol. En effet, la conicité de la prise de vue, spécificité de la photographie analogique, induit des distorsions géométriques dès que le terrain n'est pas parfaitement parallèle au plan photographique (cf., Fig. A4\_4), ce qui rend la photographie non superposable avec d'autres données (e.g., cartes topographiques).

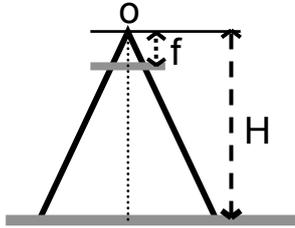


Fig. A4\_3 : échelle d'une photographie :  
 $e = f/H$

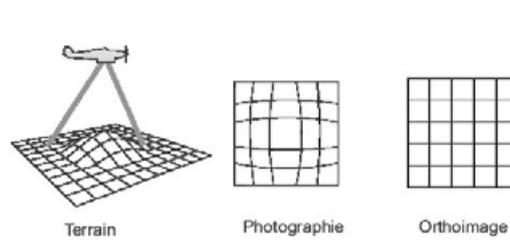


Fig. A4\_4 : déformations géométriques dues au relief [Muraz et al., 1999]

### A4\_3. De l'analogique au numérique

Ces images constituent une source d'images très haute résolution que l'on peut transcrire sous forme numérique par scannage. Les résolutions spatiales obtenues, seulement limitées par la taille du grain de l'émulsion, dépendent du pas de scannage. Avec les scanners et les émulsions actuels, il est possible d'obtenir des tailles de pixel de l'ordre de quelques décimètres au sol pour les campagnes classiques de photographies verticales. Ce format numérique, qui tend à se développer avec la prolifération des appareils photographiques numériques, est intéressant car il facilite l'exploitation de ces informations (cf., § A5\_5).

### A4\_4. Photogrammétrie

Les photographies verticales ont l'avantage d'offrir une vision stéréoscopique dans un environnement géométrique bien maîtrisé. Cela permet d'une part de restituer le relief et d'autre part d'orthorectifier ces images afin d'obtenir des images (appelées orthophotographies et orthophotoplan lorsqu'elles sont assemblées en mosaïque) parfaitement superposables aux autres informations spatiales. Cette opération complexe nécessite de corriger l'ensemble des distorsions géométriques induites par la non parfaite verticalité, le relief et les distorsions de la lentille. Les précisions théoriquement accessibles en planimétrie et en altimétrie sont recensées Tab. A4\_1.

Echelle des photographies verticales	altitude (m)	Longueur au sol pour 23 cm (m)	Longueur (mm) pour 10 m au sol	Surface d'une photographie (ha)	Surface visible en relief (ha)	Précision <sup>(1)</sup> (mm)		Nombre de couples pour 1000 ha
						planimétrie	altimétrie	
1 / 5 000	760	1 150	2	132	80	60	110	25
1 / 10 000	1 520	2 300	1	529	317	120	230	7
1 / 15 000	2 280	3 450	0,7	1 190	714	180	340	3
1 / 20 000	3 040	4 600	0,5	2 116	1 270	240	460	2
1 / 25 000	3 800	5 750	0,4	3 306	1 983	300	570	1
1 / 30 000	4 560	6 900	0,3	4 761	2 856	360	680	1

<sup>(1)</sup> Erreur moyenne quadratique des écarts.

Tab. A4\_1 : précisions théoriques des restitutions photogrammétriques pour une chambre métrique de 23\*23 cm (tiré de [Doridot et Garry, 1987])

## Annexe 5 : Les Systèmes d'Information Géographique (SIG)

L'objectif de ce paragraphe est de présenter très succinctement les principaux concepts des SIG considérés. Pour plus de précision, le lecteur pourra par exemple se référer à [Pornon, 1995; Pantazis et Donnay, 1996; Burrough et McDonnell, 1998].

### A5\_1. Définitions

Parmi les nombreuses définitions des SIG, les deux suivantes se complètent opportunément, la première insistant sur la structure et les fonctions d'un SIG, la seconde sur sa finalité :

1. "Système informatique de matériels, de logiciels et de processus conçus pour permettre la collecte, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation et l'affichage de données à référence spatiale afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion", *définition américaine émanant du Comité fédéral de coordination inter-agences pour la cartographie numérique (FICCDC) en 1998* ;
2. "Ensemble de données repérées dans l'espace, structurées de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision" [Didier, 1990].

La particularité de l'information géographique, souvent présentée à travers l'association d'une composante géographique (*i.e.*, localisation, forme,...) et d'une composante sémantique (*i.e.*, variables descriptives appelées attributs), se traduit à la fois dans l'organisation des données et dans les fonctionnalités logicielles mises en œuvre.

### A5\_2. Bref historique

Historiquement, les S.I.G. sont apparus en aval de l'information de la production cartographique, qui a commencé vers la fin des années 60. Cette informatisation a donné lieu à l'avènement de la *géomatique* définie comme l'ensemble des techniques de traitement informatique des données géographiques (JO du 14/02/94) et dont le but premier était l'automatisation de la cartographie. Ensuite, l'accroissement de la puissance informatique a permis de confier aux logiciels de cartographie automatique le soin de gérer et de mettre à jour les informations numérisées, et celui de les exploiter dans des traitements de plus en plus complexes grâce aux fonctions d'analyse spatiale, les manipulations s'effectuant sur des volumes de données de plus en plus importants [Pornon, 1995].

Parallèlement les progrès en terme de capture d'informations localisées dans l'espace ont abouti à l'explosion des bases de données environnementales au format numérique, contribuant également à l'essor des SIG.

### A5\_3. Modules et fonctionnalités

Il est habituel de distinguer quatre modules ou groupes de fonctionnalités dans un SIG (*cf.*, Fig. A5\_1) : l'*acquisition* des données qui comprend la saisie des données spatiales et attributaires, leur codage et prétraitement géométrique ainsi qu'une vérification des erreurs ; la *gestion* pour le stockage, véritable système d'archivage ; la *manipulation et l'analyse* des données grâce à un système d'interrogation, d'édition des données, de fonctionnalités d'analyse spatiale ; et enfin la *restitution* des

données dans un objectif de communication par la production de cartes mais aussi de tables statistiques, de graphiques...

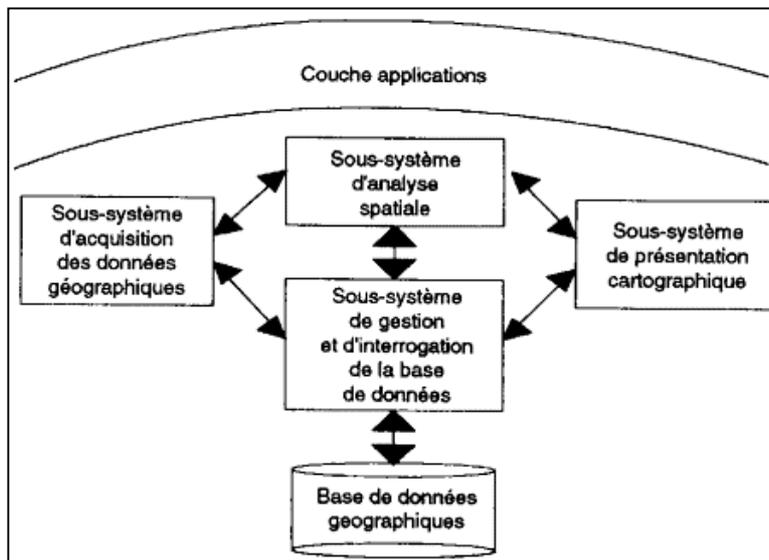


Fig. A5\_1 : modules d'un SIG [Laurini et Milleret-Raffort, 1993]

La structuration générale de l'information s'effectue presque toujours sous la forme de couches d'informations thématiques dont tout ou partie est mobilisé en vue d'une application. Chaque objet d'intérêt est représenté numériquement par sa composante attributaire, encore appelée sémantique, qui est structurée au sein d'un système de base de données classiques (très souvent via un modèle relationnel ou orienté objet) et par sa composante géographique qui est stockée dans un modèle géométrique soit *raster*, soit *vecteur*. Le mode *raster* (ou image) correspond à un quadrillage régulier de l'espace en cellules élémentaires : les pixels (PICTure ELement). Le mode *vecteur* est une représentation des objets dans un espace continu par des points, des lignes et des surfaces. Les avantages et inconvénients de ces deux modes sont exposés Tab. A5\_1.

	Vecteur	Raster
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- bonne représentation de la structure des données</li> <li>- structure compacte</li> <li>- topologie explicite permettant une bonne analyse en réseau</li> <li>- projection géographique et translation aisée</li> <li>- qualité de représentation aux différentes échelles</li> <li>- l'extraction, la mise-à-jour et la généralisation des données sont possibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- structure simple de données</li> <li>- accès aux attributs simplifiés</li> <li>- facilité d'analyse spatiale (filtre)</li> <li>- modélisation simplifiée du fait de la forme régulière des cellules</li> <li>- technologie bon marché</li> <li>- supports idéaux pour de nombreux types de données</li> </ul>
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> <li>- structures complexes de données</li> <li>- intersection nécessitant puissance de calcul</li> <li>- visualisation et impression nécessitant important temps d'affichage</li> <li>- contenu homogène de chaque polygone rendant l'analyse spatiale impossible</li> <li>- simulation difficile car chaque polygone a une forme propre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- volume des données</li> <li>- perte d'information due au choix des cellules</li> <li>- moindre qualité esthétique</li> <li>- projections géographiques nécessitant algorithmes adaptés pour éviter distorsion de la grille</li> </ul>

Tab. A5\_1 : avantages et inconvénients du mode raster et du mode vecteur (adaptation de [Burrough et McDonnell, 1998] par [Payraudeau, 2002])

Il apparaît que les points faibles des SIG raster sont les points forts des SIG vecteur et inversement. C'est un indice d'une certaine complémentarité entre les deux types de SIG et le couplage des deux modes permet souvent d'optimiser l'utilisation des SIG. Comme pour toute information non discrète, la représentation numérique du relief appelée couramment Modèle Numérique de Terrain ou MNT (représentation de l'altitude et de ses plans dérivés), pose le problème de l'interpolation. Bien que le format image soit largement utilisé, un autre format appelé TIN (Triangular Irregular Network) basé sur une triangulation de Delaunay (*cf.*, Figure 1-7) est parfois proposé. Capable de représenter de manière efficace en terme de quantité d'information stockée l'altitude mais aussi la pente lors de variations brutales du relief [Falcidieno et Spagnuolo, 1991], ce format d'interpolation est très utilisé en hydrologie/hydraulique (*e.g.*, [Todini et al., 1994]).

#### **A5\_4. Intérêts**

Un des premiers intérêts des SIG provient des facilités qu'ils offrent pour mettre à jour et mettre en relation plusieurs sources de données localisées d'origine et d'échelle différentes pour un même objectif thématique. Ces facilités proviennent de ces capacités d'analyse spatiale (*e.g.*, requête géométrique ou topologique) pouvant agir au sein d'une même couche d'informations mais aussi entre plusieurs d'entre elles. Elles ne résolvent cependant pas les éventuels conflits entre données dont la résolution touche aux problématiques de fusion, de mise en cohérence.

Un second intérêt réside dans le système d'archivage centralisé et structuré des données au sein d'un même système cartographique. Bien que demandant un travail laborieux, ceci est souvent une avancée majeure par rapport aux systèmes traditionnels d'archivage de supports analogiques. Cela permet notamment de faciliter la traçabilité de l'information brute jusqu'à l'information élaborée.

Un troisième intérêt du SIG est de dépasser le support traditionnel de l'information géographique, c'est-à-dire la carte papier qui, une fois éditée et publiée, reste un document figé. Le numérique permet en effet de réaliser des "cartes d'un jour", documents devant être réalisés rapidement et à moindre coût avec des informations parfaitement à jour, pour répondre à un objectif de communication précis [Pacaud, 1996].

#### **A5\_5. Synergie avec la télédétection**

La télédétection apparaît comme une source, parmi d'autres, de données géographiques venant alimenter les SIG. Cependant ses particularités (énoncées § 2.1.2) en font la donnée privilégiée pour des fonds de plan continu, des référentiels cartographiques, pour améliorer les restitutions ou encore pour mettre à jour des bases de données existantes. En contrepartie, le SIG facilite et améliore l'interprétation des images par ses capacités de mise en relation des images entre elles (approche multi-temporelle) ou avec des données exogènes. L'intégration de modules de traitement d'images dans les SIG va dans ce sens.



## Annexe 6 : Principales théories de gestion de l'incertitude

### A6\_1. Les probabilités classiques

Pendant très longtemps, la représentation des imperfections s'est faite au travers d'une approche probabiliste initiée par Pascal et Fermat au XVII<sup>ème</sup> siècle [Bouchon-Meunier, 1999]. Cette approche statistique classique est la plus commune et la plus utilisée aujourd'hui, si bien que la norme ISO 5168 recourt de façon explicite à la notion de distribution de probabilités pour définir erreurs et incertitudes pour des grandeurs quantitatives (*cf.*, Fig. A6\_1).

