HAL
open science

Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine

Jean-Baptiste Henry

To cite this version:

Jean-Baptiste Henry. Systèmes d'information spatiaux pour la gestion du risque d'inondation de plaine. Géographie. Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 2004. Français. NNT : . tel-00009093

HAL Id: tel-00009093

https://theses.hal.science/tel-00009093

Submitted on 26 Apr 2005

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.

Université Louis Pasteur - Strasbourg I
Faculté de Géographie et d'Aménagement
Ecole Doctorale des Sciences de la Terre, de l'Univers et de l'Environnement

Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection

THESE

Présentée pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE STRASBOURG I

en Géographie Physique

par
Jean-Baptiste HENRY

SYSTEMES D'INFORMATION SPATIAUX POUR LA GESTION DU RISQUE D'INONDATION DE PLAINE

Soutenue publiquement le 1er avril 2004, devant le jury composé de :

François BECKER, ENSPS/ULP, Strasbourg (F), Président du jury
Lucien HOFFMANN, CREBS/CRP-GL, Luxembourg (L), Membre du jury
André MUSY, HYDRAM/EPFL, Lausanne (CH), Rapporteur externe
Patrice PAUL, ULP, Strasbourg (F), Directeur de thèse
Christian PUECH, LCT/CEMAGREF, Montpellier (F), Rapporteur externe
Marc-Philippe STOLL, LSIIT/ENSPS/ULP, Strasbourg (F), Rapporteur interne

Jean-Paul ABADIE, CNES, Toulouse (F), Invité
Yves-Louis DESNOS, ESRIN/ESA, Frascati (I), Invité
Jean-Paul GOUTORBE, Météo France, Toulouse (F), Invité

Tout arrive par hasard et par nécessité

Démocrite, v. 460–370 av. J.-C.

Remerciements

Je tiens à remercier ici tous les gens qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail de longue haleine. Cette étude a été réalisée sur plusieurs projets de recherches financés par les instances nationales et internationales, telles que le Ministère de la Recherche, le Centre National d'Etudes Spatiales, ou l'Agence Spatiale Européenne. Les multiples collaborations entre le SERTIT (Service Régional de Traitement d'Image et de Télédétection) et les laboratoires compétents ont permis d'aboutir aux résultats présentés dans ce travail.

Mes plus sincères remerciements vont avant tout à Paul de Fraipont, directeur du SERTIT, qui m'a confié les travaux techniques et scientifiques sur différents projets de recherche impliquant les techniques spatiales pour la gestion des inondations. Je veux le remercier de m'avoir permis d'exercer mon métier d'ingénieur sur des problématiques concrètes et motivantes, pour sa confiance et les conseils qu'il a su me faire partager au cours de l'étude.

Au même titre, je tiens remercier vivement Patrice Paul, professeur de l'Université Louis Pasteur, pour avoir accepté de prendre la direction de cette thèse. Son implication et son intérêt se sont manifestés dès mes travaux de DEA dans le même domaine. Son appui a été des plus utiles pour de nombreux volets de ce travail.

Ma vive gratitude va envers MM. Lucien Hoffmann, Laurent Pfister et Patrick Matgen du Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann de Luxembourg pour avoir considérablement contribué aux derniers travaux présentés dans cette étude ; avec une attention particulière pour Patrick après l'étroite collaboration menée durant ces derniers mois, pour ses coups de main et ses relectures.

Je tiens aussi à remercier Pierre Chastanet pour la collaboration menée sur les données ENVISAT, lors de son *Young Graduate Period* à l'ESA, et notamment sur la polarisation. Un grand merci également à Yves-Louis Desnos qui a dirigé cette étude, et qui a su faire preuve d'une grande rapidité de réaction lors de la rédaction du papier la présentant, lorsque les calendriers se sont un peu bousculés.

Je remercie sincèrement tous mes collègues et amis du SERTIT : Bernard Allenbach, avec qui j'ai partagé le bureau pendant ces trois années ('s Läwe isch e Kampf !) et qui a fait preuve d'une grande patience pour la relecture de ce mémoire. Il a su me faire partager son sens de la mesure et de la critique constructive des résultats obtenus. Stephen Clandillon, avec qui je conserve des rapports professionnels privilégiés suite à la réalisation de mon PFE et de mon DEA sous sa direction. Je tiens à le remercier tout particulièrement pour son aide précieuse pour la rédaction des articles et communications en anglais, pour sa patience et son savoir-faire lors de ces relectures. Hervé Yésou, pour son aide bibliographique incomparable, ses fréquentes relectures attentives et ses conseils avisés au cours des travaux et de la rédaction. Nadine Tholey, un de mes chefs de projet qui m'a permis de me consacrer uniquement aux données et traitements. Kader Fellah, mon autre chef de projet, pour son aide et ses conseils sur l'analyse des

images radar, l'élaboration des documents d'étude sur ENVISAT et bien d'autres points encore. Claude Bestault pour sa bonne humeur et sa disponibilité quasi-totale pour m'aider à scanner des documents, graver les sauvegardes, fouiller les archives, imprimer les posters, négocier les impressions couleur... bref, pour toutes ces petites choses vite faites qui font perdre la journée ! Colette Meyer et Boubi (alias Hubert Scius) pour leur bonne humeur et leur disponibilité quotidienne.

Plusieurs parties de cette étude n'auraient pû aboutir à un tel point sans l'aide de Lionel Magallon (qui est notamment coupable de ma conversion, pas trop mal réussie, à LaTeX 2_ε), Yannick Lafue, Christophe Bonnet, Séverine Eburdy, Muriel Vichard et Elise Meyer.

Enfin, mes plus sincères remerciements et toute mon affection vont à Anne-Laure mon épouse, qui m'a supporté (et c'est peu de le dire !) pendant les moments difficiles, les petits passages à vide, qui m'a encouragé à travailler dur et à tenir mes délais au mieux. Merci pour tout le temps passé à relire, corriger, reformuler... Je sais que pendant ces trois ans, je n'ai pas toujours été un modèle de calme et de disponibilité, mais je vais me rattraper.

Résumé

L'utilisation des moyens d'observation de la Terre pour l'étude des inondations de plaine constitue la problématique de ce travail. Appliquée aux bassins de la Moselle et de l'Elbe, la démarche est fondée sur une gestion du risque en trois phases : prévision et anticipation, gestion de crise, retour d'expérience et prévention. Les différents niveaux d'exploitation des techniques spatiales d'acquisition et d'analyse pour modéliser, cartographier et évaluer le risque d'inondation de plaine sont abordés dans trois études de cas, dédiées chacune à une phase.

En prévision et en anticipation, l'intégration d'informations spatialisées constitue une des applications clef de l'observation de la Terre. Au sein du bassin versant, les processus naturels sont étudiés grâce à l'imagerie radar et aux mesures *in situ* pour obtenir des indicateurs pertinents de la saturation en eau des sols. Puis, une méthode de classification fondée sur des outils statistiques classiques est proposée pour l'identification de zones aux comportements hydrauliques homogènes. Enfin, une stratégie de calage des modèles de propagation de crue est construite, prenant en compte les incertitudes du modèle lui-même et de toutes les sources d'information utilisées (radar, terrain).

La cartographie de l'extension de l'inondation est exploitable tant pour caler les modèles hydrauliques, que pour fournir un support d'aide à la gestion de crise. L'instrument radar d'ENVISAT offre de nouvelles solutions techniques pour la seconde phase, notamment par ses capacités tous temps, multi-incidences, multi-polarisations et multi-résolutions. Les premières images d'inondation acquises par ce nouveau capteur permettent tout d'abord d'analyser la qualité radiométrique des produits d'imagerie ; puis d'évaluer les possibilités offertes par l'utilisation simultanée de deux polarisations pour obtenir une cartographie fiable ; enfin, de s'intéresser à l'utilisation des données à moyenne résolution.

L'imagerie spatiale, notamment optique, alimente la phase de prévention en décrivant les enjeux, au sens des biens et des personnes, et leur évolution au cours du temps. D'une part, les vastes archives de l'observation de la Terre permettent de cartographier la dynamique des territoires sur près de quarante ans. D'autre part, ces produits interprétés fournissent une base géographique utilisable pour géolocaliser des données communales sur les populations. Finalement, leur combinaison avec une information sur l'aléa fournit une évaluation de la vulnérabilité des populations et des territoires, ainsi que du degré de prise en compte du risque dans leur aménagement.

En s'intéressant à la chaîne de gestion du risque dans son ensemble, ce travail montre l'aptitude des techniques d'acquisition et d'analyse spatiale à fournir une information pertinente pour la caractérisation de l'aléa, des enjeux et de leur vulnérabilité au travers d'applications et d'exemples concrets.

Abstract

This work is centred on the use of Earth observation and geospatial analysis techniques for modelling, mapping and evaluating plain flood risk. Within the Moselle and Elbe river catchments, the approach considers three major phases in risk management : prevision and forecasting, crisis management, mitigation and prevention. Different exploitation levels of spaceborne acquisition and spatial analysis techniques are addressed through three case studies for modelling, mapping and evaluating plain flood risk.

Enabling the integration of spatially distributed information constitutes a key contribution of Earth observation to the first phase. At the catchment scale, natural processes are studied with combined radar imagery and *in situ* measurements, in order to obtain pertinent indicators on soil water saturation. Then, a statistics-based clustering method is proposed for the identification of homogeneous hydraulic behaviour patterns. Finally, a parameterization strategy for flood propagation models is established, accounting for both model and information source uncertainties (radar, field).

Flood extent maps are suitable for both adjusting models and providing a crisis management support. The ENVISAT radar instrument proposes new technical solutions for the second phase, especially with its multi-incidence, multi-polarization and multi-resolution capabilities. The first images of this new sensor enable, a radiometric quality analysis of its imagery products ; an evaluation of the bi-polarization mode's potential to obtain a reliable map within a flood mapping context ; and finally, the appreciation of both the pertinence and the usefulness of medium resolution data.

Space imagery, especially optical, can also be fed into the prevention phase with a description of stakes, including both property and people, and their evolution over time. Extensive Earth observation archives allow a forty-year urban development mapping, and these interpreted products constitute a valuable geographical base for modelling population densities. Finally, their combination with information on a hazard gives an evaluation of both social and economic vulnerabilities, and indicate the extent to which natural hazard risks are taken into account during urban development processes.

Focussed on the whole risk management chain, this study shows the ability of Earth observation and spatial analysis techniques to provide valuable information for characterizing hazards, stakes and their related vulnerabilities through concrete applications and examples.

Zusammenfassung

Hauptziel dieser Arbeit ist die Evaluierung der Fernerkundung zur Abschätzung der Hochwasserrisiken in den Flussebenen. Modellierung, Kartographie und Risikostudien sind dabei mögliche Anwendungsbeispiele die in diesem Zusammenhang untersucht werden. Angewandt in den Einzugsgebieten der Mosel und der Elbe, besteht die in der vorliegenden Arbeit vorgestelllte Methode des Hochwasserrisiko-Management aus drei aufeinanderfolgenden Etappen : Vorhersage und Antizipation, Krisenmanagement und Vorbeugung durch Schutzmassnahmen. Drei Fallbeispiele werden in dieser Studie vorgestellt, wobei jedes einer bestimmten Etappe gewidmet ist. Diese Beispiele sollen dabei helfen die verschiedenen Anwendungsbereiche der Fernerkundung in diesem Zusammenhang zu veranschaulichen.

Im Falle der Vorhersage und Antizipation, ist die Integration räumlicher Informationen, die Schlüsselrolle die der Fernerkung zugeteilt ist. Im Masstab des Einzugsgebiet werden die hydrologischen Prozesse mittels Radar- und Feldmessungen untersucht. Diese Messungen werden dazu benutzt Indikatoren des Sttigungsgrades der Böden abzuleiten. Statistische Methoden der Klassifizierung ermöglichen daraufhin die Einteilung des mit Fernerkundung erfassten Raumes in Teilgebiete die sich durch einhaltliche hydraulische Eigenschaften auszeichnen. Schliesslich, wird eine Methode zur Kalibrierung hydraulischer Hochwassermodelle entwickelt, welche die Unsicherheiten sowohl der Struktur des Modelles als auch der Inputdaten berücksichtigt (Radar- und Feldmessungen).

Die Ermittlung von Überschwemmungsflächen mittels Fernerkundung ermöglicht nicht nur die Kalibrierung von hydraulischen Modellen, sondern stellt auch eine wertvolle Entscheidungsgrundlage während des Krisenmanagements dar. In dieser zweiten Etappe des Hochwasserrisiko-Management kann man vor allem dem Radarinstrument an Bord von ENVISAT durch die neuartigen Abbildungsmodi (Einfallswinkel, Polarisation, Auflösung) ein grosses Potential bescheinigen. Die ersten Bilder dieses neuen Messgerätes ermöglichen zunächst die Untersuchung der radiometrischen Qualität des Produktes und der neuen Kartographie-Möglichkeiten die sich durch die gleichzeitige Abbildung mit zwei verschiedenen Polarisationen ergeben. Schliesslich, wird auch noch die Benutzung von Daten mit mitllerer Auflösung analysiert.

Die Etappe der Vorbeugung wird vor allem durch die optischen Abbildungen erleichtert, indem man die dynamische Entwicklung sowohl der Bevölkerung als auch der Infrastruktur durch die Fernerkung erfasst. Einerseits ermöglicht die historische Datenbank der Erdbeobachtung die Kartierung der räumlichen Entwicklung während der letzten 40 Jahre und andererseits, kann man diese Produkte als geographische Basis dazu benutzen die kommunalen Daten zur Bevölkerung ebenfalls räumlich darzustellen. Die Verbindung mit den Informationen zu den Gefahren ermöglicht wiederum die Entwicklung der Vunerabilit sowohl der Bevölkerung als auch des Raumes zu verfolgen. Dadurch lässt sich abschätzen inwiefern das dadurch entstandene Risiko in der Landesplanung berücksichtigt wurde.

Table des matières

Introduction générale **3**

I Risque d'inondation et télédétection aérospatiale **7**

Introduction **9**

1 Le cadre opérationnel : les risques d'inondation **11**
1.1 Le risque et ses composantes 11
1.2 Propositions 17
1.3 La gestion des inondations en France 19
1.4 Conclusions 24
1.5 Bibliographie 25

2 Principes de télédétection **29**
2.1 Télédétection optique passive 29
2.2 Télédétection radar 33
2.3 Bibliographie 52

3 Observation de la Terre et inondations **57**
3.1 Introduction 57
3.2 La prévision et l'anticipation 58
3.3 La gestion de crise 63
3.4 Le retour d'expérience et la prévention 69
3.5 Perspectives actuelles 71
3.6 Conclusions 73
3.7 Bibliographie 75

II Intégration et exploitation des données d'observation de la Terre pour la gestion des inondations **87**

Introduction **89**

4 Paramètres spatialisés pour la modélisation **91**
4.1 Problématique et objectifs 91
4.2 Constitution de la base de données 92
4.3 Approche empirique 99
4.4 Segmentation de la plaine alluviale 110
4.5 Validation croisée des méthodes de cartographie 120
4.6 Conclusions 121
4.7 Bibliographie 123

5 Cartographie des inondations avec l'ASAR **127**
5.1 Problématique et objectifs . . . 127
5.2 Constitution de la base de données . . . 128
5.3 Mesure et influence de la résolution radiométrique . . . 133
5.4 Analyse thématique des données polarisées . . . 139
5.5 Influence de la résolution spatiale . . . 148
5.6 Conclusions . . . 149
5.7 Bibliographie . . . 152

6 Impact des inondations et analyse de vulnérabilité **155**
6.1 Problématique et objectifs . . . 155
6.2 Constitution de la base de données . . . 156
6.3 Impact sur les zones urbaines . . . 163
6.4 Impact sur la population . . . 173
6.5 Conclusions . . . 183
6.6 Bibliographie . . . 184

Conclusions et perspectives **189**

Contenu des annexes **1**

A Spécifications des systèmes d'observation de la Terre **1**
A.1 Systèmes de télédétection optique . . . 1
A.2 Systèmes radar imageurs . . . 10
A.3 Bibliographie . . . 21

B Projets et programmes **25**
B.1 Le programme PACTES . . . 25
B.2 Le projet TecSpIn . . . 26
B.3 Le programme EOMD . . . 28

C Documents cartographiques **31**

D Publications **49**

Table des figures

1.1 Répartition des risques naturels, ayant des enjeux humains sur le territoire français 12
1.2 Carte d'occurence d'un aléa d'intensité fixée 18

2.1 Le spectre électromagnétique 30
2.2 Fenêtres atmosphériques et spectres d'émission du Soleil et de la Terre 30
2.3 Absorption, réflexion et transmission 31
2.4 Signatures spectrales de végétations arborées 32
2.5 Influence de la géométrie des réflecteurs selon la polarisation 35
2.6 Domaines de validité des modèles théoriques 37
2.7 Géométrie d'acquisition radar 38
2.8 Distorsions géométriques de l'imagerie radar 41
2.9 Géométrie du déplacement du relief par l'imagerie radar 44
2.10 Gain en résolution radiométrique par sommation temporelle simple 47
2.11 Evolution du σ_0 pour un sol sous différentes conditions hydriques 49

4.1 Configuration de la plaine alluviale de l'Alzette (Luxembourg) et localisation des stations piézométriques 93
4.2 Relations entre la hauteur de la nappe et les débits, contribution des eaux souterraines au débit, séparation des écoulements sur une année hydrologique 95
4.3 Relations entre grandeurs hydrologiques et hydrauliques caractéristiques du bassin de l'Alzette 95
4.4 Couverture ERS-1 et 2 de l'Alzette 98
4.5 Comportement du coefficient de rétrodiffusion sur différentes emprises 100
4.6 Variation du σ_0 en fonction des cumuls pluviométriques 102
4.7 Différences image à image 102
4.8 Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et le cumul pluviométrique sur 7 jours 103
4.9 Amplitude annuelle des battements de la nappe sur un profil en travers de la rivière 104
4.10 Relation entre profondeur moyenne de la nappe et rétrodiffusion radar sur la zone d'étude amont 105
4.11 Localisation des parcelles d'étude et relations avec les profondeurs de nappe mesurées aux piézomètres les plus proches 106
4.12 Variations des profondeurs de nappe et de l'indice de saturation sur la période d'étude 1993-1994 108
4.13 Relation entre indice de saturation et rétrodiffusion radar sur la zone détude amont 108
4.14 Relations entre mesure radar et indice de saturation sur les parcelles d'étude . . 109
4.15 Composantes principales extraites de la série temporelle 1993-94 112
4.16 Classes de comportements identifiées dans la plaine alluviale à partir des deux premières composantes 113
4.17 Signatures radar de parcelles classées dans la plaine alluviale et réponses piézométriques correspondantes 114

4.18 Classes de comportements identifiées dans le champ d'inondation à partir des deux premières composantes . . . 116
4.19 Signatures radar de parcelles classées dans l'extension maximale du champ d'inondation et réponses piézométriques correspondantes à la station de Bivange-Steich 116
4.20 Premières composantes de l'ACP incrémentale . . . 118
4.21 Premières composantes de l'ACP décrémentale . . . 119

5.1 Vues sur la crue de l'Elbe en août 2002. . . . 129
5.2 Localisation géographique des données ERS . . . 130
5.3 Localisation géographique des données ENVISAT . . . 131
5.4 Localisation géographique des données optiques . . . 132
5.5 Densités de probabilité observées, ajustées sur une loi Gamma et une K-distribution 134
5.6 Coefficient de rétrodiffusion moyen et écart-type sur les données ASA-APP, ASA-IMP et ERS PRI . . . 137
5.7 Résumé des signatures obtenues par pseudo-calibration . . . 139
5.8 Données ASAR APP sur Dresde, polarisations HH et HV . . . 140
5.9 Caractéristiques thématiques des données SAR en fonction de la polarisation . . 141
5.10 Donnée Landsat TM et composition colorée des données ASAR et ERS . . . 142
5.11 Données IMP et PRI acquises le 19/08/02 . . . 143
5.12 Effets du vent sur les plans d'eau . . . 144
5.13 Histogrammes des données HH, VV et VH . . . 144
5.14 Localisation du profil spatial sur la composition colorée d'images filtrées Gamma-MAP . . . 145
5.15 Inondation observée et extraite en polarisation VV, HH et HV . . . 146
5.16 Comparaison des produits IMP et IMM . . . 149
5.17 Comparaison de l'extraction de l'inondation . . . 150

6.1 Emprises des données CORONA sur le secteur Metz-Thionville . . . 160
6.2 Transformation spectrale et injection du panchromatique . . . 162
6.3 Photographies CORONA sur Metz . . . 164
6.4 Algorithme de correction des données CORONA . . . 165
6.5 Photo-interprétation du masque urbain sur l'agglomération de Metz . . . 166
6.6 Classification thématique sur Metz, selon le niveau détaillé (tab. 6.4) . . . 167
6.7 Classification contextuelle en 24 classes élaborée sur Metz . . . 168
6.8 Extension des zones urbaines dans le secteur de Metz, de 1962 à 2000 . . . 169
6.9 Impact d'une crue similaire à 1947 sur le bâti et son évolution . . . 171
6.10 Impact d'une crue similaire à 1983 sur le bâti et son évolution . . . 172
6.11 Comparaison des représentations de la population . . . 175
6.12 Modélisation linéaire de la population à partir de la surface bâtie . . . 176
6.13 Représentations cartographiques de l'information spatialisée de population . . . 177
6.14 Modélisation gaussienne de la population à partir de trois classes de bâti . . . 178
6.15 Modélisation de la population à partir de la classification contextuelle . . . 179
6.16 Spatialisation de la population . . . 180
6.17 Erreurs d'estimation des modèles selon le niveau de segmentation de l'espace urbain 181
6.18 Impact d'un crue d'ampleur similaire à 1947 sur le centre de Metz . . . 182

A.1 Géométrie d'acquisition du système stéréoscopique KH-4 . . . 3
A.2 Constitution de la caméra KH-4B . . . 4
A.3 Le système Push Broom . . . 7
A.4 Le satellite ENVISAT en orbite . . . 13
A.5 Couverture spectrale des instruments d'ENVISAT . . . 14
A.6 Les modes d'acquisition de l'ASAR d'ENVISAT . . . 14

A.7 Mesure du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de la polarisation de l'onde, de l'angle d'incidence et de la date d'acquisition 16
A.8 Mesure du coefficient normalisé de rétrodiffusion radar en fonction de l'occupation du sol, de la polarisation et de la période de l'année 17

C.1 Plaine alluviale de l'Alzette 32
C.2 Zones de comportements hydrauliques homogènes obtenues par segmentation de la plaine alluviale et du champ d'inondation maximal 33
C.3 Carte de l'inondation de Janvier 2003 sur le tronçon Steinsel-Mersch 34
C.4 Carte de l'inondation de Janvier 2003 sur le tronçon Livange-Hespérange 35
C.5 Fréquence d'inondation du tronçon aval de l'Alzette 36
C.6 Cartes d'inondation pour les débits caractéristiques 37
C.7 Couverture ASAR de la vallée de l'Elbe en août 2002 38
C.8 Crue de l'Elbe, situation à Dresde le 17/08/02 39
C.9 Cours de la Moselle entre Metz et Thionville - Secteur d'étude du programme PACTES 40
C.10 Principaux réseaux entre Metz et Thionville 41
C.11 Crue de 1947 de la Moselle 42
C.12 Impact d'une crue similaire à 1947 sur le paysage de 2000 43
C.13 Crue de 1983 de la Moselle 44
C.14 Impact d'une crue similaire à 1983 sur le paysage de 2000 45
C.15 Impact d'une crue similaire à 1947 sur la population recensée en 1999 46
C.16 Impact d'une crue similaire à 1983 sur la population recensée en 1999 47