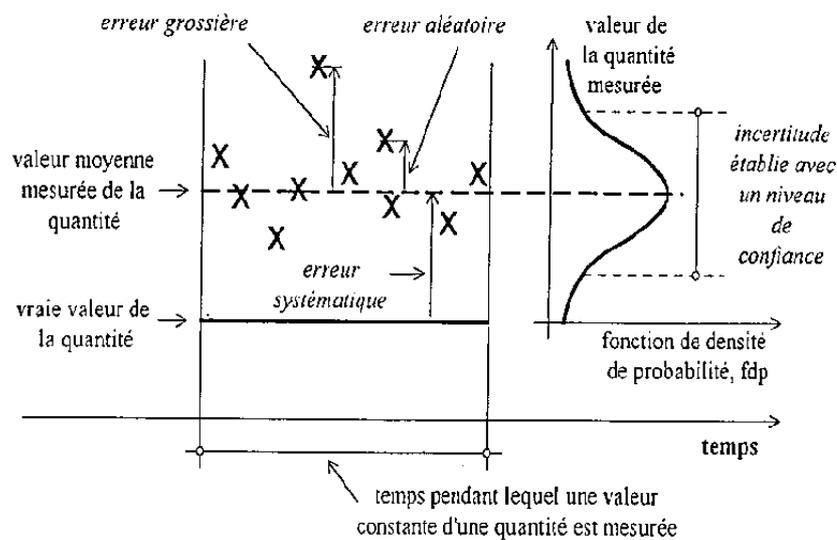


Fig. A6\_1 : définition des erreurs selon la norme ISO 5168 (in [Bertoni, 2001])

*Cependant celle-ci [la notion de probabilité] ne permet pas de traiter des croyances subjectives<sup>27</sup> comme on a longtemps pensé qu'elle pouvait le faire, ni de résoudre le problème posé par les connaissances imprécises ou vagues [Bouchon-Meunier, 1999].*

La théorie des probabilités "fréquentistes"<sup>28</sup> est en fait un outil idéal pour la formalisation de l'incertitude dans les cas où la connaissance est basée sur la distribution de fréquences mesurées (incertitude liée à un phénomène observé aléatoire, ou supposé aléatoire) [Cazemier, 1999]. Dès lors les degrés d'incertitude sont connus, objectifs et peuvent être représentés par une fonction unique. Ainsi un dé non pipé se verra affecté, sur chacune de ces faces, un degré d'incertitude égale à 1/6, valeur pouvant être retrouvée en réalisant un grand nombre de lancers. En cas de dé pipé, l'expérimentation peut donner des résultats fort différents pour ces degrés de certitude. Par contre elle ne permet pas de coder l'ignorance : quels degrés d'incertitudes affecter si l'on ne peut pas procéder à l'expérimentation et que l'on ne sait pas si le dé est pipé ou non ?

<sup>27</sup> La croyance subjective intervient lorsqu'il est impossible d'établir une fonction de croyance (*e.g.*, loi de probabilité) de manière a priori ou empirique. Il faut alors s'en remettre à une évaluation personnelle et donc subjective.

<sup>28</sup> Ou fréquentiste ; approche classique qui considère la probabilité comme la limite d'occurrence, ce qui exclu l'approche bayésienne.

Cette impossibilité de coder l'ignorance est une conséquence des axiomes forts de Kolmodorov et principalement du concept de l'additivité qui exprime le fait que la somme des probabilités d'une hypothèse et de son complémentaire (*i.e.*, son contraire) vaut l'unité. Ainsi,

*Il n'y a pas de place pour l'incertitude sur la valeur de la probabilité réelle de l'événement [François, 2000].*

## A6\_2. L'approche bayésienne

L'approche bayésienne se distingue avant tout de l'approche fréquentiste par son interprétation de la mesure de confiance. Pour elle, la mesure de confiance est un état de connaissance sans lien direct avec une fréquence d'occurrence réelle : on parle alors de probabilité subjective. Contrairement à la probabilité classique (*i.e.*, objective), la probabilité subjective n'est pas propre à l'événement mais conditionnelle, c'est-à-dire qu'elle évolue avec la connaissance [Bloch, 1996]. L'intérêt de l'approche provient de sa règle de combinaison (*cf.*, règle de Bayes, **Eq. A6\_1**) qui permet de modifier aisément ces probabilités a priori (correspondant aux espérances initiales) avec l'adjonction de nouvelles connaissances.

$P(A/B) = \frac{P(B/A) * P(A)}{P(B)}$	<b>Eq. A6_1</b>
---------------------------------------	-----------------

Cependant, tout comme la théorie classique des probabilités, la mesure de confiance est une probabilité qui respecte le concept d'additivité. La définition de ces probabilités subjectives de manière *a priori* soulève cependant des critiques, puisqu'en cas d'ignorance totale il est nécessaire de faire des hypothèses et donc d'introduire une part d'arbitraire (équiprobabilité en général).

*Supposer l'égalité des chances ne revient pas à exprimer l'ignorance [Cazemier, 1999].*

La représentation de la mesure de confiance par une unique fonction de probabilité apparaît donc très restrictive.

## A6\_3. L'approche par probabilités imprécises

La principale extension des probabilités (et de l'approche bayésienne) est de gérer la mesure de confiance, non pas avec une unique fonction de probabilité, mais avec une famille de fonctions de probabilité (supposées convexes) dont seules les enveloppes inférieure et supérieure sont réellement exploitées. Ainsi une proposition se voit affecter un encadrement de probabilités : on parle alors de probabilité basse et de probabilité haute. Le terme de probabilité imprécise est également utilisé, en référence à la théorie des possibilités, l'enveloppe supérieure étant alors parfois interprétée comme une valeur de possibilité :

*The upper approximation agrees with the idea that something should be first possible before being probable ([Zadeh, 1978] in [Dubois et Prade, 1997a]).*

D'un point de vue encore plus général, les fonctions de crédibilité et de plausibilité de Dempster-Shafer (*cf.*, § A6\_5) peuvent être considérées mathématiquement comme des expressions de ces enveloppes supérieure et inférieure [Dubois et Prade, 1997a].

## A6\_4. La théorie des possibilités

La théorie des possibilités introduite par L.A. Zadeh en 1978 à partir de sa théorie des ensembles flous offre un cadre formel unique pour traiter l'imprécision et l'incertitude de façon non probabiliste. La mesure de confiance est approchée par deux mesures duales : la possibilité  $\Pi$  et la nécessité  $N$ . La possibilité correspond à l'idée d'absence de surprise, alors que la nécessité correspond à l'idée de certitude, d'impossibilité de l'événement contraire [Cazemier, 1999]. Ces mesures sont non additives, et la possibilité d'une situation n'a aucun lien avec la possibilité de son contraire (ni avec celles des autres situations).

$\Pi(A) = 1 - N(\bar{A})$	<i>Eq. A6_2</i>
---------------------------	-----------------

Ainsi, par exemple, chaque face d'un dé peut avoir une possibilité (normalisée) de sortir égale à 1. En cela, la valeur numérique n'a pas vraiment de sens en soi, seule l'ordonnancement des propositions est informative. Ces mesures reflètent donc une idée de préférence : une information est plus possible (ou plausible) qu'une autre. Un grand choix d'opérateurs de mise à jour des connaissances est disponible (*e.g.*, conjonctif, disjonctif, adaptatif). Le conditionnement possibiliste s'écrit en effet

$\Pi(A \cap B) = \Pi(A/B) \otimes \Pi(B)$	<i>Eq. A6_3</i>
$N(A/B) = 1 - \Pi(\bar{A}/B)$	<i>Eq. A6_4</i>

*où l'opérateur  $\otimes$  est souvent transcrit par l'opérateur minimum dans une évaluation qualitative, et par l'opérateur produit dans une évaluation quantitative.*

## A6\_5. La théorie de Dempster-Shafer

Issue de la théorie des croyances [Shafer, 1976], la théorie de Dempster-Shafer, encore appelée théorie de l'évidence, constitue un cadre unifié qui peut être considéré comme un ancêtre commun de la théorie des probabilités et de la théorie des possibilités [Bouchon-Meunier, 1999]. Les raisonnements sont effectués à partir de deux mesures duales : la crédibilité  $Cr$  et la plausibilité  $Pls$ , la crédibilité étant représentée par une fonction de croyance qui permet de modéliser et de quantifier la crédibilité attribuée à des faits. Sur un ensemble  $X$  fini de propositions, cela revient à répartir une masse globale de croyance égale à 1 entre tous les événements possibles [Bouchon-Meunier, 1999]. Tout comme dans la théorie des possibilités la mesure d'un événement n'a pas de relation avec la mesure de son contraire : *e.g.*, il n'existe pas de relation directe entre  $Pls(A)$  et  $Pls(\bar{A})$ . La dualité entre crédibilité et plausibilité s'exprime de la façon suivante (*cf.*, **Eq. A6\_5**) :

$Pls(A) = 1 - Cr(\bar{A})$	<i>Eq. A6_5</i>
----------------------------	-----------------

*L'intervalle  $[Cr(A); Pls(A)]$  encadre la probabilité mal connue  $P(A)$ , quelle que soit la partie  $A$  de  $X$  [Bouchon-Meunier, 1999].*

Il est alors possible de modéliser l'ignorance totale : pour le lancé d'un dé par exemple, la masse unité est alors affectée à l'union des hypothèses (face 1, ..., face 6). Seule l'information apportée ("je sais que...") est modélisée, et c'est l'apport de nouvelles informations qui permet de réduire ou de redistribuer les masses sur les hypothèses envisageables [François, 2000]. La combinaison des jeux de masse (permettant la révision) est permise par une règle de combinaison (*i.e.*, règle orthogonale de Dempster) justifiée entre autre par les travaux de Smets sur le modèle de croyances transférables ([Smets, 1990] in [Bloch, 1996]). La règle de conditionnement, à la base de celle de combinaison peut s'écrire, dans le cas d'un monde fermé [François, 2000] :

$Cr(A/B) = \frac{Cr(A \cup \bar{B}) - Cr(\bar{B})}{1 - Cr(\bar{B})}$	Eq. A6_6
$Pls(A/B) = \frac{Pls(A \cap B)}{Pls(B)}$	Eq. A6_7

L'intérêt d'un tel modèle provient du fait qu'il dissocie fondamentalement la représentation de la connaissance de la phase de décision basée sur ces connaissances. Cependant, au moment où une décision est requise, il convient de faire un pari sur l'hypothèse la plus probable (niveau dit "pignistique") ce qui revient à affecter une probabilité (normée et additive) à chaque singleton. En l'absence d'information par exemple, Smets justifie la répartition uniforme (*i.e.*, équiprobabilité) et la théorie bayésienne de la décision peut alors être utilisée. Comme la crédibilité (*resp.* la plausibilité) est un minorant (*resp.* une majorant) de la probabilité, cette mesure est pessimiste (*resp.* optimiste). Il existe cependant dans la littérature des critères directs pour effectuer la décision (*e.g.*, hypothèse la plus plausible ou la plus crédible) [François, 2000].

## A6\_6. Résumé

Les mesures présentées ci-dessus apparaissent comme des cas particuliers de mesures de confiance avec des hypothèses plus ou moins fortes et plus ou moins compatibles.

La Fig. A6\_2 illustre que la possibilité (*resp.* la nécessité) est un cas particulier de la plausibilité (*resp.* crédibilité). La probabilité  $P$  est également un cas particulier de crédibilité qui respecte l'additivité et où chaque singleton se voit affecter d'une masse de croyance : on a alors  $Cr(A) = Pls(A) = P(A)$ .

Les confiances qui sont à la fois des mesures de possibilités, de nécessités, de crédibilités, de plausibilités et de probabilités sont appelées mesures de Dirac. Enfin toutes ces mesures sont elles-mêmes des cas particuliers de mesures floues.

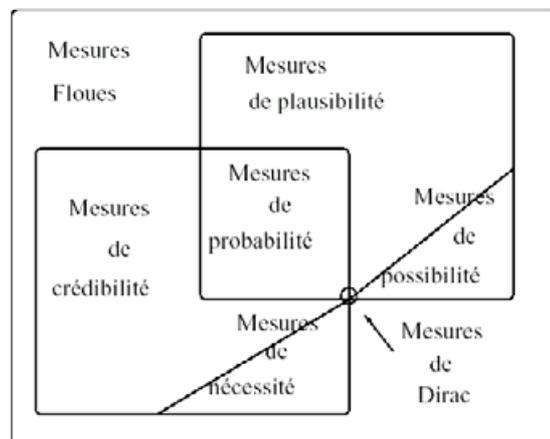


Fig. A6\_2 : liens entre les différentes mesures de confiance (in [Petit-Renaud, 1999])

## Annexe 7 : Relations et ordres

Cette présentation est tirée de [Konieczny, 2000].

Une relation binaire sur un ensemble  $E$  est un sous-ensemble de  $E \times E$ , *i.e.*, un ensemble de couples  $(x, y)$  avec  $x \in E$  et  $y \in E$ .

Une relation binaire  $\mathfrak{R}$ , définie sur  $E \times E$ , est dite :

- **réflexive** si pour tout  $x$  de  $E$ ,  $x \mathfrak{R} x$ .
- **transitive** si pour tout  $x, y, z$  de  $E$ , si  $x \mathfrak{R} y$  et  $y \mathfrak{R} z$ , alors  $x \mathfrak{R} z$ .
- **totale** si pour tout  $x, y$  de  $E$ , on a  $x \mathfrak{R} y$  et  $y \mathfrak{R} x$ .
- **symétrique** si pour tout  $x, y$  de  $E$ , si  $x \mathfrak{R} y$  alors  $y \mathfrak{R} x$ .
- **anti-symétrique** si pour tout  $x, y$  de  $E$ , si  $x \mathfrak{R} y$  et  $y \mathfrak{R} x$  alors  $x = y$ .
- **modulaire** si pour tout  $x, y, z$  de  $E$ , si  $x \mathfrak{R} y$ ,  $y \mathfrak{R} x$  et  $z \mathfrak{R} x$ , alors  $z \mathfrak{R} y$ .
- **acyclique** si pour tout  $x_1, x_2, \dots, x_n$  de  $E$ , on n'a pas  $x_1 \mathfrak{R} x_2 \mathfrak{R} \dots \mathfrak{R} x_n \mathfrak{R} x_1$ .

Une relation qui n'est pas **totale** est dite **partielle**.

Un **pré-ordre** est une relation réflexive et transitive sur  $E \times E$ .

Une **relation d'équivalence** est une relation réflexive, symétrique et transitive sur  $E \times E$ .

Un **ordre** est une relation réflexive, anti-symétrique et transitive sur  $E \times E$ .