Liste des tableaux

2.1 Bandes radar, plages de fréquences et de longueurs d'onde 34
2.2 Résolution radiométrique en fonction de l'échelle d'analyse 48
2.3 Relations empiriques liant humidité de surface et coefficient de rétrodiffusion radar 49
2.4 Systèmes optiques actuels, anciens et futurs 50
2.5 Systèmes radar actuels, anciens et futurs 51

4.1 Base de données ERS sur l'Alzette 96
4.2 Situations hydrauliques lors de l'acquisition des images radar de 93-94 101
4.3 Coordonnées des trois premières composantes principales sur la plaine alluviale . 111
4.4 Coordonnées des trois premières composantes principales sur le champ d'inondation 115
4.5 Corrélation entre les facteurs et les variables pour l'ACP incrémentale 118
4.6 Corrélation entre les facteurs et les variables pour l'ACP décrémentale 119

5.1 Estimation des pertes économiques liées aux inondations d'août 2002 128
5.2 Données ERS disponibles sur l'Elbe 130
5.3 Principales spécifications et caractéristiques des images radar acquises le 19/08/02 sur l'Elbe 131
5.4 Résolutions radiométriques des images RSO d'ENVISAT et ERS sur l'Elbe, ajustement des distributions 135
5.5 Adéquation entre polarisation et thématique d'occupation du sol 140
5.6 Complémentarité des polarisations pour l'inventaire des surfaces inondées 147

6.1 Données CORONA exploitées 159
6.2 Données SPOT sur la Moselle 161
6.3 Base de données IGN 163
6.4 Nomenclature de la classification d'occupation du sol 166
6.5 Statistiques de la croissance de l'extension urbaine sur quelques communes . . . 169
6.6 Impact d'une crue similaire à 1947 sur l'occupation du sol de 2000 170
6.7 Impact d'une crue similaire à 1983 sur l'occupation du sol de 2000 170
6.8 Evaluation de l'impact sur la population de crues similaires à 1947 et 1983 183

A.1 Systèmes photographiques KH 2
A.2 Bandes spectrales de SPOT et propriétés 6
A.3 Modes spectraux du système SPOT 6
A.4 Niveaux de pré-traitement de l'imagerie SPOT 8
A.5 Modes d'acquisition d'IKONOS 9
A.6 Modes d'imagerie de RADARSAT 12
A.7 Caractéristiques des différents mode d'imagerie d'ENVISAT 19

Liste des sigles et acronymes

ACP : Analyse en Composantes Principales
APM : Alternating Polarization, moyenne résolution (75 m)
APP : Alternating Polarization, haute résolution (12.5 m)
ASAR : Advanced Synthetic Aperture Radar
AVHRR : Advanced Very High Resolution Radiometer
CCRS : Canadian Centre of Remote Sensing
CNES : Centre National d'Etudes Spatiales
CREBS-CRPGL : Cellule de REcherche en BiotechnologieS - Centre de Recherche Public Gabriel Lippmann
DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
DDE : Direction Départementale de l'Equipement
DIREN : Direction Régionale de l'Environnement
DDE : Direction Départementale de l'Equipement
DMSP-OLS : Defense Meteorological Satellite Program - Optical Linescan System
DRE : Direction Régionale de l'Equipement
EMZ : Etat-Major de Zone
EOMD : Earth Observation Market Development
ERS : Earth Ressources Satellite
ESA : European Space Agency
GPS : Global Positionning System
HRV : Haute Résolution Visible
HRVIR : Haute Résolution Visible et Infra Rouge
IFEN : Institut Français de l'Environnement
IMM : Image Mode, moyenne résolution (75 m)
IMP : Image Mode, haute résolution (12.5 m)
MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement
MEDD : Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable
MNE : Modèle Numérique d'Elévation
MNT : Modèle Numérique de Terrain
NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration
NRO : National Reconnaissance Office
PACTES : Prévention et Anticipation des Crues au moyen des Techniques Spatiales
PIAO : Photo-Interprétation Assistée par Ordinateur
PLU : Plan Local d'Urbanisme
POS : Plan d'Occupation des Sols
PPR : Plan de Prévention des Risques
PRATIS : Partenariat Régional d'Acquisition et de Traitement d'Images Satellite
PRI : Precision Image
RTE : Réseau Terre et Espace
RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture
SAC : Service d'Annonce de Crues

SAR : Synthetic Aperture Radar
SDIS : Service Départemental d'Incendie et de Secours
SIG : Système d'Information Géographique
SPOT : Satellite Probatoire d'Observation de la Terre
TecSpIn : Techniques Spatiales pour la gestion des Inondations
UNDRO : United Nations Disasters Relief Organisation

Les références à des sites Internet sont notées avec un @ après le nom de l'organisme, *e.g.* la référence au site du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD) est notée MEDD@.

Liste des variables

α : angle d'incidence local, entre la normale au terrain et le faisceau imageur (deg.)
δ_a : résolution azimutale (m)
θ : angle de dépression (deg.)
$\Gamma(x) = (x-1)!$: fonction gamma
λ : longueur d'onde (m)
σ_0 : coefficient de rétrodiffusion (dB)
$\bar{X}$ ou $\langle X \rangle$: moyenne de la variable X

A : amplitude
B_D : bande passante (Hz)
c : célérité de la lumière dans le vide (m.s^{-1})
C_v : coefficient de variation
$DN_{i,j}$: compte numérique au pixel (i, j)
D_t : densité thématique (hab.km^{-2})
D_u : densité urbaine (hab.km^{-2})
ENL ou L : *Equivalent Number of Looks*, nombre de vues équivalent
fdp : fonction densité de probabilité
FRI : Fréquence de Répétition des Impulsions (Hz)
f_D : fréquence Doppler (Hz)
F_e : fréquence d'échantillonnage (Hz)
I : intensité
IB : Indice de Brillance
INH : Indice Normalisé d'Humidité
K : constante de calibration
kl : longueur de corrélation (m)
$K_n(x)$: fonction modifiée de Bessel de deuxième espèce d'ordre n
ks : hauteur quadratique moyenne (m)
MIR : Moyen Infra Rouge
m_v : teneur en eau volumique (%)
$NDVI$: Normalized Differential Vegetation Index
P : pente
PAN : panchromatique
PIR : Proche Infra Rouge
R : réflectivité radar
$R_d(t)$: distance radiale (m)
R_0 : altitude de la plate forme (m)

Introduction générale

Introduction générale

Événements récurrents partout dans le monde, les inondations constituent le risque naturel majeur le plus répandu sur le globe. Tantôt bénéfiques, tantôt dévastatrices, elles font partie du cycle saisonnier. Ainsi, pour conquérir plus de territoire, l'Homme a depuis longtemps composé avec la Nature, soit en vivant simplement à ses côtés, soit en tentant de la domestiquer. Au cours des derniers siècles, les progrès techniques et scientifiques ont permis de mettre au point des dispositifs d'utilisation et de protection contre la puissance des eaux, autorisant une colonisation du milieu encore plus efficiente et effective. Les sciences ont donné les moyens d'exercer une maîtrise extrêmement forte sur la Nature.

Résultat des révolutions industrielles successives et de l'explosion démographique, la demande en surfaces industrialisable et habitable croît inexorablement. Pour accompagner le développement économique, les aménageurs doivent viabiliser de nouvelles terres et avancer toujours plus sur le domaine naturel, tout en gardant à l'esprit une autre demande sociétale, la sécurité des biens et des personnes. Ces deux préoccupations engendrent bien des conflits d'intérêt, qui finissent plus souvent au détriment de la seconde que de la première.

L'organisation cyclique de la gestion du risque

L'inondation est un phénomène spatial, qui peut s'étendre sur de vastes espaces géographiques, et cyclique, résultant de l'alternance des hautes et basses eaux d'une rivière. De fait, la gestion de ce risque s'organise également de façon cyclique, autour de trois temps principaux : avant, pendant et après.

Avant l'inondation, les processus naturels sont abordés de façon rationnelle, dépassionnée et déconnectée des questions d'évaluation financière. Les outils de modélisation, mis au point pendant cette phase, permettent de simuler des événements et prévoir leurs conséquences, de tester les capacités de réaction des services d'intervention, d'évaluer l'impact des aménagements de protection... C'est avant l'inondation, quand le temps ne constitue pas une contrainte majeure, que les moyens d'action peuvent et doivent être évalués pour améliorer l'efficacité des décisions.

Le temps le plus marquant, à différents chefs, est évidemment l'inondation en elle-même, autrement dit la catastrophe, où chaque instant et chaque décision comptent car des biens et des personnes sont en jeu. Une des préoccupations majeures est alors de connaître l'ampleur de l'événement pour permettre le dimensionnement et le déploiement des moyens d'action.

Après l'inondation, le problème principal est de tirer des enseignements et des conclusions, de mesurer l'impact, essentiellement en termes financiers et sociaux. Les moyens mis en œuvre et leur intervention sont évalués pour améliorer les actions futures. L'analyse des circonstances de l'événement permet d'envisager les politiques de prévention et de protection contre les conséquences dommageables qu'aurait un phénomène d'ampleur équivalente.

La réponse des techniques spatiales

Les systèmes d'observation de la Terre fournissent, depuis près de quarante ans maintenant, une vision synoptique de vastes territoires. La description des phénomènes naturels qu'ils proposent constitue un domaine de recherches fondamentale et appliquée à part entière. Les paramètres accessibles par l'observation de la Terre ont déjà permis d'envisager son utilisation avant, pendant ou après l'inondation. Leur forme numérique autorise un traitement par les outils informatiques d'analyse spatiale, ainsi que leur couplage et leur croisement avec d'autres sources d'information géographique.

L'inondation est un phénomène spatial, susceptible d'affecter de vastes surfaces naturelles et urbaines. L'étude de ce risque nécessite de disposer d'une information adéquate, géolocalisée sur ses composantes : les enjeux et l'aléa. Les interactions entre les différentes longueurs d'onde utilisées en télédétection et la surface terrestre permettent de les décrire par le biais d'indicateurs et de classes.

Actuellement, la description des enjeux est réalisée avec des cartes topographiques dont la fréquence de mise à jour peut atteindre, voire dépasser, dix ans. Le danger est alors de fournir une vision quasi historique des zones qualifiées comme vulnérables. Les capacités de cartographie des systèmes d'observation de la Terre peuvent être largement mises à profit pour obtenir une information synchrone sur de larges régions, actualisable régulièrement.

Le problème se pose assez similairement pour l'aléa. L'information globale et synchrone sur l'ampleur de l'événement est difficile à obtenir avec les moyens conventionnels, tels que les campagnes de terrain ou les survols aériens. Les possibilités de couverture récurrente des systèmes d'observation de la Terre permettent, à fréquence quotidienne, de cartographier les champs d'inondation et leur évolution sur une fraction importante du linéaire de la rivière. Cette description de l'aléa est exploitable au cours des différentes phases de gestion du risque.

Objectifs et plan du mémoire

Pour répondre à cette problématique complexe, l'axe directeur de cette étude est organisé selon les trois temps identifiés de l'inondation : avant, pendant et après. L'objectif est de proposer une vision globale de la gestion du risque d'inondation de plaine en zone tempérée, préférentiellement par l'intégration des données d'observation de la Terre, au travers d'études de cas ciblées. L'idée est finalement de "décloisonner" les trois temps de l'inondation, chacun étant caractérisé par des exigences propres, en les replaçant dans un processus continu dans le temps. L'étape de compréhension et de modélisation des phénomènes naturels générateurs de l'inondation constitue la pièce maîtresse de l'ensemble, car suffisamment en amont des contraintes imposées par l'événement et ses conséquences.

La première partie de ce mémoire dresse un état des lieux des différents aspects abordés : le risque d'inondation, les techniques de télédétection spatiale, pour terminer par les études antérieures qui font le lien entre les deux. Il s'agit d'abord de formuler une définition du risque et de ses composantes, compatible avec les moyens d'étude offerts par les techniques spatiales d'acquisition et de traitement de l'information. Puis, les principes généraux de télédétection spatiale sont rappelés avec un accent particulier sur les techniques radar. Largement utilisées dans la suite du travail, il est utile d'en préciser les caractéristiques physiques, géométriques et radiométriques. Enfin, une synthèse des travaux antérieurs est proposée, sur les apports des techniques spatiales avant, pendant et après l'inondation.

La seconde partie présente les études de cas, chacune focalisée sur une phase précise du processus de gestion du risque d'inondation. L'extraction de paramètres pour la modélisation hydraulique et hydrologique est abordée dans la première étude, au moyen des techniques d'acquisition radar. La sensibilité du signal radar aux conditions d'humidité de surface des sols est exploitée pour obtenir une vision spatialisée de l'état de saturation du bassin. Puis, la réponse spécifique des surfaces en eau est exploitée pour extraire l'extension de l'inondation, utilisable tant pour caler les paramètres des modèles de propagation de crues que pour fournir un support d'aide à la décision en période de crise. Cette problématique cartographique fait l'objet du second cas où sont analysées les nouvelles possibilités d'imagerie du radar du satellite ENVISAT, et notamment l'impact du choix de la polarisation de l'onde à l'émission et à la réception. Enfin, la cartographie du champ d'inondation permet d'évaluer les impacts lorsqu'elle est couplée à une description des enjeux. La troisième étude de cas élabore une démarche d'analyse des enjeux, d'abord du point de vue du bâti et de son évolution spatio-temporelle, puis du point de vue de ses habitants en proposant une méthode de spatialisation de la population.

Première partie

Risque d'inondation et télédétection aérospatiale

Introduction

Cette première partie décrit le contexte général de l'étude. Elle rappelle la situation en matière de gestion des risques, puis les bases scientifiques de l'observation de la Terre, et propose enfin une synthèse sur l'utilisation de la donnée spatiale dans l'étude des inondations.

En premier lieu, il s'agit de préciser un certain nombre de concepts et notions fondamentales du risque. Un grand nombre de définitions de l'aléa, de la vulnérabilité et du risque sont proposées par les administrations, les organisations internationales et les scientifiques. Une proposition de définitions est formulée en évoquant les capacités de réponse des techniques spatiales d'acquisition et d'analyse d'information. Les besoins exprimés par les différents services responsables d'une ou plusieurs phases de gestion du risque sont présentés au regard de leurs missions définies par les nombreux textes législatifs. L'attention est portée sur les besoins auxquels peuvent répondre les paramètres et informations extractibles des données d'observation de la Terre.

Le second chapitre est une présentation générale des techniques et moyens d'observation de la Terre. On s'intéresse tout d'abord à l'imagerie optique, dans les domaines spectraux du visible et de l'infra rouge. Les différents principes physiques d'acquisition d'information à distance dans ces longueurs d'onde sont exposés. La même démarche est appliquée aux techniques d'imagerie radar, dans le domaine spectral des micro-ondes. Les caractéristiques techniques des systèmes d'observation de la Terre évoqués ou utilisés au cours de l'étude sont regroupées en annexe A. On y évoque notamment les spécifications de l'instrument radar du nouveau satellite ENVISAT.

Enfin, le troisième et dernier chapitre de cette première partie propose un état de l'art de l'exploitation des données d'observation de la Terre dans les différentes phases de la gestion du risque d'inondation : la prévision et l'anticipation, la gestion de crise, le retour d'expérience et la prévention. L'intégration d'informations dérivées de l'imagerie spatiale dans les modélisations hydrologiques, hydrauliques, météorologiques est un domaine de recherche depuis plus de vingt ans et une partie des résultats sont d'ores et déjà intégrés dans des modèles opérationnels. L'utilisation de la donnée spatiale en gestion d'événements réels a fait l'objet de peu de publications, mais beaucoup de méthodologies établies *a posteriori* peuvent être mises efficacement en œuvre en période de crise. Enfin, le retour d'expérience, *i.e.* l'analyse après-coup de l'événement, fournit des renseignements précieux sur ses conséquences dommageables et l'efficacité des moyens déployés.

Chapitre 1

Le cadre opérationnel : les risques d'inondation

Ce premier chapitre présente les notions et concepts fondamentaux sur les risques, afin de conserver un contact fort avec les utilisateurs potentiels des produits et des méthodes développés. De ce fait, il est nécessaire de procéder à un rappel de différents termes, en cours chez ces partenaires, dans le seul but d'en avoir une vision élargie. Ces rappels concernent essentiellement les notions (trop) couramment abordées dans les divers documents officiels réglementant la gestion et la prise en compte des risques, ainsi que dans les médias disponibles, dans le cadre de l'obligation légale d'information du public. Après avoir rappelé les différentes acceptions des mots couramment employés dans le domaine des risques, l'objectif est de proposer une définition qui sert de base commune et claire de discussion, en évoquant les capacités de réponse de la télédétection aérospatiale et les dispositions de gestion des inondations actuellement en vigueur en France.

1.1 Le risque et ses composantes

Les risques naturels prévisibles concernent près d'une commune française sur deux. Chaque année, ils font quelques dizaines de victimes et engendrent plusieurs milliards d'euros de réparation (IFEN@). Depuis une cinquantaine d'années, l'augmentation des richesses exposées mais aussi l'insuffisance de la prise en compte du risque dans la gestion de l'espace ont eu pour effet d'augmenter l'ampleur des dommages. De 1991 à 1997, plus de 3 milliards d'euros d'indemnisation ont été versés dans le cadre du régime de garantie institué en 1982 (Loi 82-600).

Le risque d'inondation est, de très loin, le risque naturel le plus présent sur le territoire (fig. 1.1). Le rapport public de la Cour des Comptes (1999) met en évidence de nombreux éléments concernant les risques majeurs, et notamment les inondations. Affectant plus de deux millions de personnes et près d'une commune sur trois, elles génèrent des dommages importants, évalués en 1999 à, 600 millions d'euros par an, sur les vingt dernières années. Les effets d'une crue exceptionnelle ne sont pas pris en compte dans cette estimation, ce qui sous-entend que ces montants sont ceux "normalement" indemnisés chaque année. Cependant, selon les régions, les bassins ou les zones, les enjeux peuvent être très différents.

Le risque est généralement considéré comme le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité. Il faut cependant préciser ce à quoi chacun de ces termes fait référence et c'est l'un des principaux objectifs de cette section, qui présente différentes définitions de l'aléa, des enjeux, de la vulnérabilité et enfin, du risque.

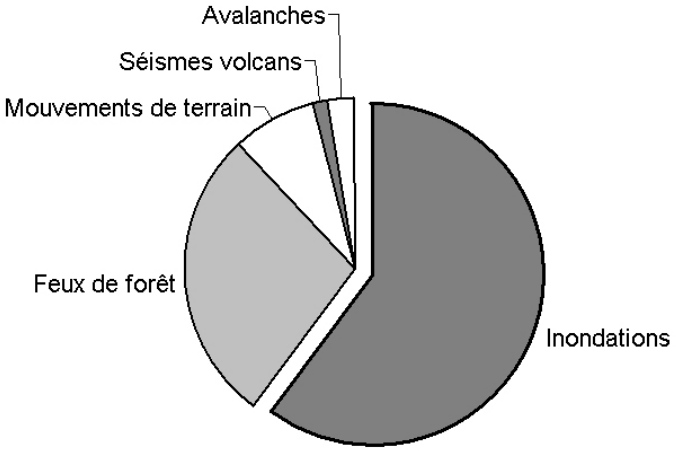


FIG. 1.1 – Répartition des risques naturels, ayant des enjeux humains sur le territoire français (d'après IFEN@)

1.1.1 L'aléa

Ce mot d'origine latine qui signifie "coup de dé", peut se définir comme un "hasard favorable ou non ; un risque d'incident défavorable, d'inconvénients" (Petit Larousse), ou encore un "aspect imprévisible que peut prendre une activité" (Encyclopédie Hachette). Ces définitions, issues des dictionnaires les plus courants, montrent que le terme de risque entre dans la définition de l'aléa, alors que la communauté scientifique introduit plus de nuances entre ces notions.

1.1.1.1 Définitions

Depuis que la recherche fondamentale et appliquée s'intéresse au problème des risques (fondant la cindynique), elle a cherché à préciser son langage et à fixer des définitions claires quant aux caractéristiques des événements considérés.

- Le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD) considère l'aléa comme un phénomène physique, naturel et non maîtrisable, d'occurrence et d'intensité données (MEDD@),
- Gendreau (1999) le définit simplement comme une menace caractérisée par des propriétés physiques et une probabilité d'occurrence,
- cette définition rejoint celle adoptée par les Nations Unies (*UN International Strategy for Disaster Reduction*) qui parle d'événement menaçant ou probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période données d'un phénomène pouvant engendrer des dommages (GEM Risques, 2002),
- Dauphiné (2001) propose l'assimilation à la probabilité d'occurrence d'un phénomène, en y ajoutant néanmoins son intensité, sa durée et l'espace qu'il affecte.

D'un point de vue dimensionnel, l'aléa est une probabilité d'occurence, utilement complétée par une dimension spatio-temporelle.

1.1.1.2 Approche statistique/stochastique

La statistique descriptive, en développant les modèles déterministes et probabilistes, offre un terrain idéal à la définition de l'aléa. Elle introduit la notion d'événement aléatoire, dont la réalisation ne peut être prévue avec certitude.

Une adéquation avec les aléas naturels

Cet arsenal mathématique s'applique relativement bien à la problématique des risques naturels. La plupart des phénomènes susceptibles de générer un risque, constituant par conséquent un aléa, font l'objet de surveillance et/ou de mesures systématiques : pluie, vent, hauteur d'eau, feu. Ils offrent alors des séries de mesures discrètes que l'on peut qualifier par le biais d'effectifs et de fréquences. Les statistiques de rang et les multiples lois d'ajustement permettent de caractériser les événements, rares ou moins rares au sens statistique du terme, en leur attribuant notamment une période de retour. Cette grandeur rend alors possible l'évaluation de l'intensité d'un phénomène, au regard de la loi choisie ou imposée par les conditions d'expérimentation.

Au contraire, concernant les risques technologiques et techniques, comme les risques socio-politiques, la dimension mathématique de l'aléa est beaucoup plus floue, si ce n'est absente. Le comportement des variables décrivant ces aléas s'approche alors plutôt des comportements chaotiques, dont Gleick (1987) propose une vision élargie.

Limites de l'approche statistique

Cette adéquation des méthodes statistiques descriptives avec les aléas naturels provient de la longueur des séries de mesures généralement disponibles. En effet, la majorité des grandes variables climatologiques et hydrologiques sont suivies depuis plusieurs dizaines d'années (les premières mesures quotidiennes de pression par exemple, datent de la fin du XIXe siècle).

Il ressort cependant une faiblesse de cette approche statistique, qui est plus d'ordre sémantique que scientifique. Aussi anodin qu'il puisse paraître, ce problème pose encore une fois la question de la correspondance entre le discours des spécialistes et celui des populations concernées. Par exemple, lors d'une crue, l'annonce par les spécialistes d'une période de retour de 50 ans ou 100 ans place les habitants des zones touchées dans la confiance qu'ils n'auront plus à supporter de tels événements avant longtemps. Dans le but de rassurer et d'expliquer, on oublie trop vite que la période de retour ne donne qu'une dimension intelligible de la probabilité d'occurrence d'un événement d'une intensité donnée (plus exactement, elle correspond à l'inverse de cette probabilité) au regard d'une série de mesures, nécessairement limitée. Elle ne correspond qu'à l'appréciation de l'intensité du phénomène en comparaison à d'autres. Les inondations à répétition de Redon au cours de l'hiver 2000/2001 ou dans les départements du Sud de la France en 2002 et 2003 témoignent de cette ambiguïté des termes.

Ces méthodes d'ajustement statistiques ne constituent en aucun cas une panacée scientifique. Leur validité, tant spatiale que temporelle, est fortement conditionnée par la longueur des séries exploitées et la méthode employée pour évaluer les intensités des événements rares (Comby, 2001). De plus, leur application aux aléas naturels ne peut se généraliser facilement aux autres types d'aléas.

1.1.2 Les enjeux

La définition officielle de la vulnérabilité adoptée par le MEDD, utilisée dans les plans de prévention des risques, fait intervenir la notion d'enjeu. Le recueil de définitions proposé par le Groupe des Ecoles des Mines (GEM, 2002) montre que ce terme est peu employé. Les enjeux intègrent les "personnes, biens, activités, moyens, patrimoine... susceptibles d'être affectés par un phénomène naturel". Par conséquent, cela suppose d'en établir un inventaire quantitatif et qualitatif.

D'autres institutions, telles que l'UNDRO (*United Nations Disasters Relief Organisation*) préfèrent les termes de populations ou éléments à risque. Les définitions des éléments à risques sont assez similaires à celle adoptée par l'administration française sur les enjeux, et leurs champs d'application sont très larges, allant du risque naturel au risque sanitaire.

Cette notion est fondamentale car elle implique une évaluation objective, quantitative et financière des éléments. C'est typiquement ce que fait toute société d'assurances lorsqu'elle assure un bien, une maison par exemple. Elle a besoin d'une évaluation du volume financier que représente la perte d'usage du bien, partielle ou totale. Les enjeux peuvent raisonnablement être considérés d'un point de vue humain, mais aussi financier. Dauphiné (2001) fait d'ailleurs remarquer que le premier n'est pas nécessairement déconnecté du second. Ainsi, en conservant cette distinction, l'enjeu a la dimension d'une devise ou d'un nombre de personnes.

1.1.3 La vulnérabilité

Selon les auteurs, les définitions proposées prennent en compte divers paramètres géographiques, sociaux ou économiques. Cette notion composite amène de notables différences de points de vue.

1.1.3.1 Définitions

Parmi les définitions existantes, on peut retenir que :
- le MEDD adopte une définition de la vulnérabilité qui, au sens le plus large, exprime le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux (MATE, 1998),
- plus techniquement, Gendreau (1999) caractérise la vulnérabilité comme étant la fragilité des installations humaines dans l'absolu. Autrement dit, cette notion s'appréciera de la même façon pour un élément donné, quels que soient sa position et le risque considéré. Elle est mesurée par une période de retour, ce qui lui confère la même dimension que l'aléa,
- Monachesi (2001) la voit comme une caractéristique propre de la société en transformation constante et produit de l'histoire de cette société. De ce point de vue, l'origine de la catastrophe se trouve dans les modalités mêmes du développement de cette société,
- et Graillot *et al.* (2001) tentent d'intégrer ces aspects socio-économiques et géographiques dans une démarche globalisée d'analyse multi-critères,
- d'Ercole (1994) oppose "à l'approche classique de la vulnérabilité, qui mesure un endommagement potentiel des biens et des personnes et ses répercussions sur l'environnement économique (...), la vulnérabilité des sociétés à travers leurs capacités de réponses à des crises potentielles"(Dauphiné, 2001),
- la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) la définit simplement comme la susceptibilité des ressources à être affectées par des aléas.

La difficulté d'aboutir à une définition générale de la vulnérabilité provient des multiples facteurs qui entrent en jeu : les dimensions économiques, sociales, matérielles... Elle est cependant susceptible d'intégrer ces différentes dimensions, implicitement ou explicitement.

1.1.3.2 Une dimension transversale

Il est important de noter que les définitions officielles de la vulnérabilité (MEDD, NOAA) font explicitement intervenir la notion d'aléa. Ceci implique une certaine transversalité de la vulnérabilité, qui fait le lien entre l'évaluation des enjeux et la quantification de l'aléa.

Ainsi, en reprenant l'exemple du paragraphe précédent sur l'assurance, la maison assurée ne présente pas la même vulnérabilité face à deux crues de périodes de retour différentes. De même, les vulnérabilités de deux maisons de même valeur (même enjeu) diffèrent selon leur

position géographique (à proximité d'une rivière ou non), selon les dispositions prises pour les protéger (ouvrages de protection, surélévation, prises électriques en hauteur...) et selon la durée du phénomène.

Ces observations fondées sur les définitions précédentes, exceptée celle proposée par Gendreau (1999), ne permettent pas d'attribuer une dimension purement quantitative à la vulnérabilité. Elle peut par contre se définir comme un facteur de pondération qualitatif et par conséquent subjectif.

1.1.3.3 Une dimension sociale

Bien loin des considérations mathématiques à propos des phénomènes aléatoires, les aspects sociologiques de l'aléa tendent à prouver qu'il est nécessaire de les prendre en compte. Il apparaît assez clair que la perception de l'aléa, de sa nature et de son intensité, conditionne les moyens qui sont mis en œuvre par la population pour se prémunir de ses effets, *i.e.* réduire sa vulnérabilité. Les aléas naturels semblent peut-être moins concernés que les aléas technologiques (chimiques, nucléaires, biologiques...) qui font l'objet d'une prise de conscience publique et politique toujours plus forte, à la lumière des événements tragiques de ces dernières années.

Au-delà d'une simple définition statistique, la dimension sociale de l'aléa fait partie intégrante du conscient, ou de l'inconscient, des individus qui le vivent. Ce point de vue social et sociologique est intimement lié à la notion culturelle de risque, qui évolue dans le temps. On constate effectivement dans la littérature que la construction sociale du risque n'a véritablement lieu que lorsque le phénomène générateur, l'aléa, est identifié comme un danger.

L'histoire des sociétés et des cultures qui se développent sur un territoire donné, conditionne la perception qu'elles ont de l'aléa et de leur vulnérabilité face à cet aléa. La plupart des centres urbains anciens se sont développés dans des zones où le compromis entre les bénéfices de l'occupation d'un territoire par les populations et la probabilité d'occurrence d'un événement catastrophique dommageable avait été jugé satisfaisant. La ville de Pompéi au pied du Vésuve, ou l'activité égyptienne le long du Nil, peuvent en être considérées comme des exemples parmi les plus anciens. Plus proches de nous, et face au risque d'inondation, on constate assez souvent que les centres anciens des villes et villages sont construits à distance suffisante des lits majeurs. Dans le cas contraire, le risque encouru est jugé compatible avec les intérêts de la position. C'est notamment le cas des grandes villes fluviales françaises.

Ces remarques amènent par conséquent à considérer l'aspect sociologique de la perception des aléas, et le poids que peut avoir cette perception dans la définition de la vulnérabilité.

1.1.4 Le risque

La complexité du concept d'aléa et de la notion de vulnérabilité montrent à quel point le risque est une notion composite, nécessitant une part d'expertise importante pour le mesurer et envisager une politique de gestion. Le risque est souvent exprimé par le produit d'un aléa et d'une vulnérabilité. Cependant, Dauphiné (2001) met en évidence les limites de cette définition :

$$Risque = aléa \times vulnérabilité \tag{1.1}$$

$$36 = 9 \times 4 = 6 \times 6 = 4 \times 9 \tag{1.2}$$

Ce simple exemple numérique insiste sur la permutabilité du produit. Par conséquent, on ne saurait se satisfaire de cette seule définition, bien trop limitative. Aux vues de ce qui précède, il est assez peu acceptable d'occulter les dimensions géographiques ou sociales (si difficilement

accessibles soient elles). Dauphiné (2001) et Monachesi (2001) donnent de bons aperçus de la façon dont la société, dans tous les sens du terme, peut altérer la perception d'un risque : la connaissance scientifique, la proximité, la durée, la couverture par les médias, les dégâts occasionnés...

En complément, le MEDD définit une extension de cette notion de risque : le risque majeur. Il est défini comme un risque lié à des aléas d'origines naturelles ou technologiques dont les effets prévisibles mettent en jeu un grand nombre de personnes, provoquent des dommages importants et dépassent les capacités de réaction des instances directement concernées. Le MEDD distingue plusieurs types de risques majeurs naturels : avalanche, feu de forêt, inondation, mouvement de terrain, séisme, tempête et éruption volcanique (pour les départements d'outre-mer). Cette définition supplémentaire constitue une des bases de réflexion de la politique de prévention de l'Etat français.

1.1.4.1 Définitions

Plusieurs approches du risque et de sa définition peuvent être envisagées. Le programme de recherche plurifacultaire du Rectorat de l'Université de Genève résume quelques définitions (Harding *et al.*, 2001), sur une base de travail exprimée par :

$$R = f(A, E, V, I, t, s) \tag{1.3}$$

Dans cette équation, A représente l'aléa, E les éléments à risque ou les enjeux, V la vulnérabilité, I la résilience, enfin t et s décrivent les dimensions spatio-temporelles. Les grandeurs I et V sont très liées : la première caractérise "la fragilité des éléments à risque par rapport à l'occurence d'un événement" ; la seconde "exprime la capacité d'un environnement (...), d'un individu ou d'une société à traverser une expérience stressante ou traumatique en en minimisant l'impact, voire en utilisant l'adversité pour mieux organiser son développement".

Sur ce schéma, Harding *et al.* (2001) présentent plusieurs définitions dont celle proposée en 1979 par Fournier d'Albe, initialement destinée aux risques volcaniques :

$$Risque = Valeur \times Vulnérabilité \times Aléa \tag{1.4}$$

L'idée de valeur s'étend des vies humaines à la valeur vénale des biens immobiliers, prenant aussi en compte sa variation temporelle. L'UNDRO (*United Nations Disaster Relief Office*) fait intervenir l'élément à risque plutôt que la valeur.

$$Risque = (Eléments\ à\ Risque) \times (Aléa\ Naturel \times Vulnérabilité) \tag{1.5}$$

Cette seconde approche utilise plus de notions actuellement en usage en France et semble plus aisément applicable à différents types de risques. Compte tenu des dimensions des différents termes constitutifs, la dimension du risque peut-être ramenée à un volume financier, assorti d'une probabilité annuelle de mobilisation. La vulnérabilité intervient alors comme un facteur de pondération, sans dimension particulière.

1.1.4.2 Le risque négocié, accepté

Le principe de concertation et d'enquête publique (*e.g.* lors de la réalisation de PPR ou de la construction d'ouvrages de protection) permet aux populations concernées par le risque de disposer d'une information (Caquard, 2001). Ainsi, grâce à ces éléments objectifs sur les enjeux et les aléas qui les menacent, les citoyens peuvent participer à la prise de décision sur la gestion du risque. Le passage par l'étape de concertation publique permet d'informer le citoyen, de lui faire prendre conscience des limites des aménagements et des protections envisagées, en l'impliquant

directement dans le processus. On parle alors de risque négocié car le citoyen étant informé du niveau de protection qui lui est fourni, connaît en même temps le risque résiduel.

Au-delà de cet aspect administratif des choses, Dauphiné (2001) met en évidence l'acceptation du risque par les sociétés concernées. Il ne fait l'objet d'aucune négociation, d'aucune concertation, il fait simplement partie du cadre de vie. On notera cependant qu'en ce qui concerne les sociétés dites modernes, la mobilité des populations contribue à une perte de la mémoire du risque. Ce cas semble se faire de plus en plus fréquent, à tel point que les dispositions légales en matière de mémoire du risque ont été renforcées. La loi du 30 juillet 2003 établit plusieurs évolutions en la matière, qu'il s'agisse de risques naturels ou industriels, avec notamment un renforcement de l'information par l'inscription du risque lors des transactions immobilières, la réorganisation des services d'annonce de crues ou la pose de repères de crues.

1.2 Propositions

La diversité des définitions proposées dans la littérature montre combien il est difficile d'obtenir un consensus sur un problème impliquant des éléments naturels ou non, généralement peu maîtrisables. On peut cependant noter que différents termes sont récurrents dans les diverses définitions et doivent être pris en compte. Cette étude est centrée sur l'apport des techniques spatiales à l'étude des risques. Ces techniques exploitent des données numériques, notamment acquises par les systèmes de télédétection aérospatiale. Finalement, l'objectif est de fournir des indicateurs numériques à partir d'informations numériques.

1.2.1 Capacités de réponse des techniques spatiales

Point central de ce travail, l'exploitation des données d'observation de la Terre et des techniques spatiales est capable d'apporter des réponses aux éléments définis précédemment. Les bases physiques de la télédétection sont rappelées dans le chapitre 2 et les aspects techniques des plate-formes d'acquisition en annexe A. L'expérience déjà acquise dans l'exploitation des données d'imagerie spatiale dans les différentes phases du risque fait l'objet du chapitre 3. Il est néanmoins nécessaire de garder à l'esprit que ces données géographiques sont acquises sous forme numérique, ou sont numérisées de façon à pouvoir être traitées informatiquement.

La télédétection aérospatiale offre à l'heure actuelle un ensemble de réponses aux problématiques de qualification et de quantification de l'aléa et de la vulnérabilité (Maurel *et al.*, 2001). En termes cartographiques d'une part, la fréquence de réactualisation des informations est considérablement augmentée, avec par exemple les satellites SPOT qui passent au-dessus de la même zone tous les 26 jours mais qui sont capables d'acquérir des images tous les jours sur un secteur donné. Cette fréquence est à mettre en relation directe avec la fréquence de réactualisation théorique à dix ans des fonds cartographiques nationaux traditionnels, sur lesquels s'appuient généralement les documents réglementaires (MATE, 1998). D'autre part, la combinaison de plusieurs systèmes disposant de caractéristiques complémentaires donne une réelle capacité de couverture d'un événement, actuel ou historique. Les larges archives d'images acquises depuis les débuts de l'observation de la Terre peuvent de fait être valorisées dans des démarches de recherche et de développement en modélisation hydrologique, hydraulique, en analyse du signal...

1.2.2 Synthèse et propositions

A partir de ce qui précède, il est possible de proposer des formulations de définition pour les concepts et notions exposés, en prenant en compte les spécificités des données exploitées par les techniques spatiales.

1.2.2.1 L'aléa

Le concept d'aléa semble, au moins en ce qui concerne les risques naturels, relativement bien défini. La grande majorité des définitions de l'aléa lui confère toutes les caractéristiques d'une variable aléatoire. Il est de ce fait possible de le caractériser par le biais d'analyses statistiques, en intégrant son extension spatiale. Citée à plusieurs reprises, la notion d'intensité apparaît très liée à la période de retour (cf. §1.1.1.2).

En conséquence, on retiendra les éléments suivants comme constitutifs de la définition de l'aléa :
– une fréquence d'occurence,
– une extension spatiale,
– une durée (DFO@).

Du point de vue de l'information géographique numérique, l'aléa peut être représenté par une grille (*e.g.* une image) où chaque cellule (*e.g.* un pixel, élément géographique élémentaire) traduit une de ses grandeurs caractéristiques (*e.g.* sa période de retour). La figure 1.2 illustre un mode de représentation de l'information sur un aléa : chaque case correspond à une cellule d'étude élémentaire pour laquelle on calcule la période de retour de l'aléa, de 1 à 50 ans, avec 0 pour la source de l'aléa (*e.g.* une rivière). Ainsi, le lien entre fréquence d'occurence et extension spatiale est réalisé.

1	0	1	5	10	10
1	0	1	2	5	10
1	1	0	1	5	10
5	2	1	0	2	5
10	5	2	1	0	2
10	10	5	1	0	1
10	10	5	1	0	1
50	10	5	5	1	0

FIG. 1.2 – Carte d'occurence d'un aléa d'intensité fixée. Chaque cellule porte une période de retour de 1 à 50 ans, avec 0 pour la source de l'aléa (*e.g.* une rivière)

1.2.2.2 Les enjeux

La notion d'enjeu ressort comme étant relativement univoque, en ne s'intéressant qu'à la qualification des diverses composantes de la société. Plus facile à manipuler et à quantifier, elle est assimilable à une évaluation de valeur financière ou à un nombre de personnes. Finalement, deux éléments constitutifs de l'enjeu sont pris en compte :
– la nature et la valeur des éléments (populations, zones urbaines, industrielles, naturelles...),
– sa localisation géographique.

Comme pour l'aléa, les enjeux peuvent être décrits par une grille, où les valeurs représentent cette fois-ci soit un nombre de personnes, soit une valeur financière.

1.2.2.3 La vulnérabilité

Cette notion reste assez floue. La plupart des définitions de la vulnérabilité font intervenir l'aléa, ou du moins ses effets sur les enjeux. La définition du MEDD correspond bien à cette préoccupation et peut être complétée. La notion de vulnérabilité intègre :
– la perception sociale de l'aléa,

– l'aléa lui-même, et ses conséquences prévisibles sur les enjeux,
– les dispositions prises pour limiter les effets de l'aléa,
– les enjeux.

La vulnérabilité n'est pas aisément quantifiable. Dans le cas précis des inondations, elle peut éventuellement être envisagée comme une dépréciation des enjeux (des valeurs immobilières pour l'essentiel) selon la durée du phénomène. Malgré tout, cette notion pose d'importants problèmes d'évaluation. La vulnérabilité des biens et des personnes est un problème géographique, qui nécessite une réponse spatiale (Cutter, 2001).

La réduction de vulnérabilité, pour le cas des inondations, consiste souvent en des travaux hydrauliques (empierrement des berges, curage...) et des ouvrages de protection (levées, digues...). En considérant le seul cas des ouvrages de protection, l'action sur l'extension spatiale de l'inondation, donc sur les effets de l'aléa, a pour conséquence une réduction de la vulnérabilité des enjeux.

1.2.2.4 Le risque

Qu'il soit envisagé comme un simple produit de la vulnérabilité et de l'aléa ou comme une composition plus complexe, le risque peut se définir par une fonction à plusieurs variables telle que l'équation 1.3 (Harding *et al.*, 2001). Ainsi, le flou qui entoure la définition du risque provient moins de l'appréciation de l'aléa que des difficultés de définition de la vulnérabilité, au sens le plus large du terme.

Aussi, la qualification du risque prend en compte les aspects spatio-temporels et de fréquence d'occurence de l'aléa, ainsi que la qualification des enjeux par leur localisation géographique et leur nature. Le niveau de protection des enjeux, s'il est accessible, peut permettre d'évaluer l'appropriation de l'aléa par les populations, soit leur vulnérabilité. On cherche donc à exploiter la combinaison des définitions précédentes, pour parvenir à une description mutuelle de l'aléa, des enjeux et de la vulnérabilité aboutissant ainsi à une certaine approche du risque.

Pratiquement, les techniques spatiales permettent de décrire l'aléa et les enjeux. Chacun étant assimilable à une grille de valeurs, leur composition fournit une évaluation du risque en termes de probabilité de mobilisation d'un certain volume financier ou de nombre de personnes concernées. La prise en compte de la vulnérabilité, au sens de la définition adoptée précédemment, demeure problématique et peut même apparaître redondante avec la notion de risque.

1.3 La gestion des inondations en France

Généralement décomposée en plusieurs grandes phases, la gestion du risque d'inondation relève de l'autorité de plusieurs services de l'Etat. Pour chacun d'entre eux, leurs missions ont beaucoup évolué au fil des différents textes législatifs et réglementaires. La présentation se limite cependant à un aperçu rapide de la situation actuelle des différents acteurs et des textes législatifs et réglementaires en vigueur, du fait de leur étendue. Enfin, l'expression des besoins des acteurs en information spatiale est abordée à partir de ces éléments.

1.3.1 Les phases

La gestion du risque se décompose en plusieurs étapes, plusieurs temps d'analyse et d'action. Chacune d'entre elles a des domaines et des exigences propres en terme de zones considérées et de fréquence de réactualisation des informations. Souvent représentées et organisées de façon cyclique, les grandes étapes de gestion sont désignées par :

- **la prévision**, qui est le processus amont fondé sur la modélisation des phénomènes et l'observation régulière de variables représentatives ;
- **l'anticipation**, qui commence dès que les variables atteignent des valeurs définies comme pouvant conduire à des conséquences graves (seuils de pré-alerte, d'alerte...). Elle permet de préparer les moyens de réponse si la prévision d'évolution vers une situation de crise se confirme (positionnement de matériels, évacuation...) ;
- **la gestion de crise**, qui a pour but de gérer l'événement en cours, d'assurer la sécurité des biens et des personnes ;
- **la mitigation**, qui a pour objectif de réduire les conséquences de l'événement grave qui vient de se dérouler. Cette étape inclut notamment les opérations de nettoyage, de déblaiement, de remise en état des voies de communication ;
- **le retour d'expérience**, qui reprend le déroulement de l'événement et des décisions prises pour le gérer. Cette étape permet de valoriser les informations acquises pendant la crise, d'évaluer les réponses qui ont été apportées pour améliorer la qualité des interventions ;
- **la prévention**, qui tire les conséquences des expériences passées et formule des recommandations pour limiter les effets d'un événement similaire dans l'avenir.

Ces différentes étapes fournissent un découpage de la gestion du risque peu maniable vis-à-vis des techniques employées dans cette étude. Pour simplifier la démarche, elles sont regroupées de la façon suivante :
- prévision et anticipation,
- gestion de crise,
- retour d'expérience et prévention.

Ces trois grandes phases soutiennent ce travail qui s'articule autour de la prévision et de l'anticipation, scientifiquement et techniquement exigeantes. La prévision, qui relève d'un processus continu dans le temps, fournit des informations capitales pour l'anticipation des événements graves. Elle aide également à une gestion effective de la crise, contraignante en termes de fréquence de réactualisation et de temps de mise à disposition de l'information, notamment par l'évaluation des tendances d'évolution de la situation. Enfin, la modélisation de phénomènes peut permettre des simulations à plus longue échéance : les effets d'aléas réels ou fictifs sur des enjeux historiques, actuels ou prévus ; les influences des ouvrages de protection, les conséquences d'une éventuelle rupture... Tous ces éléments constituent des intrants de grande valeur pour mettre en œuvre une prévention efficace.

1.3.2 Les acteurs

La conduite des actions spécifiques à chacune des trois grandes phases de gestion est confiée à différents acteurs. Leurs missions sont définies par une série de textes législatifs et réglementaires, abordés dans le paragraphe suivant.

1.3.2.1 La prévision et l'anticipation

Sans entrer dans une description exhaustive des domaines d'action de chaque acteur, on peut retenir l'intervention des Services d'Annonce de Crues (SAC), de la Navigation et de Météo France. La prévision d'événements hydrologiques graves relève d'une part de l'annonce de crues et d'autre part de la météorologie, à qui revient la tâche d'anticiper l'événement météorologique grave, capable de provoquer des débits importants. Les services de la météorologie nationale disposent actuellement de 18 radars pluviométriques, qui seront complétés par 5 à 6 nouveaux appareils d'ici à 2006, répartis sur le territoire (Parent du Châtelet, 2003) et reliés au réseau ARAMIS, en plus des stations de mesures classiques. Ce dispositif est consultable en temps quasi-réel grâce au système ASPIC.

Avec cette information pluviométrique, c'est la mission du SAC (généralement organisée au sein des DIREN, Direction Régionale de l'Environnement) qui peut commencer. Chargé de l'annonce de crues, il dispose de moyens techniques d'observation, de modélisation et de simulation des grandeurs hydrologiques utiles. Cette mission est complétée par les services de la navigation, qui assurent la modélisation hydraulique. En cas de prévision de dépassement de la cote d'alerte, un message d'annonce de crues est émis, contenant les hauteurs et débits actuels et prévus à 6 heures. Ce message est envoyé aux autorités compétentes en gestion de la crise telles que la préfecture, l'Etat-Major de Zone (EMZ), les SDIS, la gendarmerie, la DDE...

1.3.2.2 La gestion de crise

La gestion des événements graves est assurée par les services de Sécurité Civile, coordonnés au niveau de la zone de défense, soit 18 départements pour l'EMZ-Est. L'Etat Major de Zone constitue le relais entre les hommes déployés sur le terrain et les autorités. Les interventions sont menées par les Services Départementaux d'Incendie et de Secours (SDIS) dont les missions sont d'abord d'assurer la sécurité des biens et des personnes, le secours d'urgence et l'évacuation des victimes, ensuite d'organiser les mesures de sauvegarde et les moyens de secours, et enfin de prévenir et évaluer les risques de sécurité civile.