Annexe 8 : Caractéristiques du bassin versant de l'Hérault

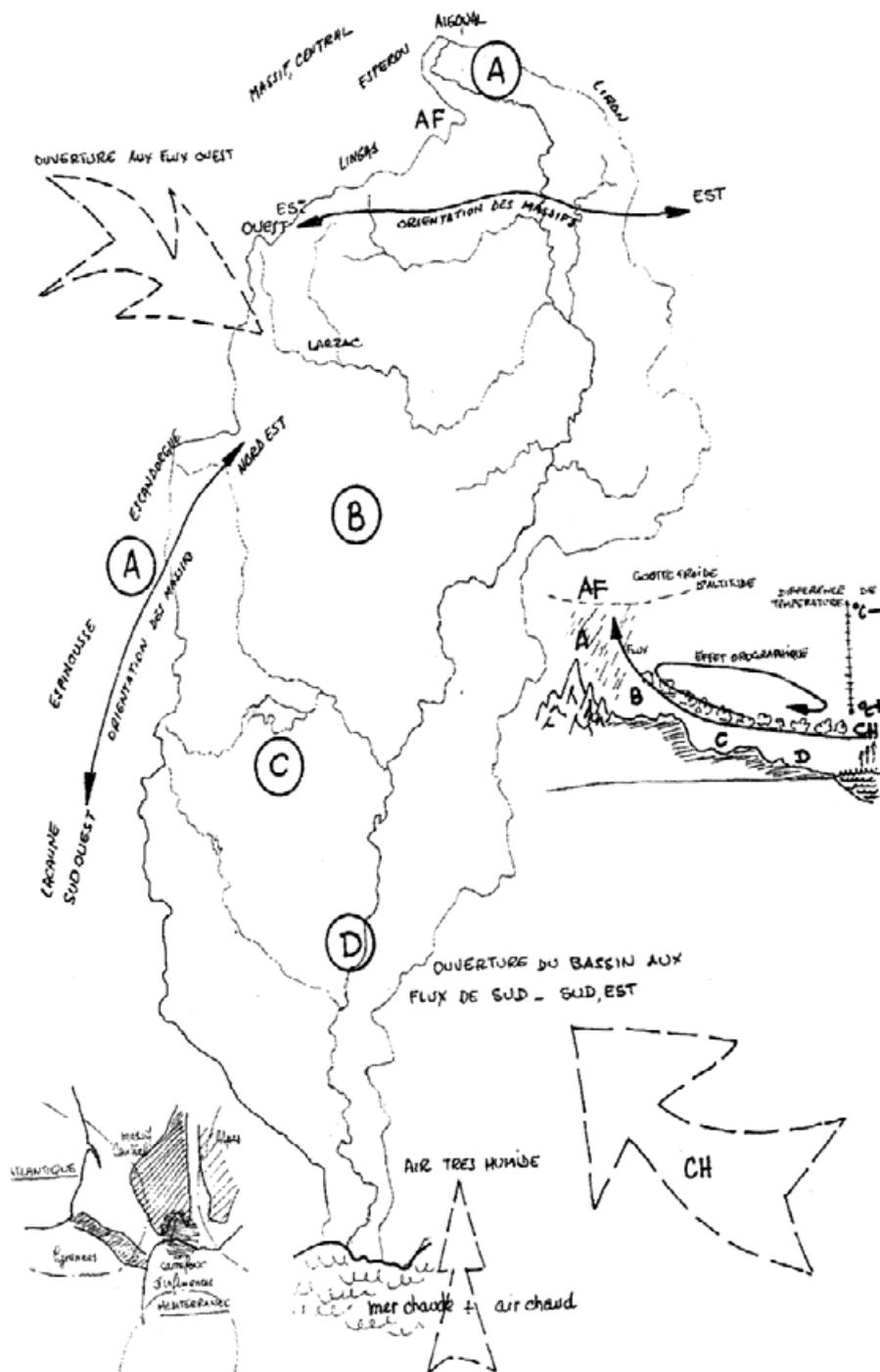


Fig. A8\_1 : Aérologie sommaire du bassin versant de l'Hérault (source : Conseil Général 34)

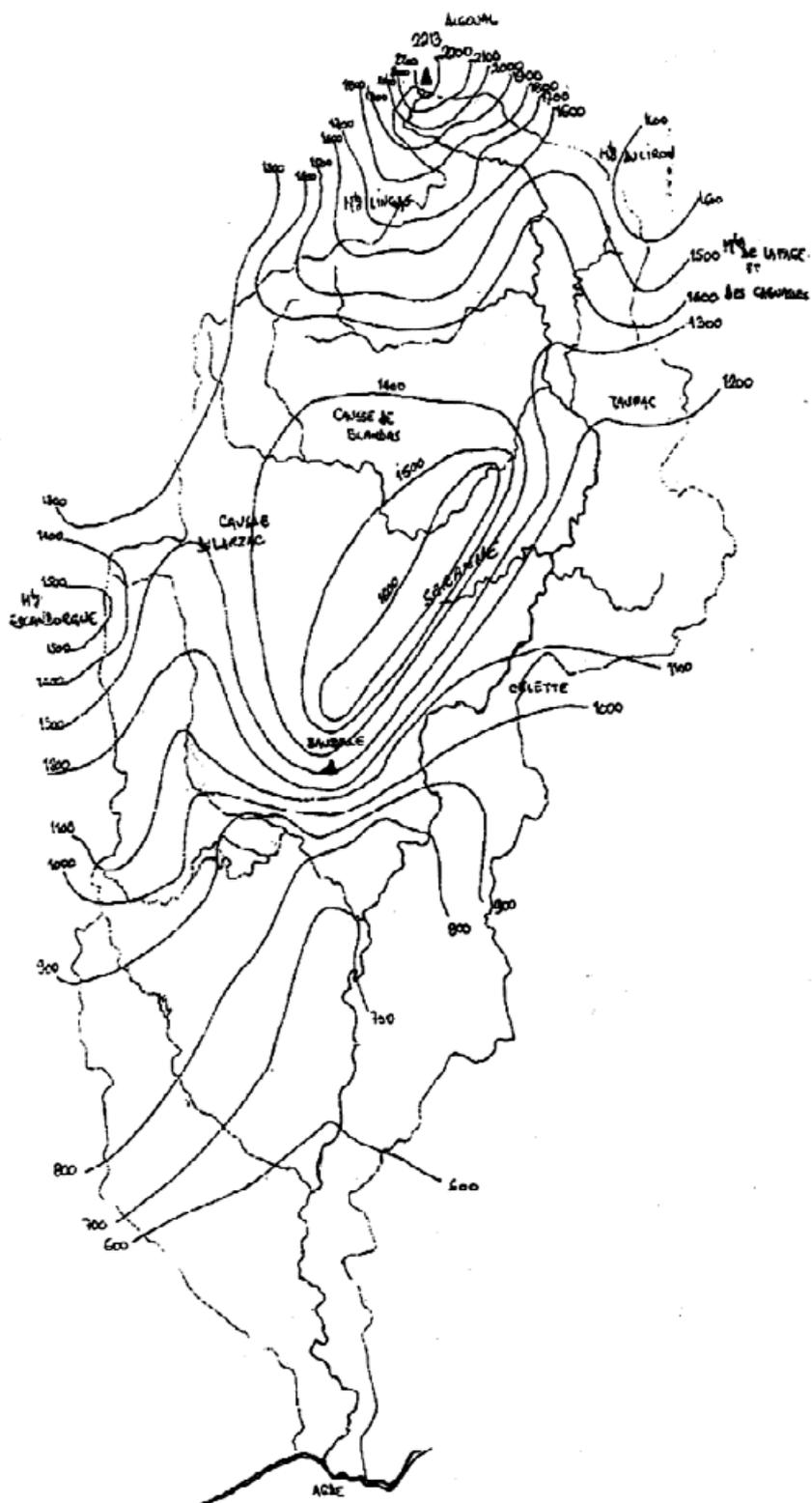


Fig. A8\_2 : Précipitations annuelles moyennes sur le bassin versant de l'Hérault  
(source : Conseil Général 34)

## Annexe 9 : Validation des résultats de "l'approche-photo" sur la Moselle à partir de repères de crue

Cette annexe présente brièvement la comparaison des résultats obtenus par "l'approche-photo" sur la Moselle avec les repérages des plus hautes eaux récupérées auprès du Service de Navigation du Nord-Est. Nous avons choisi de représenter les résultats de cette comparaison sous une forme simplifiée en abscisse curviligne (point kilométrique pK) en Fig A9\_1.

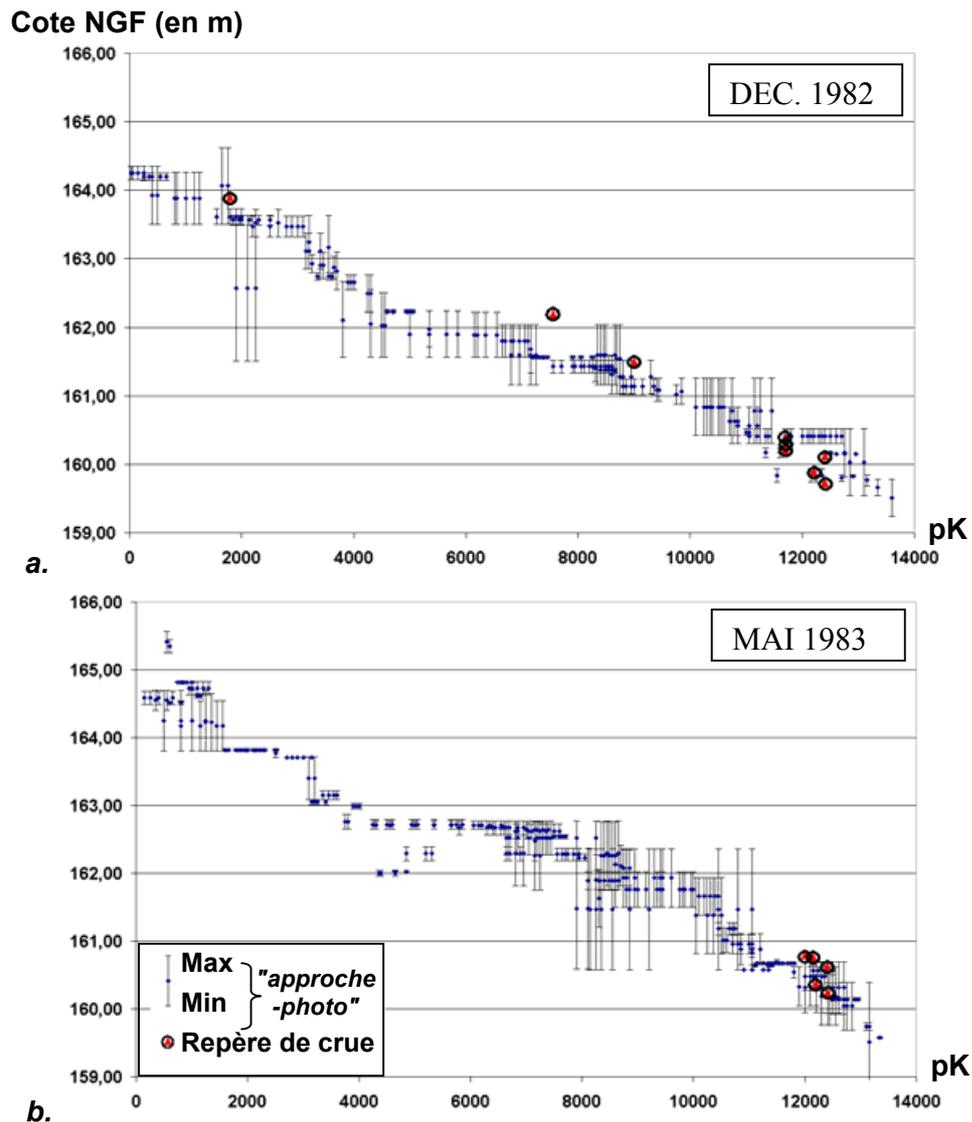


Fig A9\_1 : comparaison des résultats de "l'approche-photo" avec des repères de crue sur le site Moselle

Cette figure montre une assez bonne cohérence entre les résultats de "l'approche-photo" et les repères de crue puisque la valeur de ces derniers est généralement supérieure aux estimations [Min, Max].

Cependant, le nombre de repères de crue relativement faible est clairement insuffisant (surtout pour la crue de mai 1983) pour pouvoir approfondir la discussion sur la validité des résultats.



## Annexe 10 : Évaluation sur l'Hérault de la qualité de la topographie

La topographie du terrain naturel constitue sans aucun doute une donnée d'entrée majeure des méthodes d'analyse de l'aléa inondation en milieu de plaine.

"L'approche-photo" ne déroge pas à cette règle puisque la topographie intervient dans toute extraction d'informations altimétriques {NE} sur la cote du toit de l'eau, de manière directe lors de la valorisation des points cotés et de manière indirecte lors de la valorisation d'objets internes plus ou moins émergents.

La qualité des résultats de toutes ces méthodes est donc fortement tributaire de celle de la topographie (*cf.*, § A3\_2 pour une discussion la sensibilité de la modélisation hydraulique à la topographie). C'est pourquoi la validation externe, qui cherche à estimer la validité d'une méthode en se basant sur ses résultats, ne peut se passer de l'estimation de la qualité de ces principales données d'entrée.

Cette annexe est consacrée à l'évaluation, sur le site principal de l'Hérault, la qualité de la topographie utilisée comme donnée d'entrée de "l'approche-photo" et de la modélisation hydraulique 2D.

### Rappel de la topographie utilisée

Dans toutes les applications réalisées sur le site Hérault, *i.e.*, "approche-photo" sur les campagnes de photographiques obliques et verticales ainsi que la modélisation hydraulique 2D, les données topographiques utilisées sont celles confiées par la DDE de l'Hérault (appelée **topographie\_1995**). Cette donnée a été retenue pour les raisons suivantes :

- elle est la seule disponible sur l'ensemble du site d'étude ;
- elle est censée être l'information topographique la plus détaillée (semis de points cotés et structures linéaires sous forme de polygones 3D) tout en étant la plus précise ;
- elle a été acquise à une date très proche de celle de la crue étudiée (moins de cinq mois après).

### Méthode

L'évaluation de la qualité de la topographie\_1995 s'est effectuée à travers :

- des données topographiques issues d'une photogrammétrie antérieure et constituée uniquement de points cotés (*i.e.*, **topographie\_1985** réalisée à partir de clichés pris en 1985) ;
- des données topographiques issues d'un capteur Lidar ;
- des données topographiques issues d'un GPS différentiel cinématique.