Parallèlement, d'autres services sont sollicités, notamment la Direction Régionale de l'Equipement (DRE) qui est missionnée pour l'aménagement d'itinéraires d'accès et d'évacuation. Enfin, de par son pouvoir de police, le maire engage ses responsabilités civile, pénale et administrative pour la communication des risques, la mise en œuvre de mesures de précaution et de sauvegarde des biens et des personnes... (Code Général des Collectivités Territoriales, Art. L2212-2 alinéa 5 et L2212-4) Ces attributions en font le dernier maillon des pouvoirs publics dans la chaîne de gestion des risques et des crises (MATE, 2000).

1.3.2.3 Le retour d'expérience et la prévention

Tous les services impliqués à un moment ou à un autre dans la gestion de l'événement sont concernés par le retour d'expérience. Toutes les informations recueillies pendant la crise doivent être capitalisées dans des documents et des bases de données synthétiques.

A partir de l'ensemble d'informations accumulé, les services en charge de l'aménagement du territoire (Préfecture et DDE essentiellement) disposent d'éléments d'évaluation des dispositions à prendre pour réduire les conséquences d'un événement grave. L'outil majeur de la phase de prévention des risques est le Plan de Prévention des Risques, qui décrit d'une part l'aléa et d'autre part, les enjeux. Le croisement de ces deux informations produit une carte de risque (Garry, 1988 ; 1997). Anciennement annexé au Plan d'Occupation des Sols (POS), ce document fait maintenant partie intégrante du Plan Local d'Urbanisme (PLU). Il édicte un certain nombre de règles et de recommandations visant à réduire la vulnérabilité des enjeux. La portée politique et économique des actions des services compétents dans cette phase de gestion du risque est capitale.

1.3.3 Les dispositions législatives et réglementaires

Concernant les risques naturels, leur prévention et leur indemnisation, il existe une série de textes de lois, de décrets et de rapports parlementaires qui témoignent de l'implication de l'Etat et de ses services déconcentrés dans la gestion de cette catégorie d'événements, depuis les deux dernières décennies. Cet aspect était présent dès le préambule de la Constitution du 27 octobre 1946 où "la Nation proclame la solidarité et l'égalité de tous les Français devant les charges qui résultent des calamités nationales". Les textes majeurs faisant référence sont rappelés dans la section "Textes législatifs et réglementaires" de la bibliographie.

Ces textes et les extraits des codes ont fait l'objet d'un regroupement par la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR) du MEDD dans un document unique (MATE, 2001). L'objectif est de donner aux acteurs de la gestion des risques naturels, comme au public, un accès simplifié et centralisé. Ces documents sont toujours en vigueur, mais leur portée a été modifiée par la loi du 30 juillet 2003. Cette loi est composée de deux parties : la première porte sur les risques industriels dont bon nombre de dispositions ont été tirées de la catastrophe de la Grande Paroisse (usine AZF) à Toulouse, le 21 septembre 2001 ; la seconde, qui se rapporte aux risques naturels, est complétée par un plan d'action contre les inondations annoncé dès l'automne 2002 et concernant une quinzaine de grands bassins versants français. Cette loi prévoit notamment un renforcement de l'information, une extension du fonds de prévention des catastrophes naturelles, dit fonds Barnier (issu de la loi de 1995), et une réorganisation des dispositifs de prévision et d'alerte. Un des arguments principaux de ce texte est que "tout n'a pas été essayé" en matière de prévention en particulier, mais aussi tout au long de la chaîne du risque, même si les évolutions introduites peuvent sembler relativement modestes.

A ces documents réglementaires et législatifs s'ajoutent plusieurs rapports parlementaires tels que :
- le rapport d'évaluation sur la prévention des risques naturels de 1997 (Bourrelier, 1997),
- le rapport sur les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, par le député Kert (1999),
- le rapport sur les politiques publiques de prévention des inondations, par le député Dauge (1999),
- le rapport public de la Cour des Comptes de 1999, et notamment le titre 6 du chapitre IV,
- le rapport de la commision d'enquête présidée par le député Galley (Galley et Fleury, 2001).

Cet aperçu rapide des documents de différentes natures portant sur les risques naturels ou technologiques souligne l'ampleur du problème posé à tous les niveaux de responsabilité de l'Etat. Cette étendue documentaire montre également que les solutions apportées demeurent toujours imparfaites et incomplètes par rapport à la demande croissante de sécurité exprimée par la société.

1.3.4 Les besoins en information spatiale

Plusieurs rencontres avec les opérateurs ont permis de mieux prendre en considération leurs besoins au cours des différentes phases de gestion du risque. En 2000, lors du lancement du programme PACTES (Prévention et Anticipation des Crues au moyen des Techniques Spatiales), il s'agissait de connaître précisément les attentes vis-à-vis des informations accessibles par l'observation de la Terre, en termes de fréquence et délai de mise à jour, d'échelle d'observation... Un échantillon représentatif de la diversité des acteurs a été consulté : Sécurité Civile, Service Départemental d'Incendie et de Secours (SDIS), Service d'Annonce de Crues (SAC), Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF), Direction Départementale de l'Equipement (DDE), Service de la Navigation, Direction Régionale de l'Environnement (DIREN)... Les missions distinctes de ces acteurs engendrent des besoins spécifiques d'accès à l'information.

1.3.4.1 La prévision et l'anticipation

Les attentes des acteurs de la prévision et de l'anticipation sont de trois ordres :
- l'accès à l'information et aux données,
- les modèles utilisés et leur paramétrage,
- les moyens de communication.

En matière d'accès à l'information, plusieurs solutions sont envisagées par les acteurs. La première semble être l'amélioration de la couverture spatiale de leurs réseaux de mesures respectifs et de leur interconnexion, valable aussi pour les dispositifs d'archivage. La valorisation de ces archives, en particulier météorologiques et radarmétéorologiques, est apparue comme pouvant constituer un apport substantiel à la description d'événements graves.

L'EMZ-Est souligne son manque d'informations sur les territoires et les aléas. Cela se traduit par des besoins importants en cartographie de base et en moyens pour les exploiter. Une des solutions envisagées par l'EMZ, la DIREN et les services de la navigation consiste à pré-calculer des cartes d'impact de référence. En corollaire, les services de Sécurité Civile demandent une amélioration des messages d'alerte météorologique, afin d'en éviter la banalisation et rendre les mesures d'anticipation plus efficaces. Cet aspect a déjà été pris en compte par Météo-France, qui applique depuis fin 2001 la procédure Vigilance.

Certaines de ces dispositions vont être amenées à changer prochainement, conformément au plan Bachelot contre les inondations, renforcé par la loi du 30 juillet 2003. Ce plan contre les inondations prévoit notamment la création d'un Centre de Prévision des Crues centralisé.

1.3.4.2 La gestion de crise

Les besoins exprimés par l'EMZ et les SDIS concernent autant la préparation opérationnelle que la gestion de la crise proprement dite, et se regroupent en trois catégories, étroitement liées :
- l'accès à l'information pertinente : données hydrauliques et pluviométriques, calculs d'itinéraires, visualisation des moyens engagés,
- la communication : site Internet, systèmes de communication mobiles,
- le retour d'information : visualisation de la situation par caméra, visualisation synoptique de la situation par images satellitaires.

Ces moyens pourraient trouver un écho favorable auprès des maires, pour anticiper des mesures de protection et d'avertissement des populations. De plus, Météo-France met en avant le manque de retour d'information sur les conséquences de l'événement météorologique et plaide pour une plus grande interopérabilité des réseaux pluviométriques maintenus par différents services de l'Etat. L'échange efficace d'informations pertinentes apparaît donc comme l'enjeu majeur de cette phase de crise.

1.3.4.3 Le retour d'expérience et la prévention

L'EMZ-Est exprime des besoins importants en matière d'analyse des événements récents et de leurs conséquences humaines, matérielles et économiques. L'Etat-Major plaide notamment pour une systématisation de l'analyse, qui doit permettre d'améliorer les méthodes d'intervention et de compléter les matériels. La connaissance des événements historiques et leur couverture par des campagnes aériennes à basse altitude ont notamment permis d'amasser de grandes quantités d'informations exploitées jusque-là en interne (Puech et Raclot, 2002).

Les besoins des acteurs du retour d'expérience et de la prévention se résument alors à :
- la capitalisation et l'enrichissement des informations générées pendant la crise,
- une description détaillée du territoire,
- la constitution de catalogues d'événements de référence, valorisant les données historiques.

La loi du 30 juillet 2003 prévoit des avancées et des renforcements de cette phase, et le MEDD souhaite que d'ici à 2005, l'ensemble des grands fleuves et rivières de France soit couvert par des atlas de zones inondables numériques.

1.4 Conclusions

Ce premier chapitre dresse un aperçu de la problématique actuelle des risques naturels en France. Il met en évidence l'existence d'une grande multiplicité d'approches sur les problèmes de définition des concepts et notions utilisés. Les idées de risque, d'aléa et de vulnérabilité se sont largement répandues grâce aux médias, galvaudant par la même occasion leurs définitions. Tant dans les milieux scientifiques qu'opérationnels, les nuances marquées entre les définitions de ces mêmes concepts génèrent des approches bien différentes et souvent complémentaires. L'analyse de ces différentes définitions met en évidence des éléments récurrents. On retient tout d'abord que le risque est une notion composite qui intègre l'aléa, les enjeux et leur vulnérabilité. Ces éléments sont, dans une certaine mesure, descriptibles par des données numériques géographiques et analysables grâce aux techniques spatiales.

Les techniques spatiales, qui regroupent les méthodes d'acquisition et de traitement de l'information géographique, fournissent des informations spatiales sur l'aléa et les enjeux. L'observation de la Terre dispose d'une capacité de cartographie très poussée : couverture synchrone de larges territoires, fréquence de réactualisation considérablement accrue... L'utilisation d'une gamme de longueurs d'ondes très variée et la valorisation des larges archives d'images acquises depuis une quarantaine d'années sont un moyen efficace d'obtenir un jeu de données pertinent pour l'amélioration des modèles hydrologiques et hydrauliques.

Les définitions de l'aléa font apparaître des éléments constitutifs importants : fréquence et extension spatio-temporelle. L'approche stochastique de l'aléa constitue une des règles actuelles de la démarche analytique scientifique. Les enjeux sont définis par leur nature, impliquant une notion de valeur, et leur localisation géographique. Ces deux notions sont quantifiables par le biais des techniques spatiales. Un certain flou semble entourer la définition de la vulnérabilité. Elle est caractérisée par les conséquences prévisibles d'un aléa sur les éléments exposés, selon leur nature, leur localisation et par les dispositions prises pour les protéger. Mais elle fait aussi intervenir l'aspect social de la perception de l'aléa, moteur de la prise de conscience par les populations de leur vulnérabilité face à lui. Le mode de vie actuel, qui impose une grande mobilité aux personnes, a tendance à effacer cette perception sociale, souvent désignée par le terme de "Mémoire du risque". Par conséquent, la description de l'aléa et des enjeux par les techniques spatiales ne peut proposer qu'une vue partielle du risque et de la vulnérabilité de la société face à ce dernier.

Les progrès scientifiques qui peuvent être réalisés dans ces domaines doivent être évalués en termes d'apports pratiques pour les acteurs du secteur. Les responsabilités de la gestion du risque sont partagées entre plusieurs services de l'Etat autour de trois grandes phases : prévision et anticipation, gestion de crise, retour d'expérience et prévention. Chacun des acteurs a des besoins, notamment en information spatialisée, pour améliorer ses capacités de réponse à ses missions, précisées par une importante série de textes législatifs et réglementaires. Ces trois phases structurent la suite de ce travail, avec un intérêt tout particulier pour la phase de prévention et d'anticipation, en amont de l'événement. Les outils de modélisation permettent d'atteindre un certain niveau de compréhension et d'appropriation des phénomènes naturels, et donc d'alimenter les phases suivantes de gestion de crise puis de prévention.

1.5 Bibliographie

Alexander D., 2002, *Principles of emergency planning and management*, Terra Publishing, Harpenden, England, 330.

Bourrelier P.-H., 1997, *La prévention des risques naturels, Rapport d'évaluation*, Comité interministériel de l'évaluation des politiques publiques, La Documentation Française, 702.

Caquard S., 2001, *Des cartes multimédias dans le débat public pour une nouvelle conception de la cartographie appliquée à la gestion de l'eau*, Thèse de doctorat de l'Université Jean Monnet de Saint-Etienne, 278.

Comby J., 2001, Les problèmes d'échelles dans l'évaluation de la distribution spatiale et temporelle des précipitations de fortes intensités, *Actes du Colloque International Risques et Territoires, Atelier 1 : La connaissance scientifique et technique des risques territorialisés*, Lyon 16-18 mai 2001, 213-226.

Commission Internationale pour le Protection des Alpes (CIPRA), 1998, *Rapport sur l'état des Alpes. Données, faits, problèmes. Esquisses de solutions*, Edisud.

COMITAS, Commission Ministérielle de la Terminologie de la Télédétection Aérospatiale, 1988, Glossaire des termes officiels de la télédétection aérospatiale, *Bulletin de la SFPT*, No 112, 63.

Cour des Comptes, 2000, Rapport Public, Chapitre IV Environnement, équipement et aménagement du territoire, 543-566.

Cour des Comptes, 1999, Rapport Public, Chapitre IV, Titre 6 La prévention des inondations en France (http ://www.ccomptes.fr).

Cudennec C., 2001, Le bassin versant, territoire structurant les risques hydrologiques, *Actes du Colloque International Risques et Territoires, Atelier 2 : La gestion des risques territorialisés*, Lyon 16-18 mai 2001, 247-260.

Cutter S.L., 2001, A research agenda for vulnerability science and environmental hazards, *Update*, International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, No. 2, http ://www.ihdp.org.

Dauge Y., 1999, Les politiques publiques de prévention des inondations, Rapport au Premier Ministre, La Documentation Française, 56.

Dauphiné A., 2001, *Risques et catastrophes, Observer Spatialiser Comprendre Gérer*, Armand Colin, Paris, 288.

Faye J., 2000, Les PPR, la prévention des risques naturels, *Dossier de la revue Géomètre*, No 2, Février, 35-52.

Galley R., Fleury J., 2001, Rapport de la commission d'enquête sur les causes des inondations répétitives ou exceptionnelles et sur les conséquences des intempéries afin d'évaluer les coûts ainsi que la pertinence des outils de prévention, d'alerte et d'indemnisation, Assemblée Nationale.

Garry G., 1988, *La cartographie des plans d'exposition au risque inondation*, La Documentation Française, 115.

Garry G., 1997, *Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), Guide Général*, La Documentation Française, 76.

GEM Risques, 2002, Terminologie en science du risque, d'après le document de travail du colloque international *Dire le risque : le risque mis en examen*, Mèze, 18-20 mai 2001, par Chloé Griot et Pierre Alain Ayral (EMA), 83.

Gendreau N., 1999, La méthode Inondabilité (http ://www.cemagref.fr).

Gleick J., 1987, *La théorie du chaos - vers une nouvelle science*, Champs Flammarion.

Graillot D., Londiche H., Dechomets R., Batton-Hubert M., 2001, Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations, *Actes du Colloque SIRNAT 2001*, Sophia-Antipolis, 6-7 décembre.

Kert C., 1999, Rapport sur les techniques de prévision et de prévention des risques naturels en France, Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques, 261.

Liévois J., 2001, Scène de risque, *Actes du Colloque International Risques et Territoires, Atelier 2 : La gestion des risques territorialisés*, Lyon 16-18 mai 2001, 159-171.

Lolive J., 2001, Comment traiter la question environnementale : politiques d'impact ou cosmopolitiques ?, *Actes du Colloque International Risques et Territoires, Atelier 2 : La gestion des risques territorialisés*, Lyon 16-18 mai 2001, 49-63.

Maurel P., Raclot D., Puech C., 2001, Apports de la télédétection à très haute résolution spatiale à l'étude du risque d'inondation, *Actes du Colloque SIRNAT 2001*, Sophia-Antipolis, 6-7 décembre.

Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 1998, *Guide général des Plans de Prévention des Risques Naturels Prévisibles*, DPPR, La Documentation Française.

Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2000, *Jurisques - Prévention des risques naturels, Jurisprudence Commentée*, 1re édition, DPPR-SDPRM.

Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, 2001, *Textes relatifs à la prévention des risques naturels majeurs, Recueil des textes fondateurs*, 1re édition, DPPR-SDPRM, 155.

Monachesi A., 2001, Un territoire pertinent pour la gestion de l'eau. Les risques d'inondation et de sécheresse dans un bassin versant endoréique argentin, *Actes du Colloque International Risques et Territoires, Atelier 2 : La gestion des risques territorialisés*, Lyon 16-18 mai 2001, 31-48.

Parent du Châtelet J., 2003, Aramis, le réseau français de radars pour la surveillance des précipitations, *La Météorologie, Spécial Observation, Vol. II*, 8e série, No 40, 44-52.

Puech C., Raclot D., 2002, Using geographical information systems and aerial photographs to determine water levels during floods, *Hydrological Processes*, Vol. 16 (8), 1593-1602.

Williamson R.A., Hertzfeld H.R., Cordes J., Logsdon J.M., 2002, The socioeconomic benefits of Earth science and applications research : reducing the risks and costs of natural disasters in the USA, *Space Policy*, Vol. 18 (1), 57-65.

Textes législatifs et réglementaires

Loi n ° 82-600 du 13 juillet 1982. Relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles.

Loi n ° 87-565 du 22 juillet 1987. Relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs.

Loi n ° 92-3 du 3 janvier 1992. Sur l'eau.

Loi n ° 95-101 du 2 février 1995. Relative au renforcement de la protection de l'environnement.

Loi n ° 2000-1208 du 13 décembre 2000. Relative à la solidarité et au renouvellement urbain.

Loi n ° 2003-699 du 30 juillet 2003. Relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.

Code Général des Collectivités Territoriales.

Décret n ° 90-918 du 11 octobre 1990. Relatif à l'exercice du droit d'information sur les risques majeurs pris en application de l'article 21 de la loi n ° 87-565 du 22 juillet 1987.

Décret n ° 95-1089 du 5 octobre 1995. Relatif aux plans de prévention des risques naturels prévisibles.

Circulaire du 22 juillet 1993. Relative à l'annonce des crues et d'alertes en matière de risques d'inondations (Env.).

Circulaire du 24 janvier 1994. Relative à la prévention des inondations et à la gestion des zones inondables (Int., Equip., Env.).

Circulaire du 27 janvier 1994. Relative au plan de prévention des risques naturels.

Circulaire du 2 février 1994. Relative aux dispositions à prendre en matière de maîtrise de l'urbanisation dans les zones inondables (Premier Ministre).

Circulaire du 17 août 1994. Relative aux modalités de gestion des travaux contre les risques d'inondation (Int., Agri., Env.).

Circulaire du 24 avril 1996. Portant dispositions applicables au bâti et ouvrages existants en zones inondables (Equip., Env.).

Circulaire du 19 mai 1998. Précisant les règles de constitution des dossiers concernant les demandes de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle et les modalités de leur instruction par la commission (Eco., Int.).

Références Internet

(CINDY@), Pôle Cyndinique de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris,
http ://www.cindy.ensmp.fr

(DFO@), Dartmouth Flood Observatory,
http ://www.dartmouth.edu/∼floods

(IFEN@), Institut Français de l'Environnement,
http ://www.ifen.org

(MEDD@), Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (depuis mai 2002),
(MATE@), Ministère de l'Aménagment du Territoire et de l'Environnement
http ://www.envionnement.gouv.fr

Chapitre 2

Principes de télédétection

L'objet de ce second chapitre est de préciser les notions physiques fondamentales de la télédétection. Les différents aspects relatifs aux techniques d'acquisition passives optiques sont d'abord présentés, en s'intéressant notamment aux longueurs d'ondes utilisées et aux réponses spectrales caractéristiques des classes d'objets. Les bases physiques de la télédétection par micro-ondes sont ensuite abordées selon un schéma similaire. Les caractéristiques des systèmes employés au cours de l'étude sont rassemblées en annexe A et résumées à la fin de ce chapitre (tab. 2.4 et 2.5).

2.1 Télédétection optique passive

La télédétection optique passive utilise les rayonnements réfléchis ou émis par les objets détectés. L'acquisition dans plusieurs bandes, ou intervalles de longueurs d'onde, permet d'identifier les objets par l'étude de leur signature spectrale. Pour plus d'informations sur les bases physiques de la télédétection, on se réfèrera utilement aux manuels de Bonn et Rochon (1993) ou de Girard et Girard (1999).

2.1.1 Les longueurs d'onde

Le spectre électromagnétique se décompose en plusieurs régions dont certaines sont exploitables en télédétection (fig. 2.1) :
- le visible qui s'étend de 0.4 à 0.7 μm et contient les trois couleurs fondamentales de la synthèse additive (le rouge entre 0.6 et 0.7 μm, le vert entre 0.5 et 0.6 μm, le bleu entre 0.4 et 0.5 μm),
- le proche infra rouge (PIR) de 0.7 à 1.5 μm,
- le moyen infra rouge (MIR) de 1.5 à 3 μm,
- l'infra rouge thermique de 3 à 15 μm,
- les hyperfréquences de 1 mm à 1 m.

L'acquisition d'information par la mesure de l'intensité réfléchie ou émise est réalisée à travers l'atmosphère. Sa composition chimique conditionne sa réaction à une excitation électromagnétique. On s'intéresse principalement aux bandes spectrales qui sont le moins affectées par ce phénomène d'absorption de l'énergie, où l'atmosphère est transparente telle une fenêtre. Les graphes de la figure 2.2 montrent nettement des zones du spectre pour lesquelles toute acquisition est impossible, comme dans certaines bandes de l'infra rouge thermique par exemple. Par contre, dans le domaine du visible, on peut constater que la transmission est presque totale.

Avant de s'intéresser à la définition des signatures spectrales des objets, il est utile de préciser les grandeurs propres à la propagation des ondes électromagnétiques et à leur comportement lors de la rencontre d'un dioptre. La nature du dioptre va conditionner son interaction avec l'onde. Cette interaction comporte trois composantes (fig. 2.3) : l'absorption, la réflexion et

la transmission, mesurées respectivement par l'absorptance, la réflectance et la transmittance (rapports des énergies absorbées, réfléchies ou transmises avec l'énergie incidente).

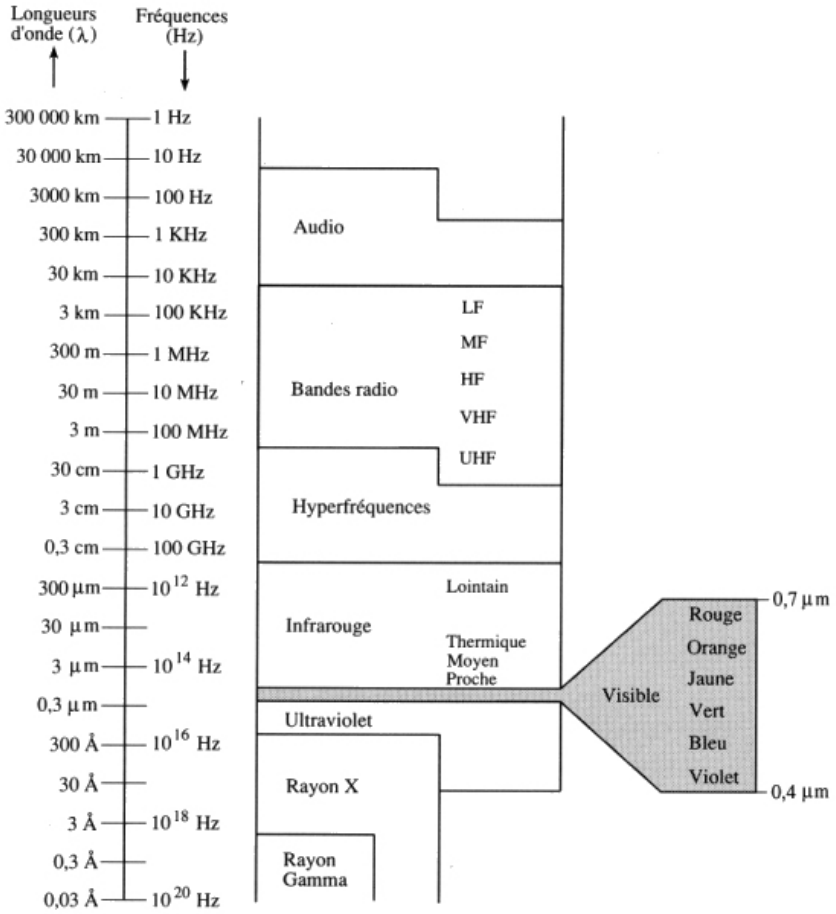


FIG. 2.1 – Le spectre électromagnétique (Bonn et Rochon, 1993)

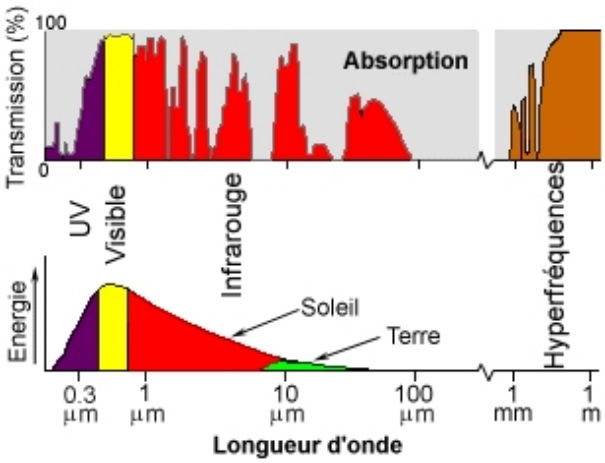


FIG. 2.2 – Fenêtres atmosphériques et spectres d'émission du Soleil et de la Terre (CCRS@)

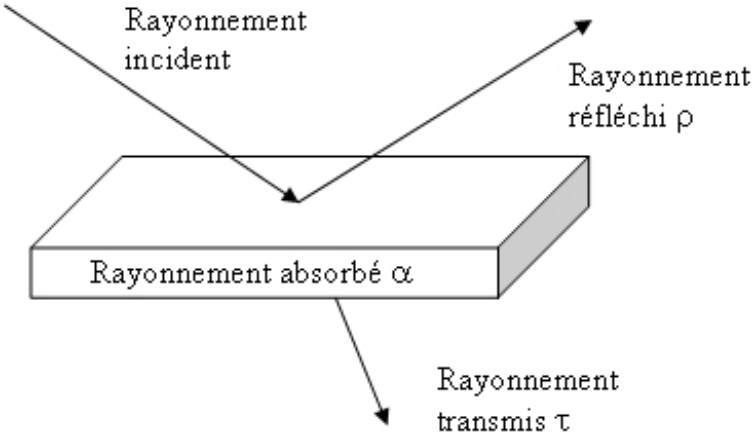


FIG. 2.3 – Absorption, réflexion et transmission (Bonn et Rochon, 1993)

L'absorptance α quantifie la part d'énergie incidente qui est absorbée par l'objet. La transmittance τ évalue la part d'énergie incidente qui va traverser l'objet sans être altérée. Enfin, la réflectance ρ mesure la quantité d'énergie renvoyée par la surface. Lorsque la source d'énergie est le Soleil et que l'on s'intéresse aux surfaces planétaires, on parle alors d'albédo.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \tag{2.1}$$

Concernant la réflexion de la lumière solaire, de nombreuses études se sont intéressées à la quantification de la réflectance bidirectionnelle. Elle se définit comme un rapport de luminances (intensité émise par unité de surface dans une direction par une source non ponctuelle) réfléchie et incidente. Dans le cas d'une surface qui peut être considérée comme lisse au regard de la longueur d'onde, on observe une réflexion spéculaire, alors que lorsque la rugosité augmente, la surface réfléchit dans toutes les directions. On parle dans ce cas de réflecteur lambertien, pour lequel la luminance réfléchie est indépendante des angles. Pour les surfaces naturelles, on observe plutôt une combinaison de ces deux comportements limites. La notion de réflectance bidirectionnelle dépend des longueurs d'ondes employées, de la nature et de la géométrie des surfaces de réflexion, des angles de l'éclairement solaire et de visée du capteur.

2.1.2 Les signatures spectrales

L'analyse du signal électromagnétique réfléchi ou émis par une surface permet d'en caractériser la composition. Dans le domaine spectral de la télédétection optique, l'émission est prépondérante dans l'infra rouge thermique (IRT) alors que le phénomène de réflexion est prédominant dans le visible. On s'intéresse alors aux albédos de différentes classes d'occupation du sol : les surfaces en eau, les surfaces minérales et les surfaces végétales.

La réflectance assez basse des surfaces en eau dans le domaine visible (en particulier dans le vert et le rouge) est due principalement à l'absorption. Cependant, elle peut être modifiée par la présence de matière en suspension ou de matières organiques dissoutes, augmentant l'absorption du bleu (Guyot, 1989). Par contre, la réflectance est quasi nulle dans l'infra rouge. Ces différents aspects permettent d'identifier les zones aquatiques à partir d'images optiques.

Les surfaces minérales naturelles ou artificielles ont des réponses caractéristiques (Bonn et Rochon, 1993), essentiellement fonction de :
– leur nature,
– leur teneur en eau,

– leur teneur en minéraux,
– leur rugosité.

Pour les surfaces minérales artificielles, on retiendra notamment l'exemple des zones industrielles et commerciales qui présentent des réflectances très fortes dans le visible.

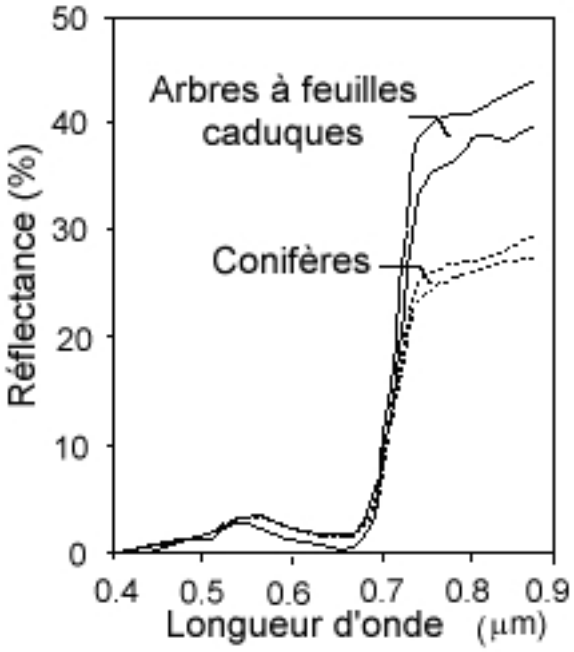


FIG. 2.4 – Signatures spectrales de végétations arborées (CCRS@)

La végétation présente une signature spectrale mettant en évidence une opposition significative entre le visible et le proche infra rouge (fig. 2.4). Cette caractéristique provient de l'activité chlorophylienne et de la présence d'eau dans les feuilles. Une des difficultés de la végétation est la variation au cours des saisons de sa signature : au maximum de la période végétative, l'écart entre le rouge et l'infra rouge est maximal ; alors qu'en cas de stress hydrique ou à la senescence, l'inflexion très nette (généralement appelé *red edge*) de la signature dans le rouge tend à s'atténuer, et le passage du visible vers l'infra rouge se fait plus continûment (Carter et Miller, 1994).

2.1.3 Les indices

La connaissance et la prise en compte des différentes caractéristiques spectrales des objets permettent d'envisager des méthodes d'analyse basées sur l'emploi simultané de plusieurs canaux d'acquisition, sous forme de combinaison linéaire ou de rapports. Ces valeurs synthétisent l'intensité d'un phénomène trop complexe pour être décrit par des paramètres simples et connus (Bannari *et al.*, 1995).

Indices de végétation normalisés

L'indice de végétation normalisé classique (*NDVI, Normalized Differential Vegetation Index*) est défini couramment par :

$$NDVI = \frac{Rouge - PIR}{Rouge + PIR} \tag{2.2}$$

Il utilise explicitement la grande différence entre les réflectances dans le rouge et le proche infra rouge. Cependant, cet indice n'est efficacement utilisable que pendant les périodes végétatives, lorsque l'activité chlorophylienne est importante.

On peut également rencontrer un indice de construction similaire qui est moins sensible aux conditions atmosphériques que le précédent par l'utilisation du moyen infra rouge, rendant compte à la fois de l'activité chlorophylienne et de l'état hydrique des plantes.

$$NDVI3 = \frac{MIR - PIR}{MIR + PIR} \tag{2.3}$$

Clandillon *et al.* (1995) proposent de combiner ces deux indices pour cumuler leurs avantages et contrer leurs limites respectives. De plus, cette étude portant sur la validation des apports du moyen infra rouge propose d'exploiter d'autres combinaison de canaux visibles et infra rouge tels que l'indice de brillance ou l'indice normalisé d'humidité.

Indice de brillance

Cet indice présente une sensibilité certaine à l'humidité des sols, l'augmentation de la teneur en eau s'accompagnant d'une diminution de la pureté et de la luminance de la couleur.

$$IB = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} X_i^2}}{n} \tag{2.4}$$

avec X_i la valeur du pixel X dans la bande i.

Indice normalisé d'humidité

L'emploi de cet indice se justifie par l'observation que l'augmentation de la teneur en eau d'un sol induit une baisse de luminance plus forte dans les grandes longueurs d'ondes que dans les courtes.

$$INH = \frac{MIR - Vert}{MIR + Vert} \tag{2.5}$$

La composition colorée des indices INH, IB et $NDVI + NDVI3$ permet une bonne discrimination des unités hydro-pédologiques. Une telle image permet alors de procéder à une classification détaillée des sols nus.

De nombreux indices ont été développés pour tirer parti au mieux des configurations spectrales des instruments utilisés. Bannari *et al.* (1995) en proposent une vision synthétique qui permet d'évaluer l'étendue des possibilités.

2.2 Télédétection radar

Cette section s'attache à définir les caractéristiques propres aux techniques d'imagerie radar (Polidori, 1997 ; Maître, 2001). Ce mode d'acquisition actif présente bon nombre de spécificités, tant géométriques que radiométriques. Il apparaît nécessaire d'en rappeler les fondements théoriques notamment la physique du signal, le principe de la synthèse d'ouverture, puis les distorsions et les corrections tant géométriques que radiométriques, pour finir par le principe de la mesure radar.

2.2.1 Physique du signal

Un système radar imageur est composé d'un émetteur et d'un récepteur hyperfréquence. Le premier émet une onde électromagnétique en direction de la surface terrestre, pour que le second en perçoive les échos réfléchis. Woodhouse (2000) montre que le principe de réception peut être comparé à l'audition humaine. La mesure radar revient à comparer le signal reçu avec le signal émis, sur les plans temporel et énergétique. La mesure du temps de parcours de l'onde permet d'accéder à la distance entre l'antenne et la surface, et par conséquent à la distance entre les cibles élémentaires constituant la surface. Du point de vue énergétique, les puissances émises et reçues sont reliées par l'équation du radar :

$$P_r = P_e \frac{G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 D^4 a} \tag{2.6}$$

P_r, puissance reçue ; P_e, puissance émise ; G, gain de l'antenne ; λ, longueur d'onde ; σ, Surface Equivalente Radar (SER) ; a, coefficient de perte par absorption ; D, distance antenne-cible.

La SER est une fonction complexe qui intègre de nombreux paramètres liés à la surface de réflexion elle-même tels que sa géométrie ou sa constante diélectrique, dépendante de la fréquence et de la polarisation du signal radar.

2.2.1.1 Les longueurs d'onde

Les systèmes radar utilisent une gamme de longueurs d'ondes qui s'étale de 1.3 m à 0.8 cm. Cette région du domaine spectral a été divisée en bandes, dont les noms proviennent des désignations militaires.

P	0.225–0.390 GHz	133–76.9 cm
L	0.39–1.55 GHz	76.9–19.3 cm
S	1.55–4.20 GHz	19.3–7.1 cm
C	4.20–5.75 GHz	7.1–5.2 cm
X	5.75–10.90 GHz	5.2–2.7 cm
Ku	10.9–22.0 GHz	2.7–1.36 cm
Ka	22.0–36.0 GHz	1.36–0.83 cm

TAB. 2.1 – Bandes radar, plages de fréquences et de longueurs d'onde (d'après Maître, 2001)

Pour ces différentes bandes radar, l'atmosphère est quasiment transparente. Cependant, pour la définition de systèmes spatiaux, les bandes Ka et Ku sont évitées car elles sont fortement atténuées par la troposphère, de même que la bande P fortement dispersée par l'ionosphère. Les autres bandes sont plus facilement utilisables sur les plate-formes spatiales, ayant chacune leurs capacités propres (Maître, 2001).

2.2.1.2 La polarisation

La polarisation d'une onde se définit par la direction du champ électrique $\vec{E}$ par rapport au plan d'incidence, qui contient le vecteur d'onde $\vec{k}$ et la normale à la surface de réflexion. Quand cette direction est fixe au cours de la propagation et reste dans un plan, le polarisation de l'onde est dite rectiligne et :
- horizontale, lorsque $\vec{E}$ est perpendiculaire au plan d'incidence ;
- verticale, lorsque $\vec{E}$ est contenue dans le plan d'incidence.

Les systèmes de télédétection radar exploitent ces deux configurations. Pratiquement, la polarisation de l'onde intervient à son émission, puis à la réception de l'onde rétrodiffusée par la surface de la Terre. Deux modes peuvent être employés : la polarisation parallèle (émission et réception identiques) et la polarisation croisée (émission et réception opposées). Ces différents modes d'émission/réception présentent des intérêts dans plusieurs domaines, selon la géométrie des éléments étudiés. La polarisation VV (émission et réception en vertical) est très sensible aux éléments verticaux, ce qui la rend très efficace pour les études de rugosité de la surface marine, et la détermination de la vitesse du vent. Au contraire, un radar fonctionnant en mode HH procurera des informations plus pertinentes sur le sol situé sous une culture, telle que du blé, du fait de son fort pouvoir de pénétration dans un couvert végétal essentiellement vertical (fig. 2.5). Ce mode de polarisation donne de très bons résultats pour la détection de l'eau et sa discrimination de la glace (ESA, 2002).

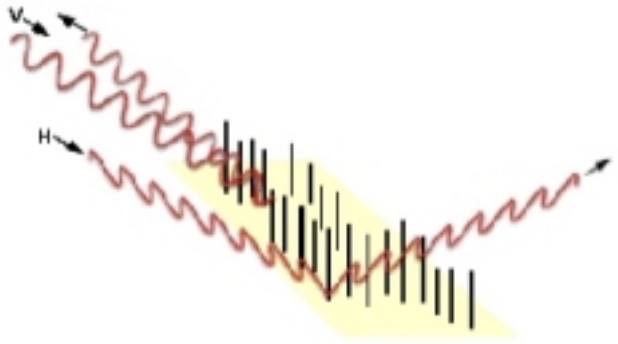


Fig. 2.5 – Influence de la géométrie des réflecteurs selon la polarisation (ESA, 2002)

Les acquisitions en polarisations croisées sont très efficaces pour la détection de cibles sur l'eau, du fait du très faible coefficient de rétrodiffusion de l'eau. L'utilisation de différentes polarisations s'est également révélée très efficace dans l'étude des sols, en particulier de la rugosité de surface et de la teneur en eau (Ulaby *et al.*, 1982 et 1986).

2.2.1.3 Le phénomène de rétrodiffusion

L'interaction entre l'onde radar et les surfaces naturelles est soumise aux interactions évoquées précédemment sur l'imagerie optique (réflexion, transmission et absorption). Le premier phénomène est essentiellement lié à la rugosité de surface, alors que les deux autres ont lieu dans un volume (les premiers centimètres de sol) et sont plutôt liés à la constante diélectrique, principalement influencée par les variations d'humidité.

Rugosité

L'influence de la rugosité est forte pour ces fréquences de radiations : les longueurs d'onde du signal et les variations géométriques de la surface de réflexion sont du même ordre de grandeur. Pour qualifier cette rugosité, on utilise deux paramètres :
- la hauteur quadratique moyenne s, qui représente la hauteur moyenne des irrégularités de la surface,
- la longueur de corrélation l, qui mesure la distance entre deux points statistiquement indépendants.

Ces deux grandeurs sont généralement utilisées dans une forme intégrant la longueur d'onde de la radiation utilisée : ks et kl, où $k = 2\pi/\lambda$ (nombre d'onde), qui les rend plus facilement comparables d'une bande à l'autre.

Concernant la détermination de ces deux paramètres (sur une surface test avec s=1 cm et l=10 cm), Oh et Kay (1998) montrent que la mesure doit être effectuée sur un segment long de 40 à 200 fois la valeur moyenne de la longueur de corrélation l, pour en obtenir une évaluation à ±10%. Ils estiment de plus que pour une estimation surfacique à ±5%, le pas d'échantillonn

2.2.2

age des mesures ne doit pas excéder $0.2l$. Ces exemples numériques illustrent la difficulté d'accès à ces paramètres, notamment sur des surfaces importantes.

Humidité

La constante diélectrique du milieu est le facteur déterminant l'intensité du signal rétrodiffusé. La texture et la granulométrie interviennent de façon moins nette (Fellah, 1997). La constante diélectrique détermine la profondeur de pénétration de l'onde radar : plus elle est élevée, moins l'onde pénètre dans le sol et plus l'intensité rétrodiffusée est forte.

Ulaby *et al.* (1982 et 1986) présentent de nombreuses relations et illustrations des liens entre teneur en eau des sols, fréquence du signal radar, profondeur de pénétration... qui montrent notamment que, pour toutes les fréquences, l'augmentation d'humidité correspond à une augmentation de la constante diélectrique. On peut donc reformuler l'observation précédente : plus la teneur en eau est élevée, plus l'intensité rétrodiffusée est forte.

2.2.2.1 Modèles de réflexion

Différents types de modélisations de l'interaction entre l'onde et les surfaces naturelles ont été développés. Ces modèles se regroupent selon trois catégories :
- théoriques, se basant sur la théorie de la diffusion de l'onde électromagnétique par une surface. Ces modèles sont largement abordés par Fung *et al.* (1992) et Ulaby *et al.* (1982). Parmi ces modèles, on peut retenir le modèle IEM (*Integral Equation Model*) de Fung *et al.* (1992), les modèles SPM (*Small Perturbation Model*), GO (*Geometric Optic*) et PO (*Physical Optics*),
- semi-empiriques, combinant une approche physique et théorique de l'interaction et une analyse empirique des relations entre paramètres bio-physiques et mesures radar,
- empiriques, qui visent à établir des relations, plus ou moins directes, entre la mesure radar et des paramètres bio-physiques. Leur inconvénient majeur est de n'être généralement utilisable que sur la zone où ils ont été établis.

Les modèles théoriques ont des domaines de validité bien établis par rapport aux valeurs de ks et kl. Ces domaines sont reportés sur la figure 2.6, sur laquelle Su *et al.* (1997) représentent le domaine des surfaces agricoles observées en bande C. Avec ERS (5.3 GHz, 5.6 cm), ce domaine est défini par une longueur de corrélation supérieure à 3.5 cm, et une hauteur quadratique moyenne jusqu'à 2 cm. L'application de modèles théoriques est soumise à la connaissance de ces paramètres sur les surfaces étudiées, ce qui constitue la difficulté majeure de leur inversion (Fellah, 1997).

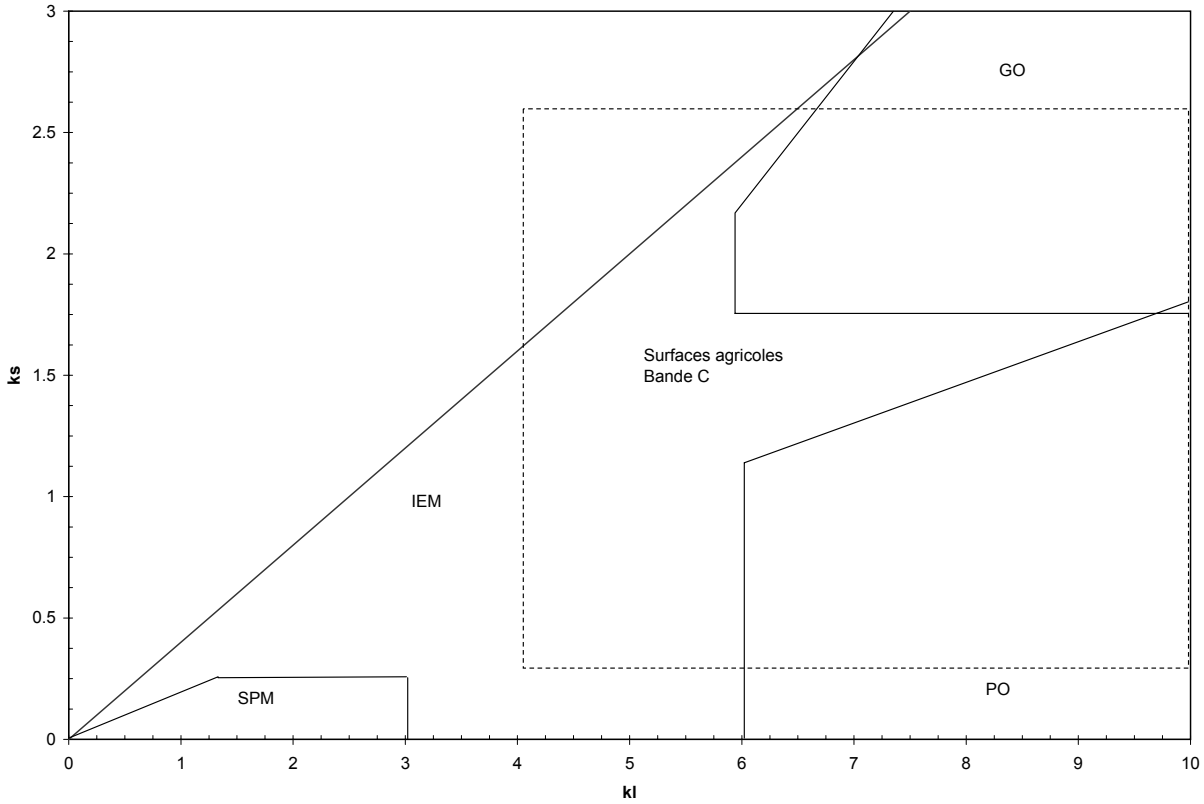


FIG. 2.6 – Domaines de validité des modèles théoriques (d'après Su *et al.*, 1997)

2.2.3 Formation de l'image par synthèse d'ouverture

Les images provenant des radars orbitaux modernes possèdent des caractéristiques géométriques et radiométriques particulières. Cette section rappelle les principes d'acquisition de l'information par le radar, les résolutions et les distorsions résultantes en géométrie et en radiométrie, les méthodes permettant de les corriger.