Si la topographie des structures linéaires telles que les digues est très importante pour la modélisation hydraulique (*cf.*, § A3\_2), elle ne l'est pas pour "l'approche-photo". En conséquence, la comparaison des différentes sources topographiques a été réalisée selon deux zones différentes : les zones dites **hors structures** (*i.e.*, situées à plus de vingt mètres d'une structure telles qu'indiquées dans la topographie\_1995) et les zones de structures (*i.e.*, situées à moins de 5 m d'une structure).

## A10\_1. Comparaison des deux campagnes photogrammétriques

À la réception de la topographie\_1995, la première démarche a été de la comparer avec une topographie antérieure, celle de 1985. L'intérêt de cette comparaison est que les deux sources proviennent toutes deux de photogrammétrie. La portion commune entre les deux données, qui couvre une zone de 7\*3 km placée au centre du site d'étude Hérault, est suffisante pour limiter un éventuel biais dû à l'évolution temporelle de certains secteurs.

Comme la topographie\_1985 ne comporte pas les structures linéaires, la comparaison s'est focalisée sur les *zones hors structures* (i.e., représentatives de l'intérieur des compartiments). Les écarts entre les deux semis de points cotés ont été évalués de la manière suivante :

1. la topographie\_1995 a été interpolée sous la forme d'un TIN, appelé TIN\_1995 (cf., Fig. A10\_2) ;
2. sur chaque point coté de la topographie\_1985 situé à plus de 20 m d'une structure linéaire, l'écart entre la valeur du TIN\_1995 et la valeur du point coté 1985 a été estimé (cf., Fig. A10\_1).

Le résultat de la comparaison est exposé en Fig. A10\_1. Des différences très significatives apparaissent puisque des secteurs entiers présentent des écarts dépassant deux mètres. L'analyse de la disposition des écarts permet d'exclure des changements liés à l'évolution du terrain naturel et amène plutôt à penser que certains couples stéréoscopiques ont été mal orientés. On imagine alors fort bien l'incidence du choix de l'une ou l'autre topographie dans les méthodes d'analyse de l'aléa inondation.

Les résultats sont également présentés sous forme de transects en Fig. A10\_4. Pour cela, la topographie\_1985 a également été interpolée sous forme de TIN (cf., Fig. A10\_3).

Reste à savoir quelle source est "erronée", et quelle qualité peut être assignée à la topographie\_1995.

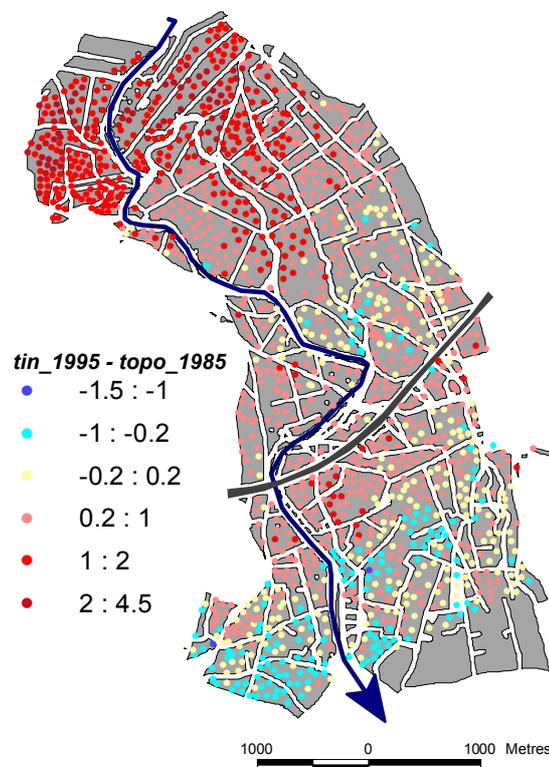


Fig. A10\_1 : comparaison des résultats des campagnes photogrammétriques de 1985 et 1995 (hors structures topographiques linéaires, plaine de l'Hérault)

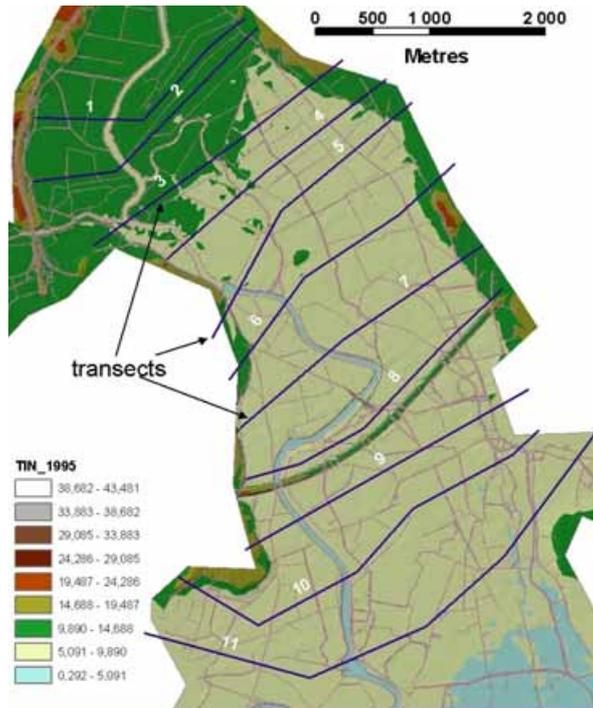


Fig. A10\_2 : TIN basé sur la topographie\_1995, et localisation de transects

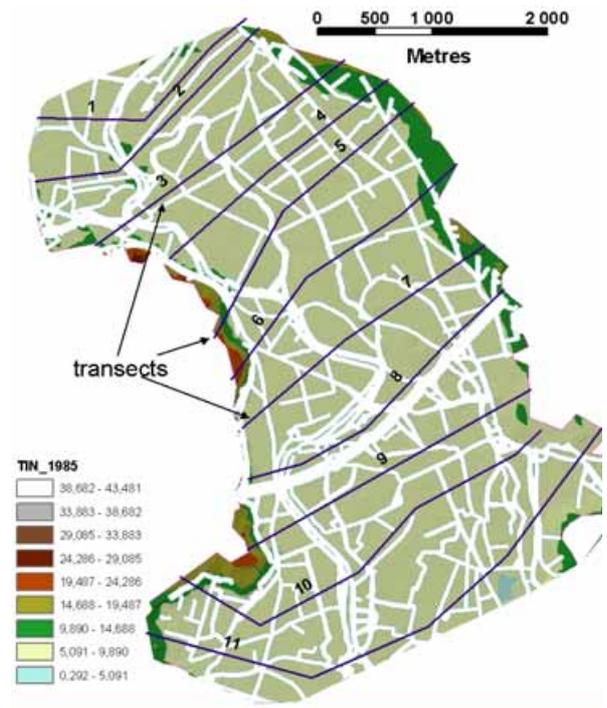


Fig. A10\_3 : TIN basé sur la topographie\_1985, et localisation de transects

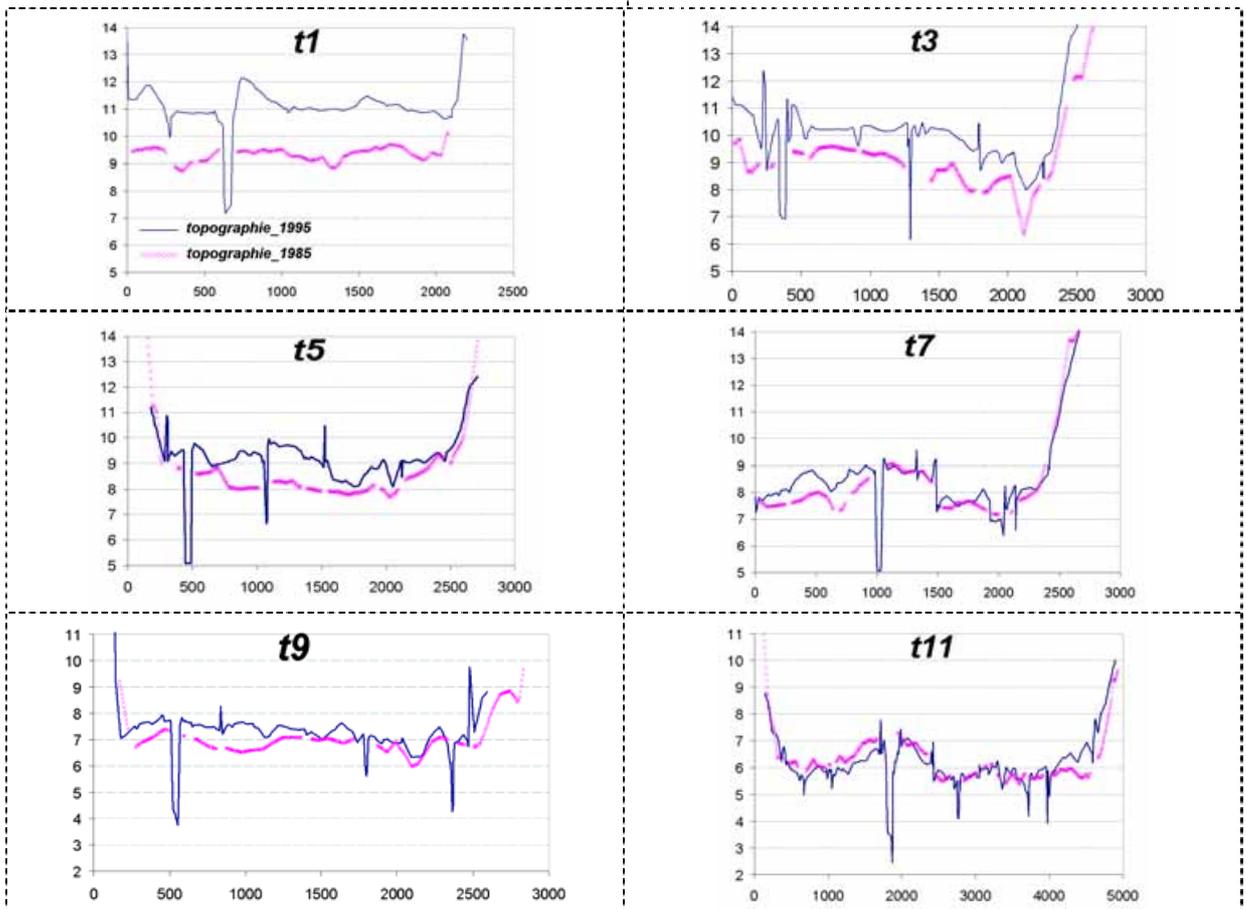


Fig. A10\_4 : présentation des deux topographies sous forme de transects (la localisation des transects est présentée sur les figures Fig. A10\_2 et Fig. A10\_3)

## A10\_2. Acquisition de données altimétriques de référence

Pour évaluer la qualité de la topographie\_1995, de nouvelles données altimétriques ont été acquises afin de constituer des références fiables.

Deux types de données ont été rassemblés à cet effet : 1) des données GPS ; 2) des données Lidar.

### Données GPS sur cheminements dans la plaine d'inondation

Une campagne GPS menée sur l'Hérault (cf., § 11.3.3) a permis d'acquérir des données altimétriques avec une précision estimée de l'ordre de un mètre en planimétrie et quelques centimètres en altimétrie.

Les cheminements réalisés sont visibles en Fig. A10\_5 et sont concentrés dans la partie amont et centrale du site d'étude.