La synthèse d'ouverture est une technique qui s'applique aux systèmes radar à visée latérale, permettant d'améliorer la résolution géométrique (SAR : Synthetic Aperture Radar ; ou RSO : Radar à Synthèse d'Ouverture). Elle exploite d'une part, le principe de la compression d'impulsion, simulant une impulsion de signal très brève à partir d'une impulsion physique longue (Elachi, 1988) pour augmenter la résolution en distance. D'autre part, la focalisation des échos Doppler d'une cible permet d'améliorer la résolution géométrique, sur la direction azimutale (fig. 2.7). Ce traitement de la phase du signal permet de simuler une antenne de très grande taille, d'où le nom de "Synthèse d'Ouverture". Ces deux traitements RSO donnent accès à des résolutions géométriques bien meilleures, et donc à des produits d'imagerie plus intéressants tant sur le plan physique que thématique.

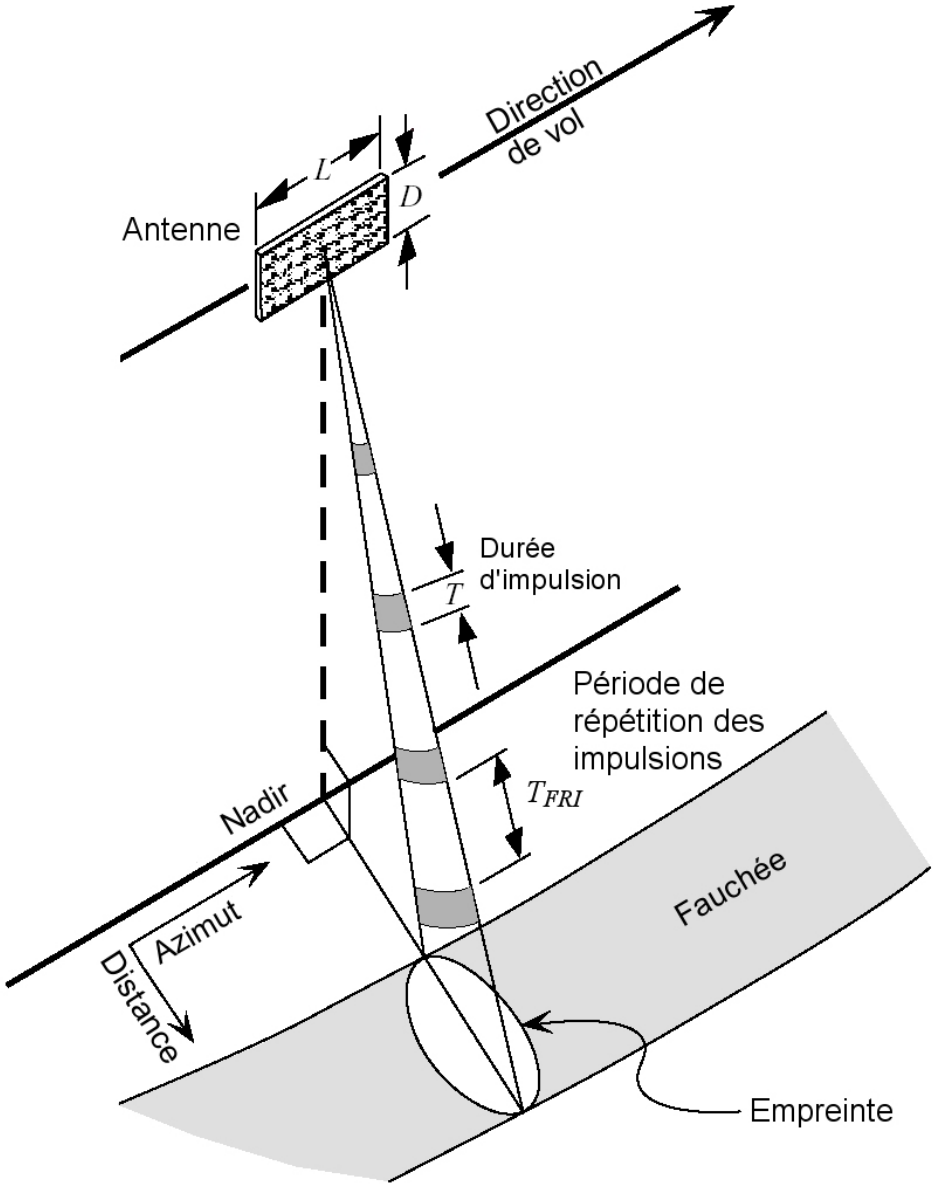


FIG. 2.7 – Géométrie d'acquisition radar, d'après Olmsted (1993)

2.2.3.1 Résolution radiale

Pour conserver une énergie émise suffisamment importante, on réalise une modulation linéaire de la fréquence (*chirp*) pendant la durée de l'impulsion (augmentation de fréquence de Δf). On obtient alors une impulsion dont la bande spectrale B_D est de l'ordre de Δf. Ainsi, la discrimination en temps des impulsions radar est améliorée, accroisant la résolution radiale qui est alors donnée par :

$$\delta_r = \frac{c}{2.\Delta f} \tag{2.7}$$

où c représente la célérité de l'onde électromagnétique. Le facteur $1/2$ est introduit par le trajet aller-retour de l'onde.

2.2.3.2 Résolution azimutale

Le principe de la synthèse d'ouverture permet d'améliorer la résolution azimutale. Cette amélioration est réalisée par l'exploitation de la modulation en fréquence due à l'effet Doppler. Ainsi, et contrairement aux radars à ouverture réelle qui nécessitent de grandes tailles d'antenne pour obtenir une résolution suffisante, les systèmes RSO utilisent la répétition des impulsions atteignant un point quelconque de la surface. Ce procédé simule alors une antenne de grande taille. Le traitement RSO consiste à focaliser les échos provenant d'un même réflecteur élémentaire, par les corrections de phase appropriées (Maître, 2001).

La fréquence Doppler, reliée à la bande passante B_D et à la résolution azimutale δ_a, s'exprime en fonction du temps t et de la distance radiale $R_d(t)$ entre la cible et la source, animée d'une vitesse v par rapport la cible :

$$R_d(t) = \sqrt{R_0^2 + (vt)^2} \cong R_0 + \frac{v^2 t^2}{2R_0} \tag{2.8}$$

avec R_0 l'altitude de la source et $vt << R_0$.

La fréquence Doppler s'exprime alors :

$$f_D = -\frac{2}{\lambda}\frac{dR_d(t)}{dt} = \frac{-2v^2}{\lambda R_0}t \tag{2.9}$$

On constate la linéarité de la relation liant la fréquence Doppler au temps. De plus, la largeur de la bande Doppler B_D s'exprime comme une fonction simple de la vitesse v de la plate-forme et de la dimension L de l'antenne :

$$B_D = \frac{2v}{L} \tag{2.10}$$

On peut alors relier la résolution azimutale théorique à la largeur de la bande d'acquisition Doppler :

$$\delta_a = v\frac{1}{B_D} = \frac{L}{2} \tag{2.11}$$

Ainsi, plus l'antenne sera de taille réduite, meilleure sera la résolution azimutale. Cependant, certaines limites sont imposées par les développements techniques : l'antenne doit avoir une taille suffisante pour émettre assez d'énergie et permettre de mesurer les caractéristiques du signal réfléchi. La résolution azimutale optimale nécessite une focalisation parfaite du RSO, *i.e.* la meilleure connaissance possible de l'attitude de la plate-forme, et la qualité du traitement de l'information de phase.

2.2.3.3 Echantillonnage de l'image

Une image radar se forme par accumulation de signaux réfléchis par la surface terrestre au fur et à mesure de l'avancée du système. Les paragraphes précédents détaillent des équations continues, dans l'espace et dans le temps, du signal émis par le RSO. Or, une image est une série discrète de points dans l'espace. Par conséquent, le signal reçu par le RSO est échantillonné à la fois en temps, sur la direction radiale, et en distance, sur la direction azimutale.

Le but de ces échantillonnages est de donner une représentation non-ambiguë du signal modulé (Maître, 2001). Par conséquent, sur la distance radiale, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à la valeur de modulation en fréquence du signal Δf. De même sur la direction azimutale, la fréquence doit être supérieure à la largeur de la bande Doppler, en ne dépassant pas la résolution théorique.

Il est possible de définir les dimensions du pixel, élément élémentaire détecté, en fonction de ces valeurs caractéristiques que sont la fréquence d'échantillonnage F_e et la fréquence de répétition des impulsions (FRI). Ainsi, pour ERS, on obtient une grandeur variable en distance Δd, en fonction de l'incidence du faisceau, et une valeur fixe en azimut Δa.

$$\Delta d = \frac{c}{2.F_e.\sin\theta} = 26 \text{ à } 18m \tag{2.12}$$

$$\Delta a = V_S.T_{FRI} \approx 4m \tag{2.13}$$

La relation 2.12 s'applique sur des zones plates où θ correspond à l'incidence locale (angle entre la direction du faisceau radar et le plan du terrain). Ainsi, la compression d'impulsion permet d'obtenir une meilleure résolution lorsque l'angle de dépression augmente, *i.e.* lorsqu'on passe de la portée proximale à la portée distale.

2.2.4 Distorsions géométriques

Le mode d'acquisition des images induit, au même titre que n'importe quel autre, des déformations géométriques de la scène. Elles se décomposent en déformations dites permanentes, car observées quelle que soit la géométrie de l'objet imagé, et en déformations dues au relief.

2.2.4.1 Distorsions permanentes

Le radar est un outil de télémétrie : il mesure les temps entre l'émission de l'impulsion et la réception du signal rétrodiffusé par le terrain. Cette mesure est par conséquent réalisée dans le plan de l'onde, et la résolution radiale (sans synthèse d'ouverture) décroît de la portée proximale à la portée distale, *i.e.* en s'éloignant du nadir (fig. 2.8).

La géométrie radar dans le plan image (*slant range*) correspond à une échelle de temps dans le plan d'émission du faisceau radar. En terrain plat, le passage de la géométrie radar à la géométrie terrain est relativement simple et ne fait intervenir que l'angle d'incidence du faisceau, la modulation en fréquence du signal et la fréquence d'échantillonnage des mesures (relations 2.12 et 2.13). Par contre en terrain accidenté, la prise en compte de paramètres locaux est indispensable à une correction efficace des effets du relief, et notamment l'incidence locale notée α sur la figure 2.8a (cf. §2.2.5.1).

La position du réflecteur entre les portées proximales et distales va donc déterminer les plus petites dimensions discernables par le RSO. La résolution azimutale reste inchangée si aucun dépointage de l'instrument (*squint*) n'est effectué.

2.2.4.2 Distorsions dues au relief

Le mode d'acquisition des images radar, tel qu'il est illustré par la figure 2.8, engendre des distorsions spécifiques. Elles sont fondamentalement différentes de celles observés avec les capteurs passifs (*e.g.* les appareils photographiques). Ceci constitue une des particularités et une des difficultés de l'interprétation des images radar (Kropatsch et Strobl, 1990).

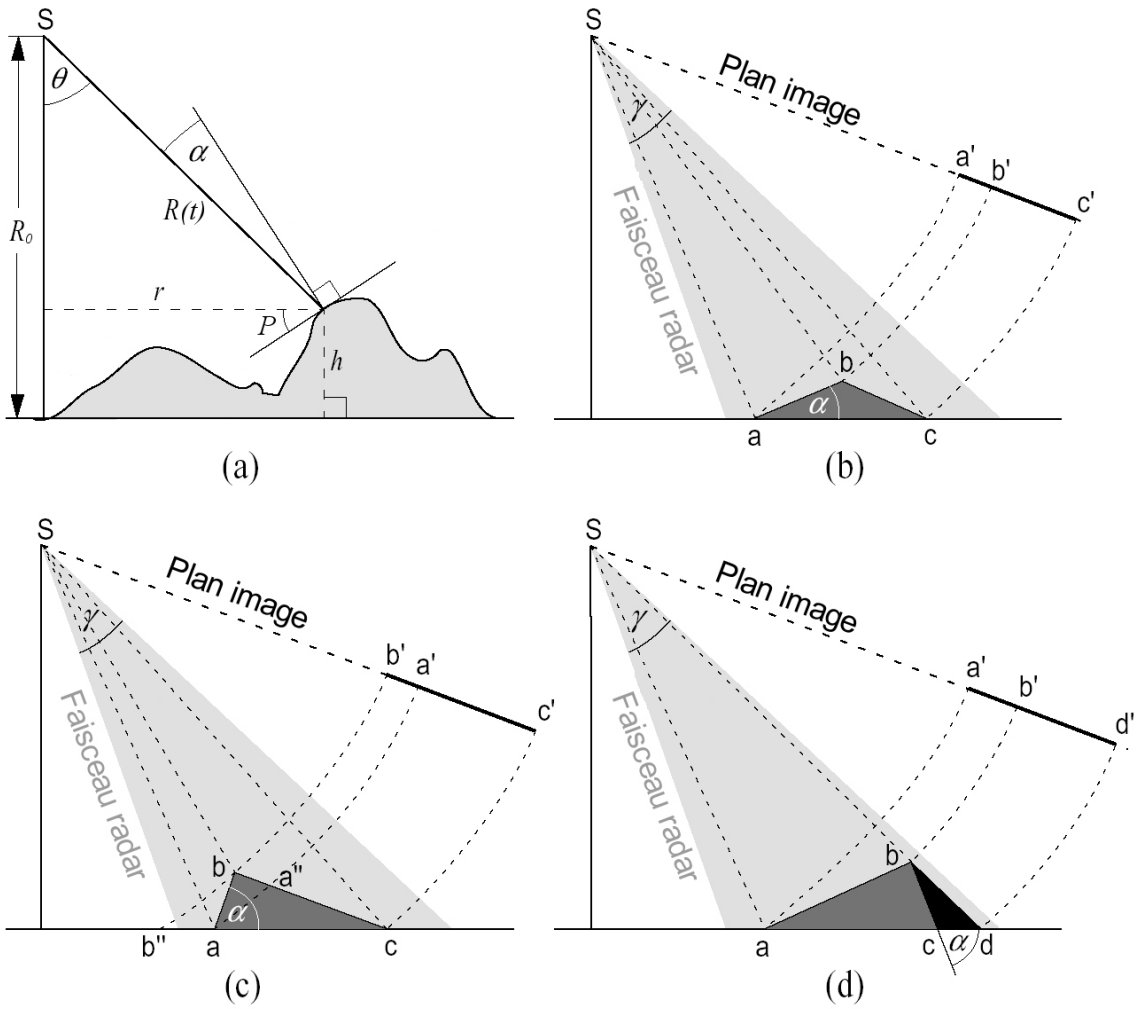


FIG. 2.8 – Grandeurs géométriques caractéristiques de l'imagerie radar (a) et distorsions engendrées par la projection des points du terrain sur le plan image : rapprochement (b), repliement (c) et ombre (d), d'après Olmsted (1993)

Déplacement du relief

En imagerie photographique, la projection centrale provoque un éloignement du nadir des points élevés. Au contraire en distance-temps, les points élevés sont imagés avant les points bas car plus proche de la source d'illumination. De ce fait, ces points se rapprochent du nadir, inversant ainsi l'effet de relief observé sur les images issues de capteurs passifs. Cet effet de repliement du relief est connu sous le nom de déversement (*layover*), illustré par la figure 2.8c. Ces déplacements sont plus importants en portée proximale qu'en portée distale, à l'inverse de la photographie.

Repliement et pseudo-ombre

Deux types de repliement du relief doivent être distingués, selon l'importance des reliefs observés par le capteur. Le premier, le déversement, a été évoqué précédemment. Le second, le rapprochement (*foreshortening*), tient au mode d'acquisition. La projection en distance-temps des trois points définissant une colline dans un plan (fig. 2.8b) montre que, pour le versant faisant face au capteur, la base et le sommet sont imagés dans un intervalle de temps très court. Par conséquent, ce versant est comprimé alors que le versant opposé est considérablement al-

longé. Par ailleurs, l'angle d'incidence de l'onde radar sur certaines pentes peut être tel qu'aucun signal n'atteint la surface (fig. 2.8d) : c'est l'effet d'ombre (*shadow*).

2.2.5 Corrections géométriques : orthorectification

La correction des effets géométriques requiert de connaître les paramètres d'acquisition et la géométrie de la cible. Les premiers sont généralement accessibles par des fichiers descripteurs de la donnée (fichiers d'en-tête contenant des informations sur la position et la vitesse de la plateforme, la géométrie du faisceau radar...). La géométrie de la cible quant à elle, est donnée par un modèle numérique de terrain (MNT). La combinaison de ces informations permet d'établir les relations géométriques entre le faisceau radar incident et le terrain (incidence locale), autorisant la correction des distorsions (Olmsted, 1993 ; Schreier, 1993).

L'orthorectification est le processus de correction d'une image qui prend en compte les caractéristiques géométriques de l'instrument et du terrain, afin de rendre l'image finale parfaitement superposable à une carte.

2.2.5.1 Dérivation de l'incidence locale

Le référentiel standard des données ERS est l'ellipsoïde GEM6 (*Goddard Earth Model 6*), supposant un terrain plat. Or, il s'agit d'exploiter des données altimétriques exprimées dans un système géodésique, afin d'obtenir un angle d'incidence local réel utilisable avec les données corrigées.

Extraction de l'incidence

Les en-têtes de fichiers d'image ERS, au format CEOS, comportent un grand nombre d'informations relatives à l'acquisition et notamment, les angles d'incidence du faisceau radar sur trois pixels de la fauchée : le premier, le médian et le dernier. Ces valeurs sont exprimées par rapport à l'ellipsoïde GEM6 et ne prennent en compte que l'incidence à sa surface et à la latitude du centre de la scène. Un rapide calcul de sensibilité montre que cette incidence (qui fait intervenir le rayon terrestre local) peut être généralisée à toute la scène, considérant ainsi l'ellipsoïde localement plane. L'erreur alors engendrée n'excède pas 10^{-6} rad sur l'angle d'incidence.

La valeur d'incidence obtenue par ce calcul est directement exploitable dans le calcul du coefficient de rétrodiffusion radar (cf. §2.2.8.1), considérant la surface terrestre comme plane. Cette détermination peut-être affinée en utilisant l'incidence locale, qui prend en compte les variations de la topographie. Ainsi, les valeurs d'incidences extraites des en-têtes permettent de calculer les composantes du vecteur tridimensionnel d'incidence, utilisé pour la transformation en incidence locale.

Les MNT sont toujours fournis dans un système géodésique, *i.e.* un ellipsoïde de référence et un datum. Les incidences calculées sur GEM6 doivent être transformées, afin d'être exprimées dans le même système que le MNT. Le calcul avec le système français (ellipsoïde de Clarke 1880 IGN, datum NTF) en différents points de l'image montre que l'influence du changement d'ellipsoïde sur la valeur de l'incidence est minime et par conséquent négligeable. De ce fait, on considère que localement, les deux surfaces de référence sont parallèles. L'erreur engendrée n'excède pas 35 mètres sur la hauteur ellipsoïdale, soit 10^{-5} rad sur l'incidence.

Incidence locale

Une méthode de calcul de l'incidence locale est présentée par Hinse *et al.* (1988). Elle utilise des plans dérivés du modèle numérique de terrain : la pente et l'azimut. L'azimut caractérise

l'orientation du versant par rapport au Nord. En tout point d'un modèle numérique de terrain, dans l'emprise d'une fenêtre de recherche, la pente (en degrés) se calcule par :

$$P = \arctan \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial X}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial Y}\right)^2} \tag{2.14}$$

De la même façon, en tout point du MNT, on peut dériver l'azimut au pixel e dans une fenêtre 3×3 à partir des pentes moyennes dans les deux directions perpendiculaires X et Y :

a	b	c
d	e	f
g	h	i

$$\Delta X = \frac{(c-a)+(f-d)+(i-g)}{3} \qquad \Delta Y = \frac{(g-a)+(h-b)+(i-c)}{3} \tag{2.15}$$

$$A_z = \arctan\left(\frac{\Delta X}{\Delta Y}\right) \tag{2.16}$$

Ainsi, l'angle d'incidence local du faisceau radar en tout point du MNT est obtenu par :

$$\cos I = \cos\theta \cos P + \sin\theta \sin P \cos(A_z - A_c) \tag{2.17}$$

avec θ l'incidence du faisceau radar, ou angle de dépression ; A_c l'azimut du faisceau radar.

Cette relation est d'autant plus simple que les calculs de pente et d'azimut sont généralement des fonctions implémentées dans les logiciels de traitement d'images et de SIG. La seule difficulté est de géoréférencer les données d'incidence extraites des en-têtes.

2.2.5.2 Correction des déplacements dûs au relief

Soit un point de la surface terrestre, repéré par ses coordonnées géocentriques $\vec{R_C} = (x_C, y_C, z_C)$, et un capteur radar positionné en $\vec{R_S} = (x_S, y_S, z_S)$. Le radar localise le point C par une distance R_d et un décalage Doppler f_D :

$$\vec{R_d} = \vec{R_S} - \vec{R_C} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned} f_D &= -\frac{2}{\lambda}\frac{dR_d(t)}{dt} \\ &= -\frac{2}{\lambda R_d}(\vec{R_S} - \vec{R_C}) \cdot (\vec{V_S} - \vec{V_C}) \end{aligned} \tag{2.19}$$

où $\vec{V_S}$ représente la vitesse du radar, $\vec{V_C}$ la vitesse de la cible due à la rotation de la Terre, dans un repère géocentrique inertiel (repère astronomique fixe). La localisation de la cible par le doublet (R_d, f_D) permet d'obtenir sa position (r, s) dans le plan image (*slant range*). Le calcul de la rotation entre la direction de vol et le nord cartographique aboutit finalement aux

coordonnées (X, Y) projetée de la cible. Ainsi, à tout pixel de coordonnées (i, j) dans l'image, correspond un jeu de coordonnées cartographiques (X, Y) par la suite de transformation :

$$(i, j) \leftrightarrow (R_d, f_D) \leftrightarrow (r, s) \leftrightarrow (X, Y) \tag{2.20}$$

A partir de l'image géoréférencée ainsi obtenue et du MNT, il est possible de prendre en compte les déplacements causés par le relief (fig. 2.9).

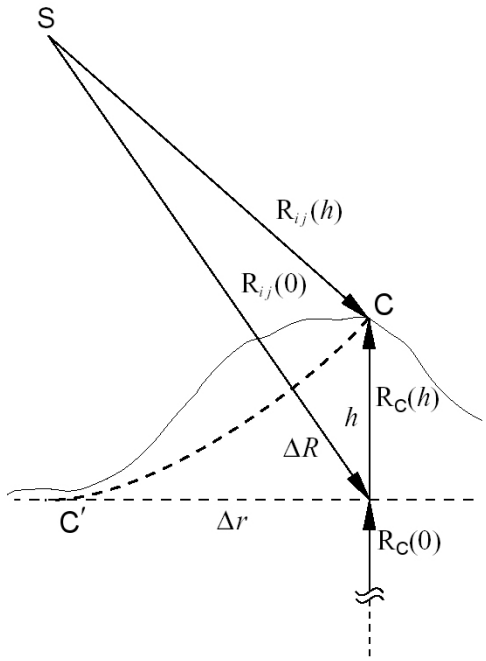


FIG. 2.9 – Géométrie du déplacement du relief par l'imagerie radar, d'après Olmsted (1993)

La transformation précédente affecte des coordonnées cartographiques (X, Y) au pixel (i, j) en assimilant la distance $R_C(h)$ à $R_C(0)$, *i.e.* en assimilant la surface terrestre à un ellipsoïde. Le déplacement généré dans le plan image au point C s'exprime par :

$$\Delta R_d = R_{i,j}(h) - R_{i,j}(0) \tag{2.21}$$

et correspond en pixels à :

$$\Delta j = \Delta R_d \frac{2F_e}{c} \tag{2.22}$$

$$\Delta i = \Delta f_D \frac{FRI}{f_R(h)} \tag{2.23}$$

avec F_e la fréquence d'échantillonage, c la célérité de l'onde, FRI la fréquence de répétition des impulsions, $\Delta f_D = f_D(h) - f_D(0)$ la différence de décalage Doppler en fonction de l'altitude de C, $f_R(h)$ l'accroissement Doppler à l'altitude h (à partir de l'équation 2.9, $f_R(h) = \partial F_D(t)/\partial t$). Finalement, ce calcul permet d'établir la relation entre l'intensité rétrodiffusée par la cible localisée en (X, Y) et le pixel $(i + \Delta i, j + \Delta j)$.

2.2.6 Altération radiométrique

La première visualisation d'une image radar montre une image noir et blanc, fortement bruitée (fig. 2.10a). Ce bruit, le chatoiement (*speckle*), est provoqué par le phénomène d'interférences aléatoires entre les ondes cohérentes émises par le radar au niveau de la surface de réflexion.

L'origine du chatoiement se trouve dans l'infinité de réflecteurs élémentaires qui composent une cellule de résolution. Il peut être modélisé par un bruit multiplicatif (Ulaby *et al.*, 1986). L'intensité mesurée dans chaque cellule de résolution, localisée par le doublet (i, j), est le produit de la réflectivité radar r et d'un terme lié au chatoiement s.

$$I(i,j) = r(i,j) \cdot s(i,j) \tag{2.24}$$

Ce modèle suppose les bruits instrumentaux négligables et le chatoiement pleinement développé. Dans des conditions précisées par Goodman (1976), le chatoiement est dit pleinement développé et possède les caractéristiques statistiques remarquables des variables aléatoires, *i.e.* dans le plan complexe d'une image mono-vue, les moyennes des parties réelle et imaginaire du signal sont nulles, et leurs variances sont égales au carré de l'écart type. Cette catégorie d'image RSO, très courante, présente des coefficients de variation C_v (écart-type normalisé par la moyenne) constants tant pour l'intensité que pour l'amplitude du signal (Fellah, 1997). Ulaby *et al.* (1986) démontrent que pour ces images, sur des surfaces homogènes, la fonction de répartition de la réflectivité radar R suit une loi Gamma :

$$fdp_R = \frac{1}{\Gamma(\alpha)} \cdot \left(\frac{\alpha}{\langle R \rangle}\right)^{\alpha} \cdot \exp\left(-\frac{\alpha \cdot R}{\langle R \rangle}\right) \cdot R^{\alpha-1} \tag{2.25}$$

Dans le cas de surfaces naturelles hétérogènes, la réfléctivité et le chatoiement obéissent tout deux à des lois de probabilité Gamma (2.25), de paramètre α fonction de l'hétérogénéité spatiale. Lopez *et al.* (1993) montrent alors que l'intensité ou l'amplitude suivent une loi statistique dite K-distribution, dont la densité de probabilité est donnée par (ESA, 1990 ; Joughin *et al*, 1993) :

$$p_k(A) = \frac{4\alpha L A}{\Gamma(\alpha)\Gamma(L)\langle R \rangle} \cdot \left(\frac{A^2 \alpha L}{\langle R \rangle}\right)^{\frac{\alpha+L-2}{2}} \cdot K_{\alpha-L}\left(2A\sqrt{\frac{\alpha L}{R}}\right) \tag{2.26}$$

où A correspond à l'amplitude du signal, L au nombre de vues effectif, $\Gamma(x)$ à la fonction Gamma ($\Gamma(x) = (x-1)!$) et $K_n(x)$ est l'évaluation en x de la fonction modifiée de Bessel de deuxième espèce, d'ordre n. α est un paramètre d'homogénéité variable, qui tend vers $+\infty$ pour une surface parfaitement homogène, approchant alors une loi Gamma.

2.2.7 Améliorations radiométriques

Pour réduire les effets du chatoiement sur la résolution radiométrique, plusieurs procédés sont utilisés : les filtrages spatial et temporel.

Le traitement multi-vues est un moyen couramment utilisé (produits type PRI, cf. §A.2.1.2) pour réduire le chatoiement. Ce procédé consiste à moyenner une série de mesures indépendantes pour chaque pixel.

En moyennant L échantillons indépendants d'une image, Ulaby *et al.* (1982) montrent qu'à moyenne constante, le coefficient de variation de l'intensité est diminué d'un facteur $\sqrt{L}$ (on peut retenir qu'une image complexe mono-vue a une résolution radiométrique de 3 dB). Ainsi, on peut réaliser des mesures sur des images L-vues, en intégrant un nombre *Ne* de cellules de résolution qui sont considérées comme des échantillons indépendants. On définit alors un nombre de vues effectif ENL (*Effective Number of Looks*) par le produit *L.Ne*. Le coefficient de variation de l'intensité mesurée, dans l'image multi-vues, est alors donné par :

$$C_v(I_m) = \frac{1}{\sqrt{ENL}} \tag{2.27}$$

Un intérêt tout particulier pour la mesure de paramètres bio-géophysiques apparaît clairement, même si des questions majeures d'échelle de détermination se posent (Fellah, 1995), en particulier pour la dérivation de l'humidité des sols à partir du coefficient de rétrodiffusion.

2.2.7.1 Augmentation de l'ENL par filtrage spatial

Un grand nombre de méthodes de filtrage spatial ont été développées et quelques-unes implémentées dans des logiciels commerciaux. Parmi elles, on peut citer les filtres adaptatifs de Lee (Lee, 1980), Frost (Frost *et al.*, 1982), Kuan (Kuan *et al.*, 1987) ou Gamma-MAP (Lopez *et al.*, 1990 ; 1993).

Plusieurs études proposent des comparaisons d'efficacités de ces différents filtres, justifiant l'élaboration de nouvelles méthodes de filtrage, par exemple basées sur la connaissance de différents paramètres (occupation du sol, incidence locale, pente...) influençant le coefficient de rétrodiffusion (Neusch, 2000).

2.2.7.2 Augmentation de l'ENL par filtrage temporel

La méthode de filtrage temporel suppose le chatoiement pleinement développé. Autrement dit, les variations d'intensité dans différentes images d'une même cible sont dues uniquement au chatoiement et pas à une variation de réflectivité. De plus, les paramètres d'acquisition des images doivent être identiques, ou du moins très semblables. Bruniquel (1996) et Fellah (1997) présentent les tenants et les aboutissants du filtrage temporel, le premier d'un point de vue théorique et le second, dans le cadre d'applications de la mesure radar de paramètres hydrologiques.

Le moyennage temporel des intensités peut être réalisé de deux façons (Fellah, 1997) :
- Moyennage simple :

$$\langle I_t \rangle = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^{S} DN_k^2 \tag{2.28}$$

- Moyennage optimisé : opéré avec une fenêtre glissante pour le calcul de l'égalisation radiométrique, et une pondération minimisant la variance du résultat.

$$\langle I_t \rangle_k = \sum_{i=1}^{S} \alpha_p . DN_i^2 . \frac{\langle DN_k^2 \rangle}{\langle DN_i^2 \rangle} \quad k = 1, ..., S \tag{2.29}$$

Finalement, le produit de fusion temporelle obtenu présente une résolution radiométrique grandement améliorée pour une résolution géométrique inchangée. La figure 2.10 représente de gauche à droite une image brute, une sommation de 6 images et une sommation de 12 images. D'autres méthodes de rehaussement radiométrique peuvent être appliquées aux images radar mais en dégradant la résolution géométrique, voire même la résolution radiométrique.

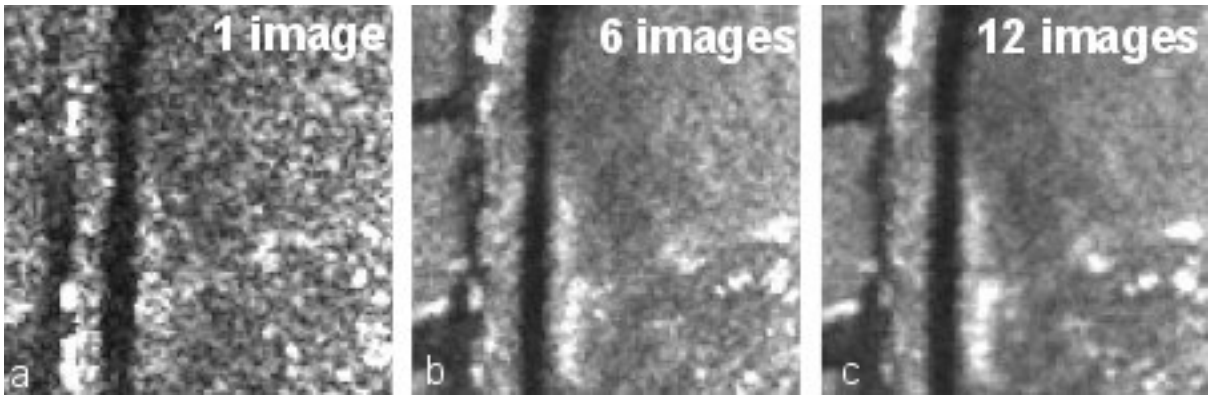


FIG. 2.10 – Gain en résolution radiométrique par sommation temporelle simple

2.2.8 Mesure radar

Le coefficient de rétrodiffusion est un des paramètres mesurables sur une image radar et peut être relié à des paramètres biophysiques, tels que l'humidité, la rugosité du sol ou la végétation. Le mode d'acquisition des informations sur la surface induit des incertitudes, quantifiées en fonction de l'échelle d'étude.

2.2.8.1 Calcul du coefficient de rétrodiffusion

La méthode de calcul du coefficient de rétrodiffusion σ_0, recommandée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) pour les donnes ERS, est proposée par Laur *et al.* (1998). Elle utilise le coefficient de calibration, l'incidence locale sur une surface homogène de l'image.

$$\sigma_0 = \left(\frac{1}{N} \sum_{i,j=1}^{i,j=N} DN_{ij}^2 \right) \frac{\sin \alpha}{K. \sin \alpha_{ref}} \tag{2.30}$$

avec N le nombre de pixels de la surface homogène, DN_{ij} la valeur du compte numérique au pixel (i, j), K la constante de calibration du capteur, α l'incidence locale et α_{ref} l'incidence moyenne de la scène ($\approx 23^\circ$ pour ERS).

Cette valeur n'est représentative que sur une surface assez grande, afin d'intégrer au mieux les variations de radiométrie (*speckle*) inhérentes à l'acquisition d'information par le biais d'ondes cohérentes. Fellah (1995) montre que la précision de détermination du σ_0 est extrêmement dépendante du nombre de vues. Les méthodes de filtrage et l'intégration de la mesure sur une surface permettent d'augmenter le nombre de vues équivalent et d'améliorer cette détermination. Cette étude propose une table de correspondance entre le nombre de pixels pris en compte pour la mesure, le nombre de vues équivalent et l'intervalle de confiance de la mesure pour plusieurs valeurs seuil (tab. 2.2). Elle illustre la nécessité d'intégrer la mesure radar sur une surface importante pour obtenir une évaluation significative (270 pixels, soit plus de 4 ha pour une image à 12.5 m, pour obtenir une mesure 0.5 dB à 90%).

Intervalle de confiance, dB												ENL	Nombre de pixels selon la portée		
0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6				
Niveau de confiance, %													Prox.	Cen.	Dist.
8	16	24	32	40	47	53	59	64	68	72	75	1			
12	24	35	46	56	64	71	77	81	85	88	90	2			
15	30	43	55	66	74	81	86	89	92	94	95	3	1	1	1
17	34	49	62	73	81	87	91	93	95	97	98	4	6	5	5
19	38	54	68	78	86	90	94	96	97	98	98	5	7	6	6
21	42	59	72	82	89	93	96	97	98	99	99	6	9	7	7
23	45	63	76	86	91	95	97	98	99	99	99	7	10	9	8
25	48	66	79	88	93	96	98	99	99	99	99	8	11	10	9
26	50	69	82	90	95	97	98	99	99	99	99	9	13	11	10
28	53	71	84	92	96	98	99	99	99	99	99	10	14	12	11
39	69	87	96	99	99	99	99	99	99	99	99	20	28	23	21
59	89	98	99	99	99	99	99	99	99	99	99	50	68	58	51
75	97	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	100	136	115	102
84	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	150	203	173	152
89	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	200	271	230	203
93	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	99	250	338	288	253

TAB. 2.2 – Résolution radiométrique en fonction de l'échelle d'analyse (Fellah, 1995)

2.2.8.2 Modèles liant paramètres biophysiques et σ_0

Dans les régions où les parcelles de mesure peuvent être végétalisées, on peut retenir la formulation théorique de la rétrodiffusion proposée par Attema et Ulaby (1978).

$$\sigma_{tv}^0 = \sigma_v^0 + \tau^2 \sigma_s^0 \tag{2.31}$$

où la réponse globale σ_{tv}^0 est fonction la contribution σ_s^0 du sol, atténuée d'un facteur $\tau^2 = \exp\left(\frac{-2BV_2}{\cos\alpha_i}\right)$ dépendant de l'incidence α_i et de la contribution $\sigma_v^0 = AV_1(1-\tau^2)$ de la végétation. Les paramètres V_1, V_2, A et B sont des descripteurs de la végétation qui doivent être ajustés par expérimentation. Ce modèle, dit *Water Cloud Model*, a été utilisé à plusieurs reprises, donnant lieu à des simplifications selon les configurations de la végétation et du signal radar. Réduit à son expression la plus simple, il revient à poser la linéarité de la relation entre σ_0 et la teneur en eau des sols et de la végétation (Taconet *et al.*, 1994).

Plusieurs auteurs présentent des modèles empiriques reliant le coefficient de rétrodiffusion radar à la teneur en eau des sols, sur des régions d'Europe de l'Ouest. On retiendra en particulier les relations proposées sur des données ERS par Mauser *et al.* (1994), Weimann et von Schönermark (1995), Wooding *et al.* (1993) et Portman et Mendel (1997). Les expressions numériques de ces relations sont rappelées dans le tableau 2.3.

Plusieurs relations selon la nature du sol et le couvert végétal sont proposées par Mauser *et al.* (1994), qui mettent au préalable en évidence les faiblesses d'une relation établie de façon globale, *i.e.* sans tenir compte de ces deux composantes majeures de l'interaction de l'onde radar avec la surface. Les conclusions de cette étude sont cependant nuancées quant à une application des relations obtenues sans pouvoir procéder à des mesures de terrain, et donc à un ajustement des termes des régressions linéaires.

Auteur	**Relation**	**Limite**	**Zone d'étude**
Mauser *et al.*, 1995	$\sigma^0_{db} = m_v \times 0.144 - 12.832$	Relation générale, affinée selon la nature des sols et le couvert végétal	Freiburg, sud de l'Allemagne
Weiman et von Schönermark, 1995	$m_v = 1.803 \times \sigma^0_{db} + 42.27$ $m_v = 1.417 \times \sigma^0_{db} + 35.95$	Mode descendant Mode ascendant	Saale, Weimar, est de l'Allemagne
Wooding *et al.*, 1993	$m_v = \frac{\sigma^0_{db} + 14.53}{0.262}$	Faible sensibilité à la rugosité de surface	Kent, sud de l'Angleterre
Portman et Mendel, 1997	$m_v = 1.68 \times \sigma^0_{db} + 35.4$	Sols nus ou végétation éparse	Hambourg, nord de l'Allemagne

TAB. 2.3 – Relations empiriques liant humidité de surface et coefficient de rétrodiffusion radar

Les modèles empiriques de couplage entre la mesure radar et l'humidité des sols se fondent sur une analyse conjointe des images et de mesures de terrain. C'est pourquoi on observe une telle variabilité des paramètres exprimés dans les régressions linéaires, qui témoigne de leur caractère très local.

Pour des sols sous différentes conditions hydriques, Fellah (1997) propose une vision simple du comportement du coefficient de rétrodiffusion (fig. 2.11). Elle montre notamment que le comportement linéaire, modélisé par les relations empiriques précédentes, a un domaine de validité limité et que la relation entre coefficient de rétrodiffusion et teneur en eau des sols n'est pas strictement univoque.

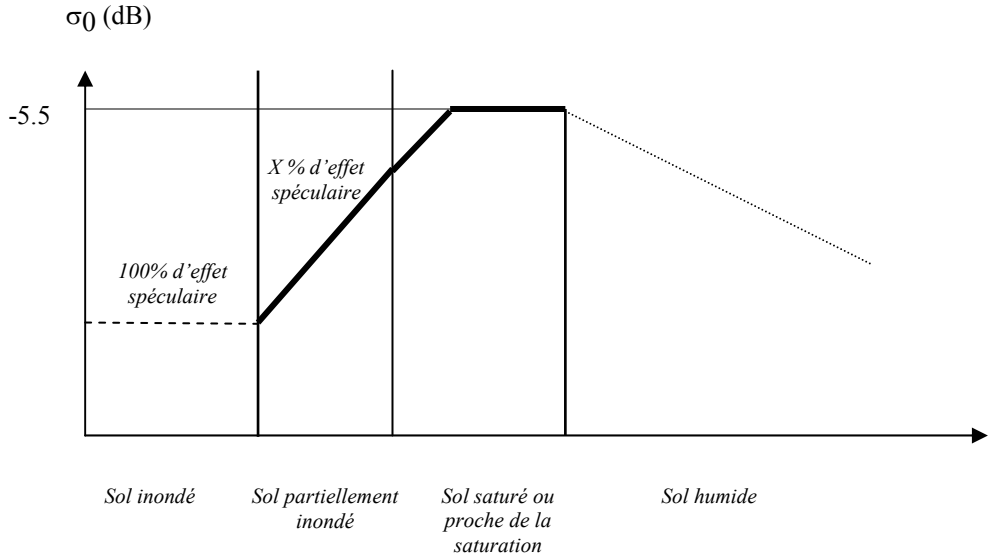


FIG. 2.11 – Evolution du σ_0 pour un sol sous différentes conditions hydriques (Fellah, 1997)

Pays	Système	Capteur	Bandes	Résolution (m)	Fauchée (km)	Revisite (jours)	Service
France	SPOT 1/3	HRV	PAN	10	60-80	26 (jusqu'à 1 avec les 3 systèmes actifs)	1986
			VIS, PIR	20			
	SPOT 4	HRVIR	Mono (Rouge)	10			1998
			VIS, PIR, MIR	20			
	SPOT 5	HRG	PAN	5-2.5			2002
			VIS, PIR, MIR	10			
	Pléiades	HR	VIS, PIR, MIR	0.6-0.8	<20		2006
		Champ Large	VIS, PIR, MIR	2.5	40		
		Multispectral	16-24 bandes				
Europe	ENVISAT	MERIS	VIS, IR (16 bandes)	300-1200	1500	35	2002
USA	*CORONA*	KH	PAN	24-3.6	16-20 × 220-270	-	1959-1969
	Landsat	TM	PAN	15	185	16	1972
			VIS, PIR, MIR (TIR)	30 (120)			
	IKONOS		(PAN) VIS, PIR	(1) 4	13	11	1999
	Quickbird	BHRC 60	(PAN) VIS, PIR	(0.61-1) 2.5-4	14-34	1-4	2001
	Orbview 3		(PAN) VIS, PIR	(1) 4	8	<3	2000
	Terra	ASTER	VIS, PIR, (MIR), (TIR)	15, (30), (90)		16	1999
Russie	*KFA-1000*		(PAN) VIS, PIR	(5) 10	27	-	1986
	KVR-1000		PAN	2	40	-	1984
	MK-4		VIS, PIR, MIR	6-15	170	-	1986
	TK-350		PAN	10	200		
	MONITOR E		PAN (VIS)	8 (20-40)	90 (160)		
	MOS	MESSR	VIS, PIR	50	100-200	17	1987
Inde	IRS 1 A/B	LISS-I	VIS, PIR	36	148	22	1988
		LISS-II	VIS, PIR	72	74 × 2		
	IRS 1 C/D	LISS-III	VIS, PIR (MIR)	23 (70)	142	24	1995
		PAN	PAN	6		5-24	
Japon	*JERS-1*	OPS	VIS, PIR, MIR	18×24	75	44	1992-1998
	ALOS	AVNIR-2	(PAN) VIS, PIR	(3) 10-15	(35) 70	(2) 45	2004
Israël	EROS A		PAN	1.8	12.5	3	2000

TAB. 2.4 – Systèmes optiques actuels, anciens (en italique) et futurs (gras)

Pays	**Système**	**Capteur**	**Bande**	**Incidence**	**Polarisation**	**Réso-lution (m)**	**Fauchée (km)**	**Revisite (jours)**	**Service**
Europe	ERS 1/2	AMI	C	23	VV	25	100	35	1991
	ENVISAT	ASAR	C	15-45	HH, VV, HV, VH	30-2000	56-400	3-35	2002
	COSMO-SKYMED		X-L	20-57	HH, VV, HV, VH	1	10-200	<1	2006
	Roue Interféro.		ind.		ind.	30			
	SMOS (passif)		L		H, V	35-50 km		3	2007
	TerraSAR		X	15-60	HH, VV, HV, VH	1.5-3.5	30-100	2	2005
			L	20-45	Polarimétrique	9-30	40-200		
Canada	RADARSAT		C	10-59	HH	9-100	50-500	4-6	1995
	RADARSAT 2/3		C	10-59	HH, VV, HV, VH	3-100	35-500	2-3	2003
Japon	*JERS-1*		L	35	HH	18	75	44	1992-98
	ALOS	PALSAR	L	8-60	HH, VV, HV, VH	7-100	20-350	45	2004
USA	*Seasat*		L	23-60	HH	12.5	100	-	1978
	SIR-A/B		L	50/20-50	HH	40-25		-	1981/84
	LightSAR		L (X, C)		HH, VV, HV, VH	25	100	1	
Russie	*Almaz*	SAR-10	S	20-50	HH	5-40	25-300		1991
USA-Italie-Allemagne	*SIR-C/X-SAR*	SIR-C	L, C	17-63	Polarimétrique	10-200	15-90	-	1994
		X-SAR	X	15-60	VV				
	SRTM	SIR-C	C	17-63	HH, VV, HV, VH	30	225	-	2000
		X-SAR	X	15-60	VV	30	50		

TAB. 2.5 – Systèmes radar actuels, anciens (en italique) et futurs (gras)

2.3 Bibliographie

Attema E.P.W., Ulaby F.T., 1978, Vegetation modeled as a water cloud, *Radio Science*, Vol. 13 (2), 357-364.

Bannari A., Morin D., Bonn F., Huete A.R., 1995, A review of vegetation indices, *Remote Sensing Reviews*, Vol. 13, 95-120.

Bonn F., Rochon G., 1993, *Précis de Télédétection - Vol. 1 Principes et méthodes*, Presses de l'Université du Québec / AUPELF, 485.

Bruniquel J., 1996, *Contribution des données multi-temporelles à l'amélioration radiométrique et à l'utilisation d'images radar à synthèse d'ouverture*, Thèse de doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, No. 2245.

Carter G.A., Miller R.L., 1994, Early detection of plant stress by digital imaging within narrow stress-sensitive waveband, *Remote sensing of environment*, Vol. 50 (3), 295-302.

Clandillon S., de Fraipont P., Yésou H., 1995, Assessment of the future SPOT4 MIR for wetland monitoring and soil moisture analysis : simulation over the Ried Centre Alsace (France), *SPIE*, Vol. 2585, 102-111.

Elachi C., 1988, *Spaceborne radar remote sensing : applications and techniques*, IEEE Geosciences and Remote Sensing Society, IEEE Press, New York.

ESA, 1990, Study of microwave interaction with the Earth's surface, *Active Microwave Remote Sensing of Vegetation*, Vol. II, ESA/ESTEC, Contract Number 8447/89/NL/PB(SC), 159-178.

ESA, 2002, ASAR Product handbook (http ://envisat.esa.int).

Fellah K., 1995, The impact of the observation scale in hydrological applications of SAR data, ESA-ESTEC/VRL, Earth Sciences Division, Land/Surface Unit, Stagiaire Report, 35.