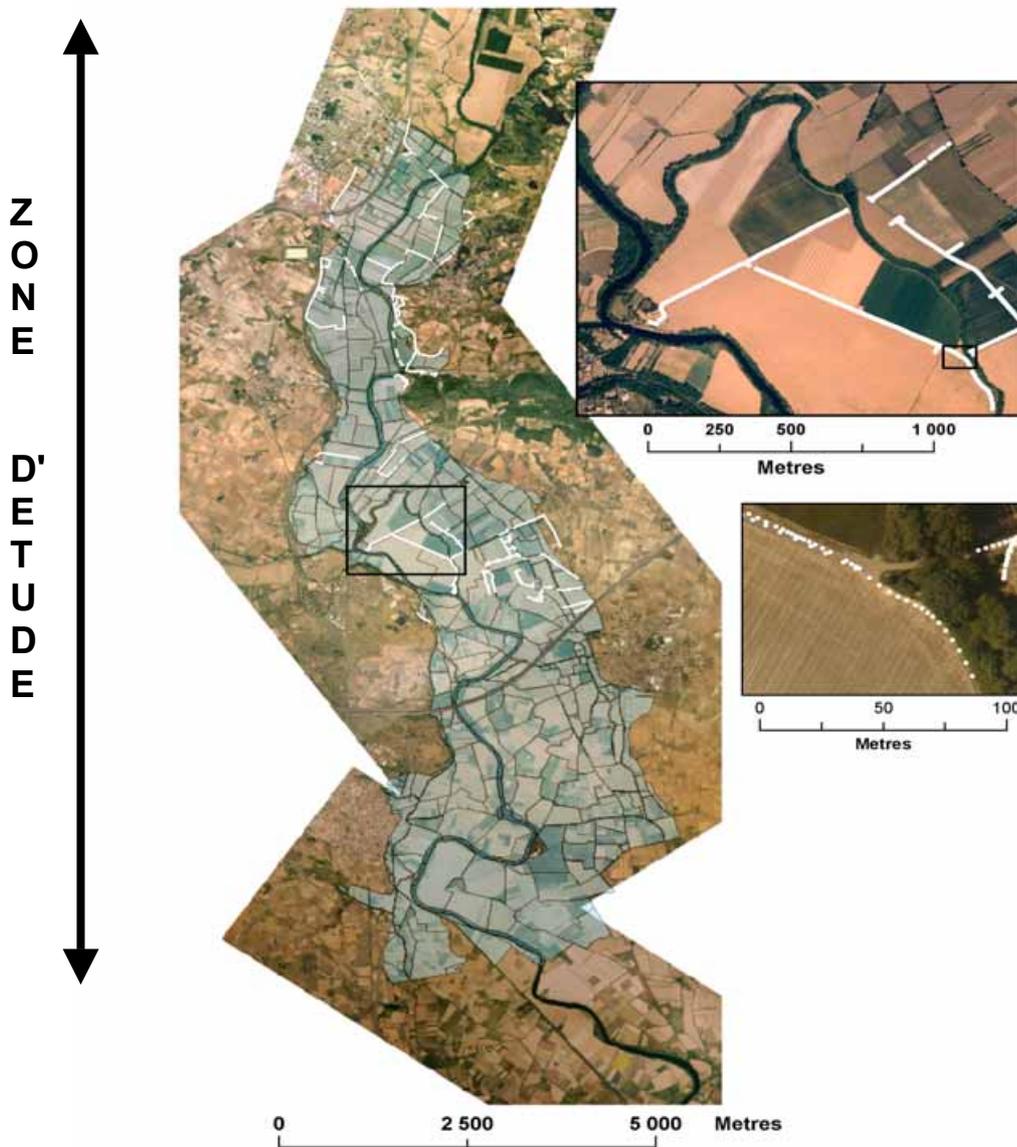
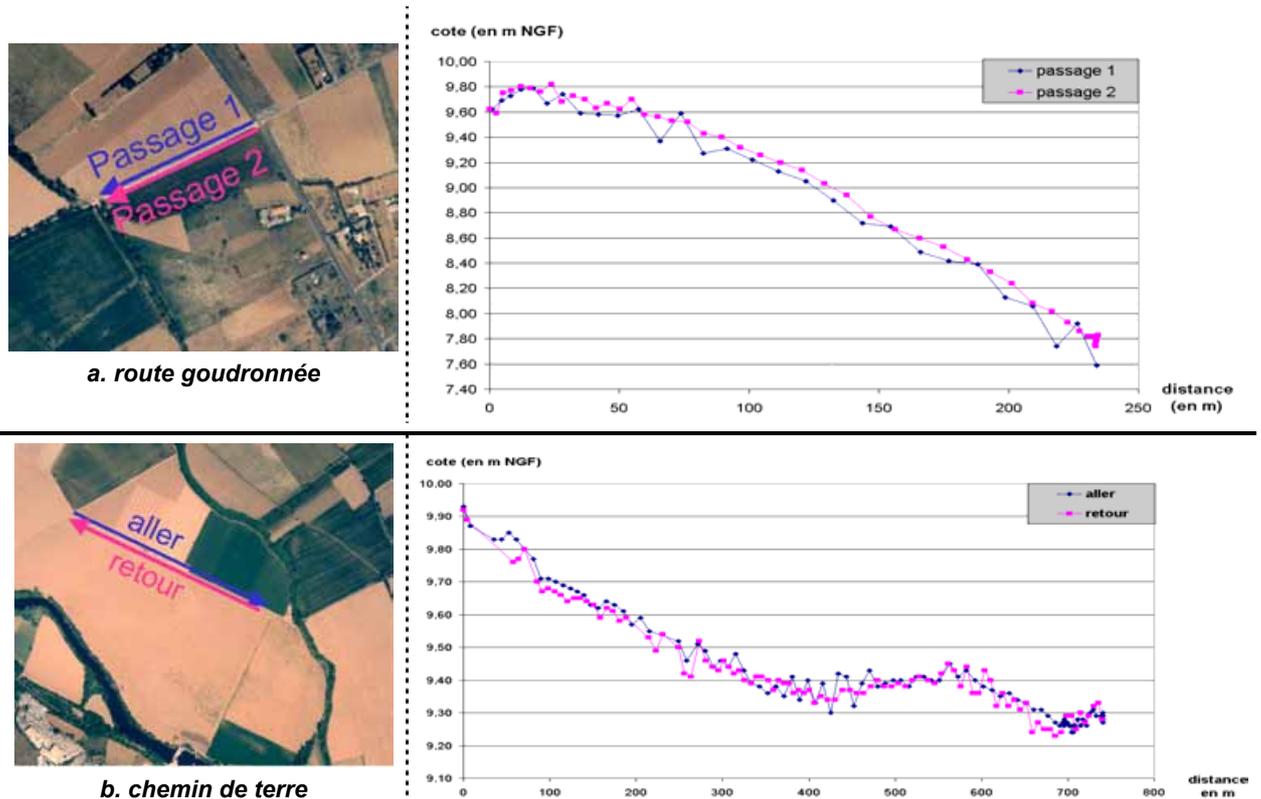


Fig. A10\_5 : mesures GPS réalisées sur des cheminements au sein de la plaine de l'Hérault (seul un point sur dix est représenté)

L'acquisition en temps réel s'est faite tous les 1/10 de seconde, ce qui a conduit à une acquisition d'un nombre de points très élevé, avec des écarts de moins de trente centimètres lorsque le déplacement était lent (vitesse de l'ordre de 15 km/h dans les champs). Pour limiter le nombre de points à traiter, seul un point de mesure sur dix a été retenu. L'espacement entre deux mesures se situe donc aux alentours de trois mètres dans les parcelles de vigne et atteint jusqu'à dix mètres sur route goudronnée.

Une vérification de la cohérence de la mesure en cinématique a été effectuée en passant deux fois au même endroit. Ces deux passages ont été réalisés des jours différents alors que la station de référence avait été déplacée. Les résultats (cf., Fig. A10\_6) apparaissent très cohérents et laisse penser que la précision de la mesure, en mode cinématique, est inférieure au décimètre.



**Fig. A10\_6 : cohérence des mesures GPS acquises en mode cinématique par comparaison des résultats sur un même cheminement (plaine de l'Hérault)**

### Données Lidar sur une petite portion de la plaine

Une acquisition de données altimétriques issues d'un vol Lidar a été réalisée sur le site Hérault sur deux bandes de vol de 0,3\* 2,5 km et 0,3\* 5 km commune aux topographie\_1995 et topographie\_1985 (cf., Fig. A10\_7). Le principe de la mesure a été exposé au § 2.2.1.2.2. Le vol s'est effectué à 900 m d'altitude le 26/06/2002 entre 14 et 15H00. Le système laser utilisé est basé sur le traitement du premier et du dernier écho, et permet ainsi de mesurer l'altimétrie au niveau du sol mais également au niveau du sommet de la végétation (sol + sursol).

La livraison a été réalisée sous la forme d'un maillage régulier de 1 mètre de coté pour le résultat des traitements altimétriques (sol et sol+sursol), auxquels ont été associées deux images à 0,5 m de résolution spatiale prises au cours du même vol (une en couleur et l'autre en infra-rouge couleur).

Les erreurs annoncées par le prestataire de cette technologie sont inférieures à 0,5 m en planimétrie et à 0,15 m en altimétrie. Seules les données relatives au niveau du sol sont valorisées ici.

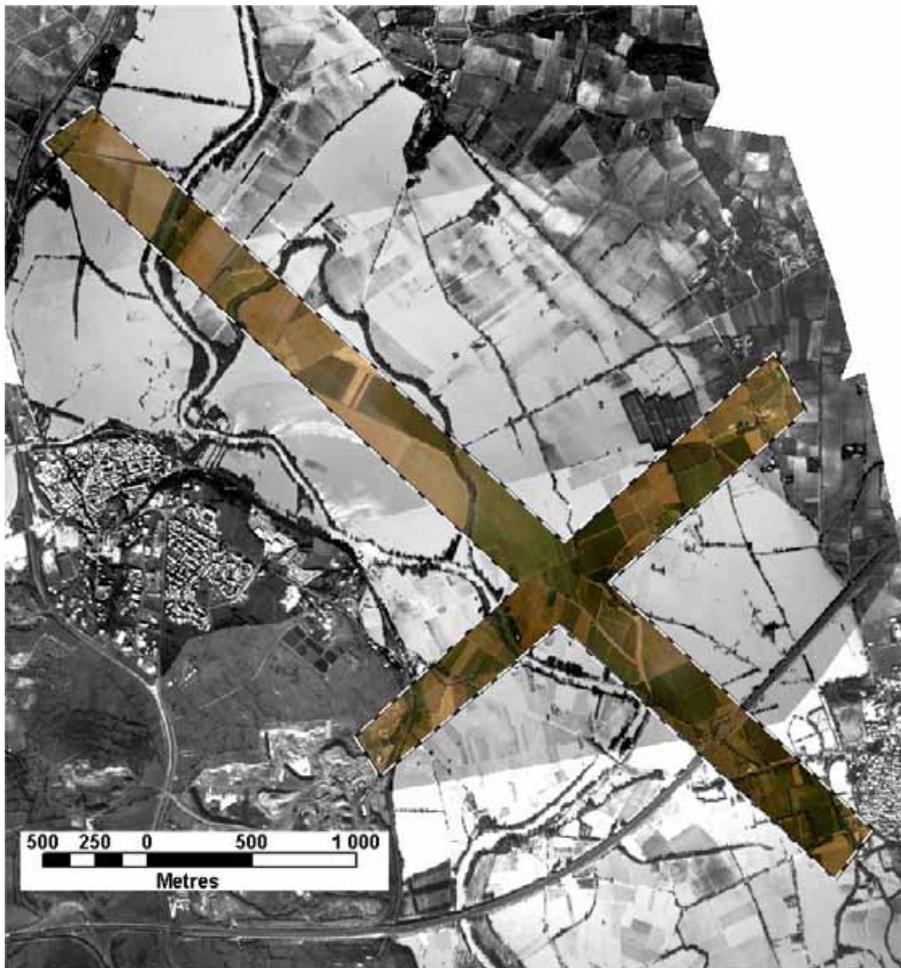


Fig. A10\_7 : zone couverte par la mesure Lidar (Hérault)

#### Validation croisée Lidar / GPS

Une comparaison a été menée sur l'ensemble des points GPS se trouvant dans la zone Lidar, que le point soit sur une structure linéaire de type digue ou au milieu d'une parcelle. Le résultat (cf., Fig. A10\_8) fait apparaître une très bonne correspondance des deux topographies. Seuls deux secteurs correspondant à des mesures GPS appartenant à deux transects clairement identifiés présentent de fortes différences. Le premier correspond manifestement à une anomalie de prise d'informations GPS (problème de connexion radio que l'on n'aurait pas vu ?), et le second provient plus certainement d'un simple problème de planimétrie. Ces points sont en effet à moins d'un mètre d'une interface entre un champ et une zone en forêt surélevée.

Si on exclut au moins le premier secteur apparaissant clairement comme une anomalie, on trouve les statistiques suivantes :

<i>Nombre de points</i>	<i>Moyenne des écarts</i>	<i>Écart-type des écarts</i>	<i>Moyenne des écarts absolus</i>
1042	4 cm	9 cm	7 cm

Tab. A10\_1 : statistiques sur les écarts entre valeurs GPS et valeurs Lidar

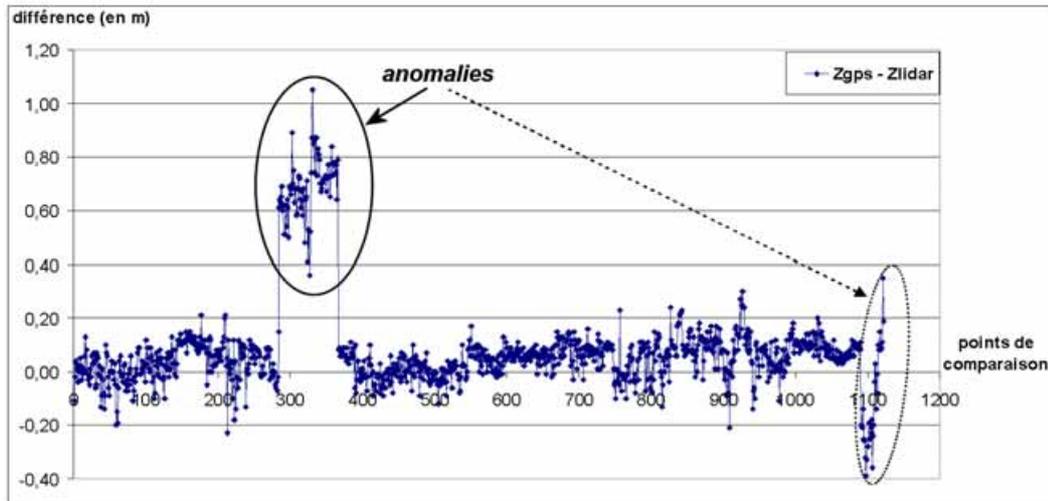


Fig. A10\_8 : écart entre les mesures GPS et les mesures Lidar

Cette validation croisée conforte l'idée de précision que l'on se faisait des données altimétriques provenant de la campagne Lidar et de la campagne GPS, i.e., une qualité de l'ordre du décimètre. Ces deux données peuvent donc servir de données de référence pour estimer la qualité de la topographie\_1995.

### A10\_3. Comparaison des deux campagnes photogrammétriques aux données de référence

#### À partir des données Lidar

La donnée Lidar procure une représentation continue de la topographie sous forme de MNT à 1 m de résolution spatiale, très pratique pour tester la qualité des topographies provenant de points cotés. Il est possible en effet de récupérer, pour chaque point coté, la valeur de l'altitude donnée par le Lidar. Les statistiques réalisées sur les points cotés de la topographie\_1995 et de la topographie\_1985 sont exposées dans le Tab. A10\_2. Elles permettent d'évaluer la qualité des deux sources de données topographiques *hors structures linéaires*.

$Z_{\text{Lidar}} - Z_{\text{points cotés}}$	<i>Différence entre valeur Lidar et valeur des points cotés 1995</i>	<i>Différence entre valeur Lidar et valeur des points cotés 1985</i>
<i>Nombre de points</i>	496	163
<i>Moyenne</i>	-0,30 m	0,37 m
<i>Écart-type</i>	0,36 m	0,69 m
<i>Minimum/ Maximum</i>	-1,68 m / 0,73 m	-0,99 m / 2,23 m
<i>Moyenne des différences en valeur absolue</i>	0,38 m	0,61 m

Tab. A10\_2 : statistiques sur les différences entre l'altimétrie Lidar et les points cotés issus de photogrammétrie pour les deux campagnes de 1985 et 1995 (site de l'Hérault)

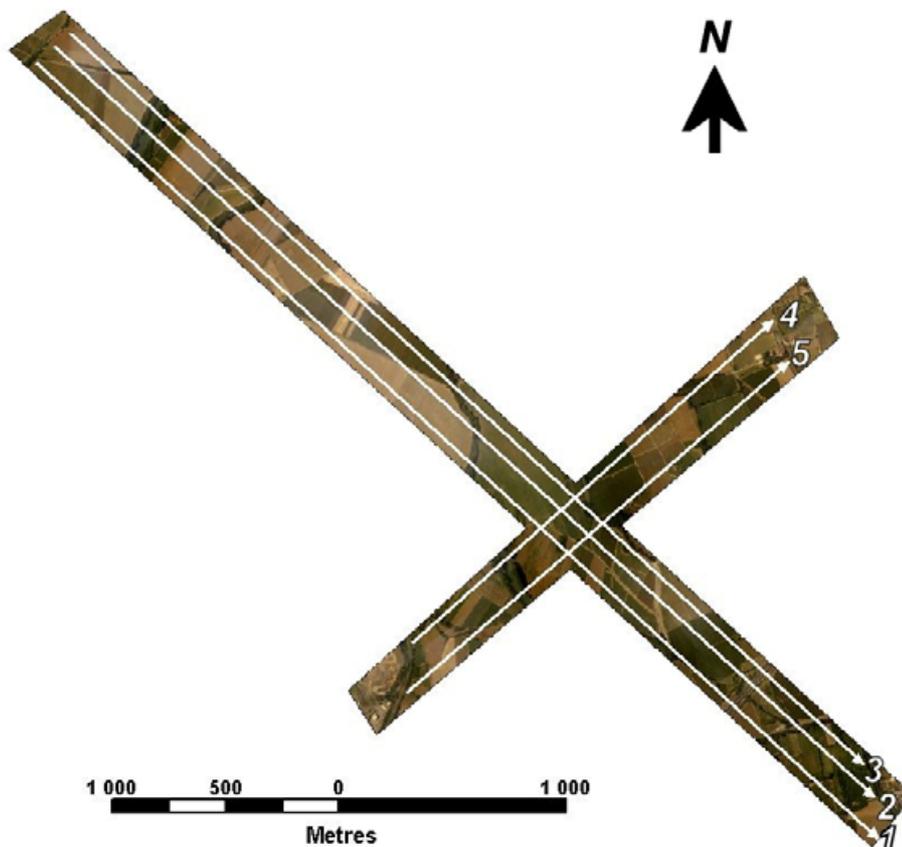
Il apparaît clairement que les deux topographies s'éloignent fortement de la référence constituée par le Lidar, avec une tendance à la surestimation de 30 cm pour la topographie de 1995 et une tendance à la sous-estimation de près de 40 cm pour celle de 1985. À ce biais vient s'ajouter un écart-type dépassant 35 cm pour la topographie 1995 et allant jusqu'à 0,69 cm pour celle de 1985. Par conséquent, la moyenne des différences avec la référence Lidar atteint, en valeur absolue, près de 40 cm pour les points cotés de la topographie\_1995 et plus de 60 cm pour les points cotés de la topographie\_1985.

**Ces statistiques montrent que, sur la zone de Lidar :**

1. *la topographie\_1995 est globalement meilleure que la topographie\_1985 ;*
2. *la qualité de la topographie\_1995 utilisée dans cette étude est médiocre avec une différence moyenne, en valeur absolue, avoisinant 40 cm.*

Une analyse approfondie de la répartition de ces erreurs montre que la topographie\_1985 comporte un très fort biais (*i.e.*, erreur systématique) sur la partie nord alors qu'elle semble au moins aussi bonne que la topographie\_1995 sur la partie sud. Une défaillance dans le processus d'orientation externe des clichés photographiques de 1985 a dû se produire sur la partie nord lors du traitement photogrammétrique. En contrepartie, le défaut dans la topographie\_1995 semble plus homogène avec un léger biais allant dans le sens de la surestimation et un bruit (*i.e.*, erreur aléatoire) assez uniforme.

Ces différents commentaires sont illustrés à travers cinq transects réalisés sur la zone couverte par les données Lidar (*cf.*, Fig. A10\_9 et Fig. A10\_10).



**Fig. A10\_9 :** localisation des cinq transects réalisés sur la zone d'emprise Lidar pour analyser la qualité des topographies de 1985 et 1995 provenant de photogrammétrie

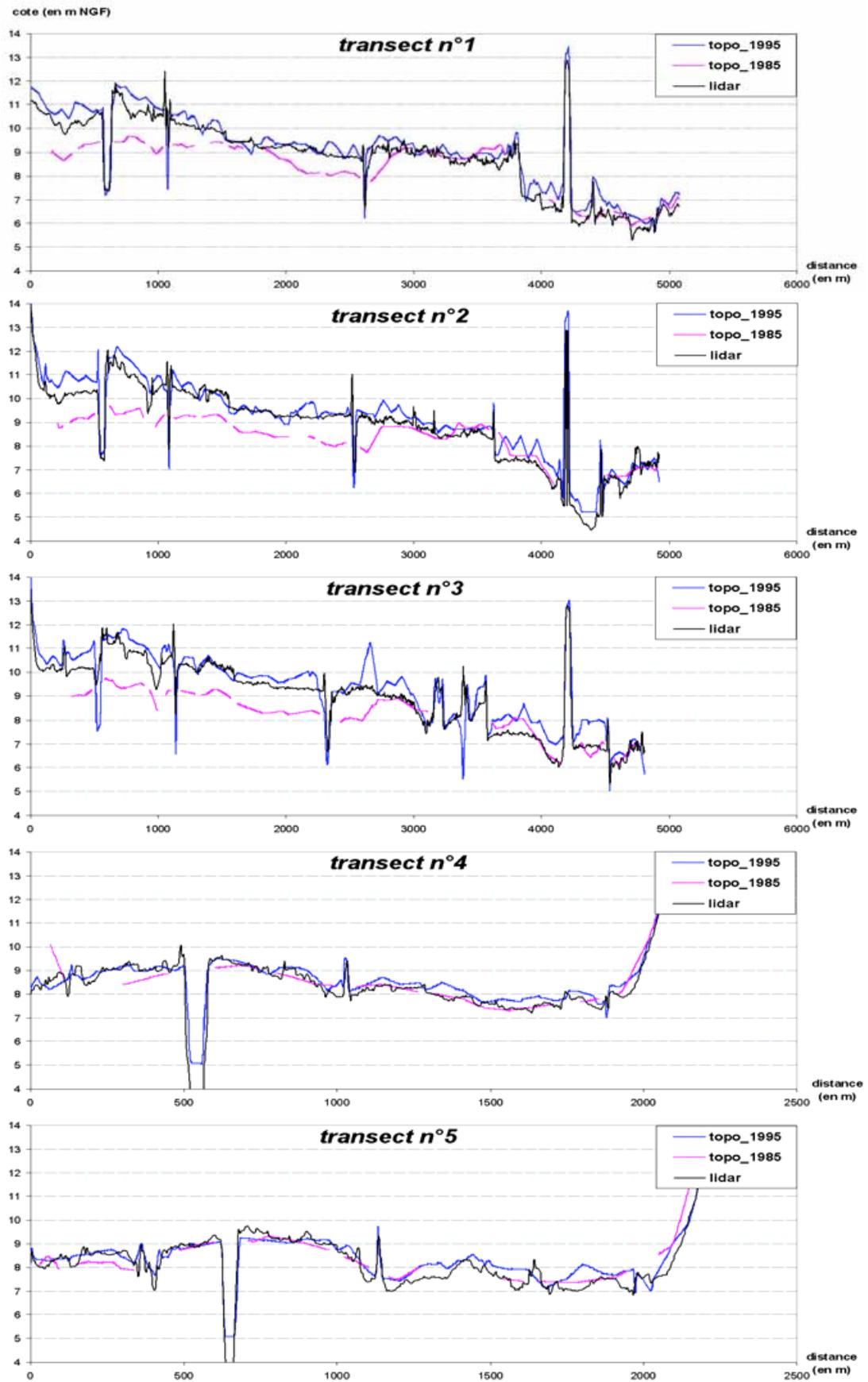


Fig. A10\_10 : comparaison des topographie\_1995, topographie\_1985 avec le Lidar

### À partir des données GPS

Les différents cheminements réalisés sur la plaine de l'Hérault (*cf.*, Fig. A10\_ 5) ont été mis à contribution pour vérifier et étendre les résultats statistiques concernant la qualité de la topographie\_1995 acquis grâce aux données Lidar (*cf.*, Tab. A10\_ 2).

Pour établir des statistiques, la cote du terrain naturel provenant de la topographie\_1995 (exploitée sous un format d'interpolation TIN) a d'abord été récupérée sur chaque point de mesure du cheminement GPS. Une évaluation de la différence entre les deux données a ensuite été menée. Enfin, l'exploitation des écarts a été réalisée en dissociant deux secteurs : les zones hors structures linéaires topographiques (situées à une distance supérieure à 20 m) et les zones de structures (*i.e.*, situées à moins de 5 m d'une structure).

$Z_{\text{gps}} - Z_{\text{topo\_1995}}$	Zones hors structures	Zones de structures
Nombre de points / Distance cumulée	2577 points / 5700 m	5211 points / 22800 m
Moyenne (biais)	-0,25 m	-0,42 m
Écart-type (bruit)	0,34 m	0,40 m
Minimum / Maximum	-1,59 m / 1,80 m	-1,64 m / 1,43 m
Moyenne des différences en valeur absolue	0,34 m	0,48 m

**Tab. A10\_ 3 : statistiques sur les différences entre mesure GPS et topographie\_1995 (Hérault)**

Ces données confirment tout à fait les comparaisons réalisées entre la topographie\_1995 et les données Lidar (*cf.*, Tab. A10\_ 2) en montrant l'existence d'un biais systématique allant de 25 cm à 40 cm selon les zones (tendance de la topographie\_1995 à la surestimation) et d'un bruit entre 35 cm et 40 cm. Par ailleurs, il semblerait que la qualité de la topographie soit légèrement supérieure à l'intérieur des parcelles par rapport aux abords immédiats des structures linéaires topographiques. Une explication de cette différence pourrait provenir de l'interpolation, susceptible d'engendrer des erreurs d'autant plus importantes que l'on se rapproche des structures topographiques.

## **A10\_4. Conclusion**

Un travail conséquent a été mené sur le site de l'Hérault pour estimer la qualité des données topographiques disponibles. Il ressort de ce travail les conclusions suivantes :

- les mesures GPS en mode cinématique et les données Lidar sont de **bonne qualité pour des besoins hydrauliques**, *i.e.*, avec une précision estimée de l'ordre du décimètre ;
- la qualité de la topographie\_1995 est, sur la zone couverte par le Lidar, globalement meilleure que celle de 1985 à cause de fortes erreurs systématiques localisées dans cette dernière ;
- la qualité des données provenant de la topographie\_1995 reste très **insuffisante pour des besoins hydrauliques** avec un biais systématique de 0,25 cm à 40 cm et un bruit de l'ordre de 35 à 40 cm.

Il est intéressant de voir que la valeur du bruit observé est très proche de la valeur de l'erreur moyenne quadratique annoncée pour des résultats de photogrammétrie réalisée à partir de photographies aériennes verticales prises au 1/18000 (*cf.*, Tab. A4\_ 1). Cependant, la topographie\_1995 présente, en plus de cette erreur aléatoire, une erreur systématique de plus de 25 cm.

**Il en découle qu'une précision recherchée sur la cote du toit de l'eau de l'ordre de 1 à 2 décimètres est illusoire avec de telles données topographiques. Les conclusions des tests de validation doivent donc être tirées en conséquence, que ce soit pour "l'approche-photo" ou pour la modélisation hydraulique 2D.**

## Annexe 11 : Amorce d'analyses multi-temporelles

Cette annexe aborde l'intérêt que pourrait constituer la valorisation de plusieurs jeux de photographies pris sur un même site à différents instants de la même crue. Elle ne forme qu'une amorce de réflexion, la méthodologie évoquée n'étant pas allée à terme faute de temps et de données adéquates. La démarche a été amorcée sur :

1. le site de l'Hérault avec deux jeux de photographies de la même crue à deux instants différents (*cf.*, Figure 5-4) dont un (le jeu de photographies obliques) qui ne couvre malheureusement qu'une zone réduite du site étudié ;
2. le site de la Moselle avec deux jeux de photographies sur le même site mais pour deux crues différentes : décembre 1982 (T = 10 ans) et mai 1983 (T = 20 ans).

L'intérêt de la démarche est illustré à travers une application séquentielle (donc imparfaite) de ces différentes contraintes : les contraintes spatiales aux instants  $t1$  et  $t2$  sont appliquées dans un premier temps, la prise en compte des contraintes temporelles est effectuée dans un second temps.

### A11\_1. Sur le site Hérault

Deux jeux de photographies de la même crue étaient disponibles sur le site Hérault un jeu de photographies obliques prises vers le maximum de crue (au niveau du lit mineur) à l'amont du site (soit la date  $t1$ ) et un jeu de photographies verticales prises plus tardivement (soit la date  $t2$ ), correspondant, sur le secteur d'intérêt, à une baisse générale des niveaux d'eau.

Nous avons choisi d'imposer la contrainte simple suivante : la cote de l'eau à  $t1$  est supérieure ou égale à la cote de l'eau à  $t2$  sur chaque compartiment du champ d'inondation.

Les contraintes temporelles sont donc identiques à celles des flux (*cf.*, Eq. 7-4). La stratégie est la suivante : s'il y a un conflit INTER entre les estimations d'un même compartiment entre  $t1$  et  $t2$ , on affecte pour les deux compartiments [Min( $t2$ ) ; Max( $t1$ )], sinon on applique les actions de rectification des flux (*cf.*, Eq. 7-9).

L'application a amené les gains suivants en terme de précision (*cf.*, Tab. A11\_1) :

- l'estimation de la date  $t2$  est peu modifiée par l'ajout des contraintes temporelles, l'amplitude  $A\hat{m}p_{100}$  des compartiments inférieures à 100 cm passant de 36 cm à 35 cm sans augmenter le nombre de compartiments  $Nc_{100}$  concernés ;
- pour l'estimation de la date  $t1$ , la valeur de  $A\hat{m}p_{100}$  reste à 56 cm mais le nombre de compartiments estimés  $Nc_{100}$  passe de 151 à 181.

Hérault 11/1994 date	Sans contraintes temporelles		Avec contraintes temporelles	
	$A\hat{m}p_{100}$	$Nc_{100}$	$A\hat{m}p_{100}$	$Nc_{100}$
$t1$ (prise oblique)	56 cm	151 (44%)	56 cm	181 (53%)
$t2$ (prise verticale)	36 cm	319 (94%)	35 cm	319 (94%)

Tab. A11\_1 : effet des contraintes temporelles sur le site Hérault

Les gains sont faibles car le jeu de photographies obliques, très partiel, a conduit à des estimations peu contraignantes.

Le gain toutefois non nul dans ce cas défavorable illustre bien l'intérêt d'une telle démarche sur deux jeux de photographies complets.

## A11\_2. Sur le site Moselle

La même démarche a été testée sur la Moselle, en faisant l'hypothèse que les niveaux d'eau de la crue de mai 1983 (période de retour de l'ordre de 20 ans) doivent être supérieurs à ceux de la crue de décembre 1982 (période de retour de l'ordre de 10 ans).

Les gains obtenus sont également très faibles (*cf.*, Tab. A11\_2), les niveaux d'eau entre les deux états étant trop différents pour pouvoir bénéficier des contraintes temporelles (*cf.*, Fig. A11\_1).

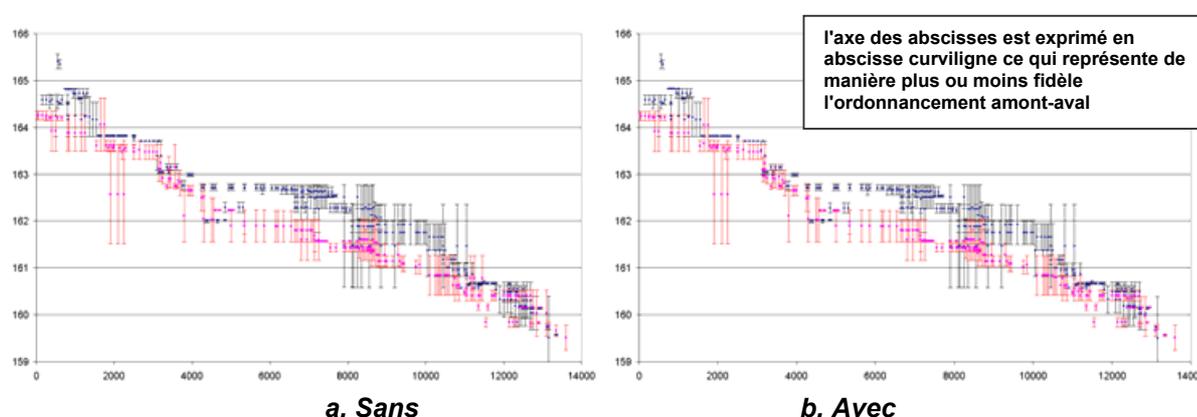


Fig. A11\_1 : estimations sur la Moselle sans et avec l'application des contraintes temporelles (les bénéfiques sont faibles car les écarts sont trop importants) (en noir : mai 1983 et en rouge : décembre 1982)

Moselle 11/1994  date	Sans contraintes temporelles		Avec contraintes temporelles	
	$A\hat{m}p_{100}$	$Nc_{100}$	$A\hat{m}p_{100}$	$Nc_{100}$
$t1$ (Mai 1983)	30 cm	301 (92%)	28 cm	302 (92%)
$t2$ (décembre 1982)	38 cm	208 (80%)	38 cm	208 (80%)

Tab. A11\_2 : effet des contraintes temporelles sur le site Moselle

## A11\_3. Conclusion

Comme nous venons de le voir, les jeux de données ne se sont pas bien prêtés à une amélioration conséquente des estimations par la prise en compte de contraintes temporelles. Il n'en reste pas moins que cette démarche d'analyse multi-temporelle présente un intérêt, tant du point de vue conceptuel que du point de vue de l'application à travers l'amélioration des estimations à chaque date.

Enfin, plutôt que de partir d'une connaissance extra-image de l'évolution pour définir les contraintes temporelles à imposer au système, les résultats de "l'approche-photo" à chaque instant  $t1$  et  $t2$  peuvent être utilisées pour en déduire, par l'observation, l'évolution temporelle.

## *Index des figures*

### Document principal :

Figure 1-1 : décomposition du risque d'inondation en aléa et vulnérabilité .....	10
Figure 1-2 : les trois modes de gestion du risque d'inondation.....	12
Figure 1-3 : la plaine d'inondation au sein du bassin versant (tiré et adapté de l'Encyclopédie Encarta).....	14
Figure 1-4 : coupe transversale de la plaine d'inondation (d'après [Amoros et Petts, 1993]).....	14
Figure 1-5 : unités hydrogéomorphologiques et niveaux d'exposition à l'aléa associés (d'après [METL/MATE, 1996]).....	18
Figure 1-6 : exemple de caractérisation hydrogéomorphologique (d'après <a href="http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-Roussillon/risques/zi/aude/methodologie.htm">http://www.environnement.gouv.fr/Languedoc-Roussillon/risques/zi/aude/methodologie.htm</a> ).....	19
Figure 1-7 : exemple de discrétisation basée sur une triangulation de Delaunay (d'après [Hervouet et Moulin, 1994]).....	23
Figure 1-8 : exemple de discrétisation en triangles et quadrilatères (d'après [Farissier, 1992]) .....	23
Figure 1-9 : exemple de discrétisation basée sur une tessellation de Dirichlet (d'après [Di Giammarco et Todini, 1994]).....	23
Figure 1-10 : exemple de discrétisation spatiale en sections de calcul (d'après [Hydrologic Engineering Center, 2000]).....	24
Figure 1-11 : exemple de modélisation à casiers (illustration sur le modèle Loire, HYDRATEC d'après [METL/CETMEF, 1999]) .....	25
Figure 2-1 : le spectre électromagnétique et son utilisation en télédétection spatiale .....	32
Figure 2-2 : les trois grandeurs caractéristiques d'un échantillonnage (d'après [Blöschl et Sivapalan, 1995]).....	36
Figure 2-3 : exemples d'inadéquation entre grandeurs d'échantillonnage et phénomène naturel (d'après [Blöschl et Grayson, 2000]).....	37
Figure 2-4 : illustration du concept de résolution optimale par la recherche d'un minimum de variance pour chaque objet recherché (d'après [Puech, 2000]).....	40
Figure 2-5 : réflectance des éléments constitutifs de la plaine dans le domaine de l'optique.....	43
Figure 2-6 : profil en long des niveaux d'eau obtenus à partir d'images SAR et de cartes topographiques, superposé à un régime permanent simulé par le modèle HEC2 (d'après [Brakenridge et al., 1998]).....	47
Figure 2-7 : obtention conjuguée du relief et de la rugosité (d'après [Priestnall et al., 2000]) .....	55
Figure 2-8 : conceptualisation du fonctionnement d'une crue ([Gourbesville, 2000]) (a. photo de crue, b. directions d'écoulement, c. schématisation proposée pour un modèle 1D) .....	60
Figure 3-1 : algorithme s'appuyant sur des fonctionnalités SIG pour retrouver la surface inondée maximale à partir d'une image SAR prise en récession de crue [Brivio et al., 2002].....	65
Figure 3-2 : exemple de découpage spatial en fonction de la variabilité de la variable à caractériser (in [Kavvas, 1999]).....	77
Figure 3-3 : représentation schématique de la relation entre disponibilité en données, complexité du modèle et performance prédictive (in [Grayson et Blöschl, 2000]) .....	78
Figure 3-4 : principales méthodes d'analyse spatiale - exemple de la grille des modèles (d'après [Favre et al., 1999]).....	80
Figure 3-5 : exemple de partition selon les ordres de grandeur .....	82
Figure 3-6 : graphe causal spécifiant que la différence de potentiel (u) et la résistance (r) déterminent causalement l'intensité (i) dans la loi d'Ohm (in [Travé-Massuyès et al., 1997]).....	83
Figure 5-1 : les trois sites d'étude.....	93
Figure 5-2 : bassin versant de l'Hérault, site d'étude et stations hydrométriques .....	93
Figure 5-3 : délimitation du site d'étude "Hérault" .....	95
Figure 5-4 : hydrogrammes de la crue de nov. 1994 (Hérault) et date des campagnes photos .....	96
Figure 5-5 : exemple de cliché vertical (a) et oblique (b) disponible sur l'Hérault pour la crue de novembre 1994 .....	97
Figure 5-6 : bassin versant français de la Moselle, site d'étude et stations hydrométriques .....	98
Figure 5-7 : délimitation du site d'étude "Moselle" .....	99
Figure 5-8 : débits journaliers (Moselle) pour les crues de (a) décembre 1982, (b) mai 1983 .....	100

Figure 5-9 : exemples de clichés obliques disponibles sur la Moselle .....	101
Figure 5-10 : bassin versant de l'Aisne, site d'étude et stations hydrométriques .....	102
Figure 5-11 : délimitation du site d'étude "Aisne" .....	104
Figure 5-12 : pluviométrie à Soissons et débits à Choisy-au-Bac .....	104
Figure 5-13 : cote NGF (en m) en différents endroits du site d'étude et date des clichés .....	104
Figure 5-14 : exemples de clichés obliques disponibles sur l'Aisne, crue de décembre 1993.....	105
Figure 6-1 : schéma général de définition d'une structure hydrodynamique appropriée à l'étude du fonctionnement de la crue au moment de prise de vue des clichés aériens .....	113
Figure 6-2 : les deux types d'informations valorisés pour extraire des informations altimétriques sur le toit de l'eau .....	117
Figure 6-3 : délimitation des zones informatives .....	118
Figure 6-4 : proposition de prise en compte de l'imprécision du positionnement des limites d'inondation en terme de degrés de préférence .....	119
Figure 7-1 : illustration pour une relation de flux des concepts de cohérence INTER (a), de compatibilité INTER (b) et de conflit INTER (c).....	125
Figure 7-2 : schéma général de résolution du CSP calqué sur un processus de fusion/révision .....	128
Figure 7-3 : de la compatibilité à la cohérence, illustration du resserrement des estimations lors de l'élimination des portions de plage ne rentrant dans aucune solution.....	130
Figure 8-1 : point de départ et point d'arrivée de l'algorithme de mise en cohérence a. indications altimétriques (rive gauche) extraites des photographies, b. estimations finales (application sur la crue de décembre 1993 sur l'Aisne) .....	134
Figure 8-2 : illustration de la croissance de type exponentielle du nombre de tests à effectuer (a) et du temps de calcul (b) avec le nombre de compartiments (appelés ici casiers) (cas de CON'FLEX tiré de [Würbel, 2000]) .....	135
Figure 8-3 : création d'un ordre total d'application des contraintes, cas des flux .....	136
Figure 8-4 : stratégie de mise en cohérence hydraulique .....	137
Figure 8-5 : enracinement épistémique de la base de connaissances .....	139
Figure 8-6 : organigramme de gestion des conflits INTRA initiaux.....	141
Figure 8-7 : construction de l'enveloppe MAX (3 rectifications de Max sur 7 compartiments).....	142
Figure 8-8 : localisation des conflits et identification des compartiments contenant les informations sources de conflit INTER .....	145
Figure 8-9 : schéma général de l'algorithme proposé pour deux degrés de préférence .....	147
Figure 9-1 : illustration des effets de l'orthorectification .....	153
Figure 9-2 : orthophotoplan établi sur l'Aisne à partir des 17 photographies post-crue .....	154
Figure 9-3 : qualité géométrique de l'orthophotoplan (cas de l'Aisne).....	154
Figure 9-4 : emprises des photographies obliques sur le site Moselle.....	155
Figure 9-5 : complémentarité sémantique et temporelle de deux sources d'informations.....	155
Figure 9-6 : exemple de positionnement des limites d'inondation (en rouge : emprise de la photographie, en jaune : limite d'inondation extraite et en vert : zone d'imprécision de localisation de la limite obtenue par une zone tampon).....	157
Figure 9-7 : illustration des plans "compartiments toute crue" et "compartiments crue étudiée" sur le site Moselle .....	157
Figure 9-8 : plan "compartiments actifs" pour chaque crue étudiée.....	158
Figure 9-9 : interprétation des flux sur photographie en crue.....	159
Figure 9-10 : exemple de délimitation en compartiments et circulations associées (Hérault) .....	159
Figure 9-11 : structure hydrodynamique et représentation duale en graphe.....	160
Figure 9-12 : indications altimétriques provenant de la valorisation de "points cotés" .....	162
Figure 9-13 : méthode de recueil sur l'Hérault pour les minorants de type $\{m^{P_2}\}$ (a. sélection des points cotés internes au champ d'inondation, b. conservation des points cotés situés dans le cœur des compartiments) .....	163
Figure 9-14 : illustration de digues partiellement submergées et indications de hauteurs correspondantes .....	165
Figure 9-15 : répartition des 82 parcelles de vigne échantillonnées .....	167
Figure 9-16 : photographies illustrant les deux principaux modes de conduite de la vigne a et b. parcelles mécanisées (palissées avec inter rang proche de 2,5 m) c et d. parcelles non mécanisées (gobelet sur grille régulière de 1,5 m) .....	167

Figure 9-17 : hauteurs de vigne en fonction du mode de conduite.....	168
Figure 9-18 : reconnaissance du mode de conduite en fonction de la résolution spatiale .....	169
Figure 9-19 : exemples de caractérisation du degré de submersion des vignes .....	169
Figure 10-1 : effet de la mise en cohérence sur l'amplitude des estimations (cas de la Moselle pour le crue de mai 1983).....	173
Figure 10-2 : traçabilité des informations (a. ensemble des points cotés ; b. points cotés informatifs utilisés, c. points cotés "sûrs" sources de conflit INTRA, d. compartiments contenant les informations sources de conflit INTER).....	175
Figure 10-3 : représentation en 3D (3 dimensions) des résultats de "l'approche-photo" sur les différents sites d'étude .....	177
Figure 11-1 : comparaison sur l'Aisne des résultats de "l'approche-photo" avec des relevés de cote aux écluses..	184
Figure 11-2 : vérification de la cohérence du résultat obtenu par "l'approche-photo" à l'aval de l'écluse de Fontenoy.....	185
Figure 11-3 : repères de crue disponibles pour la crue de nov. 1994 sur l'Hérault (a) et comparaison avec les résultats de "l'approche-photo" pour la campagne de photographies verticales (b).....	186
Figure 11-4 : représentation des écarts entre repères de crue et résultats de "l'approche-photo" selon un point kilométrique approximatif.....	187
Figure 11-5 : comparaison sur l'Aisne des résultats de "l'approche-photo" avec les résultats d'un modèle hydraulique 1D.....	188
Figure 11-6 : variation d'amont en aval de la largeur au miroir et allure générale des résultats des deux approches .....	189
Figure 11-7 : schématisation de l'effet possible des ponts sur la ligne d'eau .....	189
Figure 11-8 : Analyse du point coté ayant conduit à limiter les bornes Max des estimations à l'amont du pont de Pommier. ....	190
Figure 11-9 : exemples de localisation de points de mesure GPS (site Hérault).....	192
Figure 11-10 : principaux composants d'une station GPS Aquarius 5002.....	193
Figure 11-11 : données de validation acquises par GPS et comparaison avec les résultats de "l'approche-photo" (site Hérault).....	195
Figure 11-12 : histogrammes des répartitions des écarts entre la valeur GPS et la plage d'estimation [Min ; Max] provenant de "l'approche-photo" .....	196
Figure 12-1 : changement de structure hydrodynamique entre les valeurs de 400 m (a.) et 200 m (b) pour le critère de taille maximale. ....	197
Figure 12-2 : influence de la taille des compartiments sur les estimations [Min ; Max] (cas de l'Aisne) .....	198
Figure 12-3 : influence de la méthode de relâchement par valeur fixe par rapport à la méthode de relâchement par retrait .....	199
Figure 12-4 : comparaison des résultats obtenus avec un relâchement par retrait et avec un relâchement d'une valeur fixe $v_f$ de 1 cm (a) ou 200 cm (b).....	200
Figure 12-5 : évolution de $Amp_{100}$ et $N_{C100}$ avec le nombre d'information par compartiment.....	202
Figure 12-6 : décroissance de l'amplitude moyenne sur des noyaux de "super-compartiments" toujours estimés sur les 100 tirages.....	202
Figure 13-1 : présentation du maillage et des conditions aux limites du modèle hydraulique 2D mis en œuvre (basse vallée de l'Hérault entre Pézenas et Agde) .....	207
Figure 13-2 : illustration sur une vue 3D du lissage entre la topographie_1995 (a) et la topographie implémentée dans le modèle 2D (b), et extrait du maillage (c).....	208
Figure 13-3 : hydrogrammes simulés et observés sur la section aval du modèle.....	209
Figure 13-4 : cartographie des différences entre repères de crue et résultats de S15_30.....	211
Figure 13-5 : brèche dans la digue de protection du domaine "Saint-Joseph", structure importante pour la répartition des eaux entre rive droite et rive gauche.....	211
Figure 13-6 : comparaison avec l'observation "photo" des surfaces inondées obtenues avec les deux configurations "extrêmes" de strickler (analyse sur l'Hérault au moment de la prise des photographies aériennes verticales) .....	212
Figure 13-7 : histogrammes de répartition des écarts entre S15_30 et les plages d'estimation issues de "l'approche-photo" .....	213
Figure 13-8 : écart entre S15_30 et la plage [Min ; Max] de l'approche "photo" (cas des photos verticales).....	214
Figure 14-1 : illustration des possibilités offertes par la base opérationnelle.....	217

Figure 14-2 : diagnostic, grâce à "l'approche-photo", des sources d'erreurs présumées dans la simulation hydraulique (transects sur l'Hérault au moment de la prise des photographies verticales) .....	219
Figure 14-3 : superposition des vitesses estimées par la simulation numérique avec les photographies en crue orthorectifiées (cas de l'Hérault au moment de la prise des clichés verticaux) .....	221
Figure 14-4 : contraintes temporelles entre deux dates venant s'ajouter aux contraintes spatiales liées au fonctionnement hydraulique à chacune des dates .....	222

### Annexes :

Fig. A3_1 : les différents filtres agissant sur le monde réel [Bates et al., 1996].....	247
Fig. A3_2 : influence des coefficients de rugosité sur l'hydrogramme aval (in [Bates et al., 1998b]).....	249
Fig. A4_1 : typologie des photographies aériennes selon l'angle de visée [Muraz et al., 1999].....	251
Fig. A4_2 : plan de vol classique pour des photographies verticales.....	251
Fig. A4_3 : échelle d'une photographie : $e = f/H$ .....	252
Fig. A4_4 : déformations géométriques dues au relief [Muraz et al., 1999].....	252
Fig. A10_1 : comparaison des résultats des campagnes photogrammétriques de 1985 et 1995 (hors structures topographiques linéaires, plaine de l'Hérault) .....	268
Fig. A10_2 : TIN basé sur la topographie_1995, et localisation de transects .....	269
Fig. A10_3 : TIN basé sur la topographie_1985, et localisation de transects .....	269
Fig. A10_4 : présentation des deux topographies sous forme de transects (la localisation des transects est présentée sur les figures Fig. A10_2 et Fig. A10_3).....	269
Fig. A10_5 : mesures GPS réalisées sur des cheminements au sein de la plaine de l'Hérault (seul un point sur dix est représenté) .....	270
Fig. A10_6 : cohérence des mesures GPS acquises en mode cinématique par comparaison des résultats sur un même cheminement (plaine de l'Hérault).....	271
Fig. A10_7 : zone couverte par la mesure Lidar (Hérault).....	272
Fig. A10_8 : écart entre les mesures GPS et les mesures Lidar .....	273
Fig. A10_9 : localisation des cinq transects réalisés sur la zone d'emprise Lidar pour analyser la qualité des topographies de 1985 et 1995 provenant de photogrammétrie .....	274
Fig. A10_10 : comparaison des topographie_1995, topographie_1985 avec le Lidar .....	275
Fig. A11_1 : estimations sur la Moselle sans et avec l'application des contraintes temporelles (les bénéfices sont faibles car les écarts sont trop importants) (en noir : mai 1983 et en rouge : décembre 1982) .....	278

## *Index des tableaux*

### Document principal :

Tableau 2-1 : technologies spatiales de restitution du relief .....	36
Tableau 3-1 : facteurs affectant la qualité des données géographiques [Burrough et McDonnell, 1998] .....	70
Tableau 5-1 : liste des principales données recueillies sur le site "Hérault" .....	97
Tableau 5-2 : principales caractéristiques des deux crues étudiées sur le site "Moselle" .....	100
Tableau 5-3 : liste des principales données recueillies sur le site "Moselle" .....	101
Tableau 5-4 : liste des principales données recueillies sur le site "Aisne" .....	105
Tableau 5-5 : tableau synthétique de la diversité des sites d'étude.....	106
Tableau 6-1 : description de l'espace orientée par l'hydraulique .....	121
Tableau 7-1 : les deux relations de cohérence hydraulique qui doivent être satisfaites.....	123
Tableau 9-1 : taille maximale des compartiments pour chaque site d'étude .....	156
Tableau 9-2 : caractéristiques des structures hydrodynamiques retenues.....	160
Tableau 9-3 : typologie des points cotés situés dans une zone informative.....	161
Tableau 9-4 : bilan des indications {NE} récoltées par la voie "points cotés" .....	163
Tableau 9-5 : indications de hauteurs déduites de l'état de submersion des digues .....	164
Tableau 9-6 : indications de hauteurs déduites de l'état de submersion des parcelles de vigne .....	170
Tableau 9-7 : bilan des indications {NE} récoltées .....	170
Tableau 10-1 : présentation synthétique du déroulement de l'algorithme sur chaque site .....	174
Tableau 10-2 : résultats finaux de "l'approche-photo" (après exclusion des compartiments situés aux extrémités amont et aval) .....	176
Tableau 11-1 : caractéristiques du jeu "résultat" provenant de l'approche "photo" .....	182
Tableau 12-1 : statistiques sur les estimations [Min ; Max] issues de "l'approche-photo" en fonction du nombre d'informations {NE} par compartiment (moyennes sur les 100 tirages aléatoires, cas de l'Hérault) .....	201
Tableau 13-1 : les trois configurations de strickler testées.....	209
Tableau 13-2 : statistiques des différences entre les valeurs de repères de crue et hauteurs maximales atteintes pour chaque simulation.....	210
Tableau 13-3 : statistiques sur les écarts entre les hauteurs issues des simulations et les plages d'estimation de "l'approche-photo" (cas des photographies verticales et obliques sur le site de l'Hérault) .....	212
Tableau 13-4 : statistiques sur les différences entre les mesures GPS et les cotes obtenues par 1) simulation hydraulique S15_30 ; 2) "approche-photo" (cas de l'Hérault pour les clichés obliques et verticaux).....	213
Tableau 14-1 : positionnement de "l'approche-photo" par rapport à l'approche hydrogéomorphologique et à la modélisation hydraulique numérique (* : faible ; ** : moyen ; *** : élevé ; **** : très élevé --- P.A. = Photographie Aérienne) .....	216

### Annexes :

Tab. A4_ 1 : précisions théoriques des restitutions photogrammétriques pour une chambre métrique de 23*23 cm (tiré de [Doridot et Garry, 1987]).....	252
Tab. A10_ 1 : statistiques sur les écarts entre valeurs GPS et valeurs Lidar .....	272
Tab. A10_ 2 : statistiques sur les différences entre l'altimétrie Lidar et les points cotés issus de photogrammétrie pour les deux campagnes de 1985 et 1995 (site de l'Hérault) .....	273
Tab. A10_ 3 : statistiques sur les différences entre mesure GPS et topographie_1995 (Hérault) .....	276
Tab. A11_ 1 : effet des contraintes temporelles sur le site Hérault.....	277
Tab. A11_ 2 : effet des contraintes temporelles sur le site Moselle.....	278

## ***Sigles et abréviations***

B.R.G.M. : Bureau de Recherche Géologiques et Minières.

Cemagref : La Recherche pour l'Ingénierie de l'Agriculture et de l'Environnement.

Cetmef : Centre Techniques d'Études Maritimes et Fluviales.

*cf.* : confer (renvoi à)

CG : Conseil Général.

DiREn : Direction Régionale de l'Environnement.

*e.g.* : exempli gratia (par exemple)

GPS : Global Positioning System

*i.e.* : id est (c'est-à-dire)

IA : Intelligence Artificielle

IGN : Institut Géographique National.

Lidar : LIght Detection And Ranging

NGF : Nivellement Général Français.

REVISGIS : Revision in GIS

TIN : Triangulated Irregular Network.



## **Résumé :**

### **Méthodologie d'exploitation quantitative des photographies aériennes d'inondation de plaine**

Ce travail est centré sur la mise au point d'une méthodologie d'exploitation de photographies aériennes prises en période de crue pour en extraire, au moment de la prise de vue, la cote de l'eau en tout point de la plaine. Cette méthodologie, appelée "approche-photo", comporte une phase de traitement de télédétection, une phase d'analyse spatiale et de structuration de l'information dans un SIG, et une phase novatrice et originale de fusion et mise en cohérence de l'ensemble des données extraites (développement d'un algorithme de mise en cohérence inspiré de l'hydraulique et de techniques empruntées au domaine de l'intelligence artificielle). La méthode a été testée sur trois sites d'étude, couvrant un panel très large de contextes. Un travail important de validation et d'analyse de sensibilité a permis de montrer que la précision des estimations de la cote de l'eau, produites sous forme de fourchette [Min, Max], était de l'ordre décimétrique, résultat tout à fait compatible avec les exigences hydrauliques. "L'approche-photo" constitue donc une valorisation quantitative des archives photographiques concernant les crues historiques. Une première retombée provient de la structuration de ces résultats au sein d'un SIG, ce qui les rend facilement mobilisables pour toutes les étapes de la gestion du risque d'inondation. Une seconde retombée, bien plus importante, résulte de la complémentarité de "l'approche-photo" avec les approches traditionnelles. Celle avec la modélisation hydraulique a été approfondie par la mise en œuvre d'un modèle 2D sur la basse vallée de l'Hérault. Une confrontation des résultats a permis de mettre en avant les apports réciproques : "l'approche-photo" comme aide à la structuration, au calage et à la validation de la modélisation et, à l'inverse, la modélisation hydraulique comme aide à la validation de "l'approche-photo". Cette thèse se veut une illustration de l'intérêt d'une démarche multidisciplinaire.

*Mots-clés : Inondation – plaine d'inondation – photographie aérienne – télédétection – hydraulique – modélisation – analyse spatiale – qualité – fusion – mise en cohérence – problème de satisfaction de contraintes*

## **Abstract :**

### **Methodology for a quantitative valorization of aerial photographs taken during flood**

The main aim of this work is to develop a methodology to get profits on aerial photographs taken during flooding. More precisely, it consists in extracting water level at any points of the floodplain when photographs were taken. The suggested methodology, called "photo-approach", begins with a remote sensing step, continues with a spatial analysis and a GIS structuration step, and ends with an innovative and original step consisting in fusion and consistency handling of the whole of the extracted data (algorithm linking hydraulics and artificial intelligence techniques). The method was tested on three sites of study, covering a very broad panel of contexts. An important work of validation and sensitivity analysis proved that precision of water levels estimates, produced in the form [Min, max ], were of decimeter order. This results appear to be completely compatible with hydraulic requirements. The "photo" approach thus constitutes a quantitative valorization of the photographic archives concerning the historical floods. The first repercussion of the "photo-approach" comes from the SIG databases structuring, which generates an easy access to results for all steps of the flood risk management. The second repercussion, much more important, results from possible linkage between the "photo-approach" and traditional approaches. The complementarity study with hydraulic modelling was made with a 2d model on the Hérault river valley. A confrontation of the results shows mutual contribution : 1) "photo" approach for an assistance with the structuring, the parametrization and the validation of hydraulic modelling; 2) on contrary, hydraulic modelling for an help with the "photo" approach validation. This thesis may appears as an illustration of the interest of a multidisciplinary approach.

*Key-words : flood – floodplain – aerial photographs – remote sensing – hydraulics – modelling – spatial analysis – quality – fusion – consistency – constraints satisfaction problem*