Fellah K., 1997, *Mesures des paramètres des sols à partir de données des satellites radar pour les applications hydrologiques*, Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, mention Doctorat Européen.

Frost V., Stiles J., Holtzman J., 1982, A model for radar images and its application to adaptative digital filtering of multiplicative noise, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 4 (2), 156-166.

Fung A.K., Li Z., Chen K.S., 1992, Backscattering from a randomly rough dielectric surface, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, 356-369

Girard M.C., Girard M., 1999, *Traitement des données de télédétection*, Dunod, Paris, 529.

Goodman J.W., 1976, Some fundamental properties of speckle, *Journal of Optical Society of America*, Vol. 66 (11), pp. 1145-1150.

Guyot G., 1989, *Signatures spectrales des surfaces naturelles*, Paradigme, 178.

Joughin I.R., Percival D.B., Winebrenner D.P., 1993, Maximum likelihood estimation of K-distribution parameters for SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31 (5), 989-999.
Hinse M., Gwyn Q.H.J., Bonn F., 1988, Radiometric correction of C-Band imagery for topographic effects in regions of moderate relief, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 26 (2), 122-132.

Kropatsch W.G., Strobl D., 1990, The generation of SAR layover and shadow maps from digital elevation models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28 (1), 98-107.

Kuan D., Sawchuk A., Strand T., Chavel P., 1987, Adaptative restoration of images with speckle, *IEEE Transactions ASSP*, Vol. 35 (3), 373-383.

Laur H., Bally P., Meadows P., Sanchez J., Schaettler B., Lopinto E., Esteban D., 1998, Derivation of the backscattering coefficient σ_0 in ESA SAR PRI products, *ES-TN-RS-PM-HL09*, Issue 2, Rev. 5b.

Lee J., 1980, Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*

Lopez A., Touzi R., Nezry E., 1990, Adaptative speckle filters and scene heterogeneity, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 28 (6), 992-1000.

Lopez A., Nezry E., Touzi R., Laur H., 1993, Structure detection and statistical adaptative speckle filtering in SAR images, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14 (9), 535-544.

Maitre H., 2001, *Traitement des images de RSO*, Hermès, Paris.

Mauser W., Rombach M., Bach H., Demircan A., Kellndorfer J., 1994, The use of ERS-1 data for spatial surface-moisture determination, *First ERS-1 Pilot Project Workshop*, Toledo, ESA SP-365, 61-73.

Neusch T., 2000, *Multi-Frequency and Multi-Polarization Synthetic Aperture Radar Data for Modelling Hydrological Parameters*, Aachen : Shaker (Geodäsie ; Bd. 5), Zugl. : Karlsruhe, Univ., Diss.

Oh Y., Kay Y.C., 1998, Condition for precise measurement of soil surface roughness, *IEEE Transacations on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 36 (2), 691-695.

Olmsted C., 1993, *Scientific SAR user's guide*, Alaska SAR Facility, ASF-SD-003, 57.

Polidori L., 1997, *Cartographie radar*, Gordon and Breach Science Publishers, Paris.

Portman F. et Mendel H.G., 1997, Soil moisture estimation in hydrological mesoscale modelling using ERS SAR data, *Third ERS Symposium on Space at the Service of our Environment*, Florence, ESA SP-414, Vol. I, pp. 85-92.

Schreier G., 1993, *SAR geocoding : data and systems*, Wichmann Verlag, Karlsruhe.

Su Z., Troch P.A., de Troch F.P., 1997, Estimation of surface soil moisture by inversion of Synthetic Aperture Radar data, Surface scattering from random rough, bare soils, *Spatial and*

temporal soil moisture mapping from ERS-1/2 and JERS-1 SAR data and macroscale hydrologic modelling for regional climate models (RCM), ESA project A02-B106.

Taconet O., Benallegue M., Vidal-Madjar D., Prévot L., Dechambre M., Normand M., 1994, Estimating of soil and crop parameters over wheat at field scale from airborne radar backscattering dat in C and X-bands, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 50, 287-299.

Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K., 1982, *Microwave remote sensing, Active and passive, Vol. II : Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*, Addison-Wesley, Reading, MA.

Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K., 1986, *Microwave remote sensing, Active and passive, Vol. III : Volume scattering and emission theory, Advanced systems and applications*, Addison-Wesley, Reading, MA.

Weimann A., von Schönermark M., 1995, Soil moisture extraction using active microwave for an evaporation model, *Proceedings of the Conference on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR data for Land Applications*, Toulouse 10-13 Octobre.

Woodhouse I.H., 2000, Tutorial review - Stop, look and listen : auditory perception analogies for radar remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21 (15), 2901-2913.

Wooding M.G., Griffiths G.H., Evans R., 1993, Temporal monitoring of soil moisture using ERS-1 SAR data, *Proceedings of the First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment*, Cannes, ESA SP-359, 641-648.

Références Internet

(CCRS@), http ://www.ccrs.nrcan.gc.ca.

(CHAART@), http ://geo.arc.nasa.gov/cgi-bin/chaart/_dbsetup.

(CNES@), http ://www.cnes.fr.

(DIGITAL GLOBE@), http ://www.digital-globe.com.

(DLR@), http ://www.dlr.de.

(ENVISAT@), http ://envisat.esa.int.

(ESA@), http ://www.esa.int.

(EARTH ESA@), http ://earth.esa.int.

(EURIMAGE@), http ://www.eurimage.com.

(GIRS@), http ://cgi.girs.wageningen-ur.nl/cgi/projects/bcrs/multisensor/report1/14.htm.

(NASA@), http ://www.nasa.gov.

(NASDA@), http ://www.eorc.nasda.go.jp.

(NRO@), http ://www.nro.gov.

(ORBVIEW@), http ://www.tec.army.mil/tio/ORBVIEW.htm.

(SOVINFORM@), http ://www.sovinformsputnik.com.

(SPOT IMAGE@), http ://www.spotimage.fr.

(SPACE IMAGING@), http ://www.spaceimaging.com.

Chapitre 3

L'exploitation des données d'observation de la Terre pour la gestion des risques d'inondation

Ce troisième chapitre a pour objectif de présenter un état de l'art en matière d'utilisation de tous types de données d'observation de la Terre pour la gestion des risques d'inondation. Les différentes études et leurs résultats principaux sont considérés selon les trois grandes composantes de la gestion des risques : la prévision et l'anticipation ; la crise ; le retour d'expérience et la prévention.

3.1 Introduction

L'évolution des techniques spatiales, d'imagerie comme de positionnement, au cours des vingt dernières années, et plus encore au cours des cinq à dix dernières, a été telle que la question de leur application au domaine des risques naturels se pose de façon toujours plus pressante. Actuellement, on peut dire que toutes les sources naturelles de danger pour l'homme ont été, ou sont en cours d'investigation, avec pour chacune d'entre elles un panel défini de méthodes et techniques, qui utilisent toutes, peu ou prou, une information géolocalisée.

La littérature fait état d'un nombre important d'expériences de mise en œuvre de ces techniques pour la gestion des risques naturels. L'utilité et la fiabilité des informations obtenues suscitent de grands intérêts de la part des scientifiques comme des décideurs. Pour exemple, on peut citer les domaines d'application suivants :
- les glissements de terrain (Mantovani *et al.*, 1996 ; Singhroy *et al.*, 1998 ; Henry *et al.*, 2002c),
- les tremblements de Terre (Massonnet, 1995 ; Kontoes *et al.*, 2000),
- les cyclones (Vachon *et al.*, 1999 ; Fellah *et al.*, 2000),
- les éruptions volcaniques (Francis, 1989 ; Horn *et al.*, 1997 ; Pareschi *et al.*, 2000),
- les feux de forêt (Eva et Lambin, 1998 ; Jaiswal *et al.*, 2002), les tempêtes de décembre 1999 (Yésou *et al.*, 2000 ; Wiesmann *et al.*, 2000).

Les crues lentes, de plaine, présentent deux caractéristiques qui rendent leur étude possible grâce aux moyens de télédétection : de larges emprises spatiales sont généralement touchées (de plusieurs hectares à plusieurs dizaines de kilomètres carrés, pendant une longue durée (de quelques jours à plusieurs mois). Ce phénomène touche largement le globe ; le territoire français, comme le reste de l'Europe, n'échappe pas à la règle. Ces deux dernières entités géographiques sont régulièrement le théâtre de grandes inondations, justifiant l'intérêt porté par les Etats, les

agences spatiales nationales et internationales (comme l'ESA, *European Space Agency*) sur les moyens d'obtenir, dans des délais brefs, des informations globales, synthétiques et synchrones sur de vastes territoires.

L'apport des données d'imagerie spatiale pour la gestion du risque d'inondation peut être considéré dans les différentes phases de la gestion de tout risque, naturel ou technologique :
– la prévision et l'anticipation,
– la crise,
– le retour d'expérience et la prévention.

La première partie s'intéresse à l'exploitation et l'intégration des données d'observation de la Terre pour participer à la prévision et l'anticipation d'événements extrêmes. La seconde partie s'attache à faire le point sur l'intégration de ces données et des informations qui en dérivent, dans des procédures opérationnelles de gestion de crise. La littérature sur ce point est assez peu fournie, mais beaucoup d'expériences peuvent néanmoins être mises à profit. Puis, la troisième partie amène à considérer le retour d'expérience et la prévention. L'évaluation des événements extrêmes, l'étude *a posteriori* de leurs causes et effets demeurent le seul moyen d'améliorer la connaissance des phénomènes, de leurs impacts sur un environnement donné, et par conséquent, de parfaire les procédures de prévention et de prévision. Enfin, les nombreux projets nationaux et européens, ainsi que les futurs systèmes d'observation de la Terre sont abordés dans une dernière partie, témoignant d'une volonté générale de disposer de moyens efficaces de lutte contre les conséquences graves des inondations.

3.2 La prévision et l'anticipation

L'exploitation des données satellitaires dans cette phase de prévision et d'anticipation consiste à fournir des plans d'information, des données de base utilisables par des modélisations ou permettant d'en valider les résultats. Les grands intérêts des images satellitaires sont tout d'abord une acquisition très rapide d'information sur de très vastes territoires, mais aussi de permettre d'accéder plus aisément à des variables spatialisées (Dubayah *et al.*, 2000 ; Droogers et Kite, 2002) à différentes échelles (Booij, 2003).

3.2.1 Assimilation par les modèles

L'intégration de paramètres provenant des données d'observation de la Terre dans les modèles hydrologiques occupe une vaste place dans de nombreuses recherches. En effet, on a démontré à de multiples reprises les interactions entre certaines gammes de longueurs d'onde et divers paramètres bio-géophysiques tels que l'humidité de surface des sols nus, leur rugosité, la nature des couverts végétaux (Jackson, 1983 ; Vauclin, 1983 ; Guyot, 1989 ; Neusch, 2000). Ces paramètres sont liés aux processus globaux et locaux intervenant dans le fonctionnement du bassin versant (Engman et Gurney, 1991 ; Schultz et Engman, 2000), comme les précipitations, l'évapotranspiration, le ruissellement, l'érosion des sols, la recharge souterraine... Ces informations portent sur la nature de la surface terrestre même s'il est parfois difficile d'en dériver des informations quantitatives. Toujours est il qu'une même donnée satellitaire peut trouver échos avec plusieurs aspects de la modélisation (Verstraete et Pinty, 1997).

La première application de la donnée satellitaire est son utilisation pour la caractérisation du bassin versant : "le découpage de l'espace en unités homogènes" constitue "le fondement des modèles conceptuels spatialisés" et sert, en avançant l'hypothèse de l'uniformité des paramètres, "à réduire la paramétrisation des modèles physiques" (Gineste, 1998). La seconde application consiste à suivre les évolutions spatio-temporelles des zones saturées dans le bassin (Mattikalli *et al.*, 1996 ; Pauwels *et al.*, 2001).

On introduit ainsi deux catégories de modèles, qui sont issues de l'observation de deux modes de fonctionnement distincts des bassins : par unités homogènes, exploitant plus communément l'imagerie optique pour la segmentation des territoires, ou par zones saturées, utilisant les variations caractéristiques du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de la teneur en eau surfacique des sols (Brun *et al.*, 1990 ; Fellah, 1997 ; Bates *et al.*, 1997). Ainsi, les paramètres majeurs accessibles par l'imagerie spatiale qui ont fait l'objet de développements pour l'assimilation dans les modèles sont : la lame d'eau précipitée, l'humidité et l'occupation du sol, le modelé du terrain.

3.2.1.1 Lame d'eau précipitée

La météorologie est certainement un des plus importants utilisateurs d'imagerie spatiale à buts prévisionnels. L'exploitation des données provenant des radars pluviométriques et des satellites météorologiques géostationnaires tels que METEOSAT ou la série des NOAA permet, grâce aux modèles atmosphériques, hydrologiques ou agro-météorologiques, de prévoir les impacts de cellules convectives ou de fronts dépressionnaires.

Un aspect particulier de la télédétection est l'utilisation de la gamme des micro-ondes, à partir d'émetteur radar au sol, pour le sondage en volume de l'atmosphère. Le principe de la mesure radar en météorologie est très similaire à celui des radars imageurs orbitaux (Sauvageot, 1982). L'utilisation opérationnelle des radars météorologiques en phase d'alerte, stade ultime de la prévision, se répand selon divers modes d'intégration. Carpenter *et al.* (1999) présentent une application SIG de prévision de volume de ruissellement fondée sur la mesure des échos radar, la dérivation des lames d'eau correspondantes, et des MNT. La définition de seuils de pluviométrie critique pour la génération de crues éclairs pour différentes régions et leur adaptation à chaque bassin montrent la difficulté de l'application généralisée d'une méthode unique de prévision. Celle-ci présente néanmoins l'intérêt d'avoir un noyau général suffisamment large, de telle sorte que l'apport de données locales reste très limité. Malgré tout, des divergences peuvent être observées entre les prévisions d'écoulement du système, les prévisions calculées selon le mode traditionnel et les mesures *in-situ*. Ces difficultés proviennent tant de la physique elle-même (comportement de l'eau, partie active du nuage...) que de la calibration des radars météorologiques (Faure, 1993 ; Ciach et Krajewski, 1999 ; Fisher *et al.*, 2001). Quoi qu'il en soit, tous les auteurs de ces méthodologies d'exploitation opérationnelle de radars météorologiques envisagent l'utilisation de données de télédétection spatiale, soit comme une autre source de validation, soit comme une entrée de la méthode.

De plus, des méthodes d'estimation de la lame d'eau précipitée sont développées à partir d'imagerie spatiale uniquement (Moses et Barrett, 1986 ; Georgakakos *et al.*, 2001). C'est notamment l'objet de la synthèse proposée par Petty (1995), qui expose à la fois les plate-formes spatiales utilisées, les longueurs d'ondes employées, les méthodes de calcul et de dérivation des paramètres intéressants. Même si les systèmes présentés sont des satellites météorologiques, *i.e.* à basse résolution (de l'ordre du kilomètre), ils constituent toujours le fondement de la prévision. Des méthodes de spatialisation des pluies basées sur la mesure du coefficient de rétrodiffusion radar à partir de données à plus haute résolution ont fait l'objet de développements en bande L (*e.g.* Ulaby *et al.*, 1983) ou en bande C (*e.g.* Fellah *et al.*, 1994 ; Brown *et al.*, 1997).

Enfin, la contribution des précipitations solides fait l'objet de nombreuses études, concernant en particulier la mesure de l'équivalent en eau liquide de la couverture neigeuse (SWE, *Snow Water Equivalent*), la prévision et le suivi de la fonte. Sur ce sujet, on se référera aux publications de l'IAHS (*International Association of Hydrological Sciences*), notamment les actes de congrès édités par Johnson (1986), Rango (1989) et Owe *et al.* (2001). Différents types de longueurs d'ondes ont été investiguées sur ce sujet : optiques (Baumgartner *et al.*, 1986 ; Qobilov *et al.*, 2001) et micro-ondes (Rott, 1986 ; Armstrong et Brodzik, 2001).

3.2.1.2 Humidité du sol

A l'heure actuelle, peu de modélisations hydrologiques sont capables d'intégrer pleinement le paramètre humidité du sol, indicateur de l'état de saturation du bassin et nécessaire à la modélisation par zones saturées. Ses variations spatio-temporelles sont accessibles via le coefficient de rétrodiffusion mesuré dans les images RSO. Certains modèles sont conçus pour exploiter une information globalisée, dérivable des données d'observation de la Terre, comme c'est le cas de TOPLATS (Pauwels *et al.*, 2002) ou de TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979 ; Gineste, 1998). Ce dernier a notamment montré de bons résultats en utilisant un couplage entre un indice topographique et un indice de saturation potentielle (Gineste *et al.*, 1998). En effet, malgré les incertitudes pesant sur la détermination de ce dernier indice, Francks *et al.* (1998) mettent en avant les qualités du couplage pour la calibration du modèle par rapport à la seule utilisation de données de jauge. Dans la modélisation IFFS (*Integrated Flood Forecast System*), une valeur globale d'humidité est utilisée à l'échelle du bassin versant. Bach *et al.* (1999) proposent ici de ne prendre en considération qu'un indice général de saturation, bien plus grossier que le précédent plus à même à mettre en évidence les zones contributives au débit tout en étant moins sensible aux variations locales.

Les limitations de l'exploitation de l'humidité dérivée de l'imagerie RSO proviennent non seulement des modèles, mais aussi des limites, reconnues, des modèles d'inversion. Leur objectif est de permettre, dans certaines conditions de couverture végétale, l'établissement d'un lien direct entre mesure radar et humidité. Reliant le coefficient de rétrodiffusion et la teneur en eau des horizons superficiels du sol (les premiers centimètres en bande C), ces modèles se regroupent selon diverses classes : théoriques, semi-empiriques et empiriques (Ulaby *et al.*, 1982 ; Fung *et al.*, 1992 ; Engman et Chauhan, 1995). Un grand nombre d'études portent sur leur validation et leur calibration à partir de mesures *in-situ* (Wickel *et al.*, 2001 ; Quesney *et al.*, 2000 ; Neusch et Sties, 1999). Toutes montrent la difficulté de l'établissement de ce lien entre ces grandeurs physiques, le fort besoin de données complémentaires, mais aussi un intérêt certain pour le suivi de l'état hydrologique de la zone et la détection des zones contributives au débit, comme lors des campagnes NOPEX (Paloscia *et al.*, 1999), EFEDA-Spain et HAPEX-Sahel (Van Oevelen et Hoekman, 1999), AGRISCAT, FIFE (Engman *et al.*, 1989), Washita (Wang *et al.*, 1995)...

De plus, le chatoiement (ou *speckle*), bruit aléatoire inhérent à la technique radar, réduit considérablement la résolution radiométrique des images. Fellah *et al.* (1995) mettent en évidence que la mesure radar doit être intégrée sur une surface de 270 pixels (soit plus de 4 ha pour une image ERS échantillonnée à 12.5 m) pour atteindre une mesure moyenne à $\pm$ 0.5 dB avec un intervalle de confiance à 90%. La précision de détermination alors obtenue est de 5% pour une teneur en eau dans le sol comprise entre 10 et 40%. Cette contrainte sur la mesure par le radar s'ajoute à celle imposée par le caractère très variable dans le temps et dans l'espace du paramtre humidité, nécessitant le choix d'une échelle d'analyse adaptée.

La plupart des sources de données RSO ont été investiguées, avec plusieurs configurations de surfaces (sols nus, parcelles agricoles à différents stades végétatifs, prairies...), mettant en évidence des relations entre teneur en eau et coefficient de rétrodiffusion. Un grand nombre de modèles empiriques ont ainsi été mis au point avec des données provenant notamment d'ERS-1/2 (Wooding *et al.*, 1993 ; Mauser *et al.*, 1994 ; Portman et Mendel, 1997), de JERS-1 (Rao et Rao, 1997) ou de la mission SIR-C/X-SAR (Schmullius et Evans, 1997). De plus, les modèles théoriques, cités au chapitre précédent, ont fait l'objet d'adaptations. Parmi ces modèles semi-empiriques, on peut retenir les proposition de Shi *et al.* (1995) ou de Zribi et Dechambre (2003), qui simplifient le modèle IEM (*Integral Equation Model*), ou celles de Dubois *et al.* (1995) et de Oh *et al.* (1997), qui introduisent une dimension empirique au SPM (*Small Perturbation Model*). Ces deux derniers modèles ont été appliqués et améliorés sur un bassin allemand, avec des données multi-fréquences et multi-polarisations (Neusch, 2000).

3.2.1.3 Occupation du sol

L'aspect fondamental, qui différencie l'approche par zones homogènes de l'approche par zones saturées, est l'échelle de temps des variations des informations extraites de l'imagerie. En effet, les paramètres détectés employés présentent une plus grande stabilité dans le temps que les grandeurs hydrologiques et hydrauliques recherchées. Une telle analyse nécessite de disposer des données hydrologiques suffisantes et d'une modélisation suffisament sensible pour mettre en évidence les impacts de changement de l'occupation du sol (Schumann et Schultz, 2000).

Si l'accès à l'état hydrique du bassin présente des intérêts importants pour la modélisation, la connaissance de son occupation l'est au moins autant. La spatialisation de variables comme l'humidité du sol ou la lame d'eau précipitée est renforcée par l'exploitation d'information sur les zones urbaines imperméables, les surfaces végétales participant aux processus hydriques et ainsi évaluer les conditions aux limites des modèles (Bates *et al.*, 1997). On retiendra notamment l'indice de densité foliaire (LAI, *Leaf Area Index*) (Baret et Guyot, 1990) pour accéder à une mesure de l'évapotranspiration (Fohrer *et al.*, 2001). Mauser *et al.* (1997) utilisent notamment cet indice comme donnée d'entrée du modèle PROMET, établi sur une base SVAT (*Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer*) et l'équation de Penman-Monteith, testé sur le bassin de l'Ammer (Allemagne). Divisé en quatre sous-modèles, PROMET évalue l'évapotranspiration, le bilan radiatif, l'humidité du sol et la recharge souterraine à partir de données des systèmes METEOSAT, NOAA-AVHRR, ERS et LANDSAT. Il montre également l'adéquation de ces données avec les fréquences de réactualisation des différents paramètres requises par ce modèle. Ces quelques exemples illustrent l'effort d'évaluation des différents termes du bilan énergétique par les techniques spatiales (Rango, 1989 ; Owe *et al.*, 2001).

Sur ce même bassin de l'Ammer, Bach *et al.* (1999) utilisent d'abord des données Landsat-TM pour décrire le paysage du bassin, puis les données RSO d'ERS pour générer à la fois un modèle numérique de terrain par interférométrie (ainsi que des paramètres descripteurs tels que la pente) et une évaluation de l'humidité des sols. Le test réalisé sur la crue de 1995 en a démontré les capacités, tout en laissant une ouverture sur l'utilisation des images de radar pluviométrique.

L'application de modèles hydrologiques distribués, comme SWAT_{mod} (*Soil and Water Assessment Tool*), permet la simulation de la réponse du bassin à un changement d'occupation du sol. Ce modèle permet alors d'évaluer l'impact de divers paramètres végétaux (saison, capacité d'interception de la canopée, biomasse...) sur les débits (Fohrer *et al.*, 2001). La simulation permet également d'évaluer les impacts de travaux hydrauliques sur les régimes hydriques. Townsend et Foster (2002) présentent une modélisation pouvant utiliser des images RSO (Radarsat) et permettant de simuler débits et champs d'inondation, avant et après la construction d'un barrage.

3.2.1.4 Modelé et caractéristiques du terrain

Le modelé et les caractéristiques du terrain, à partir d'un modèle numérique de terrain de résolution adapté sont également pris en compte dans les modélisations, et notamment des paramètres tels que les pentes, les orientations, des indices topographiques (Beven et Kirkby, 1979), les directions privilégiées d'écoulement, la nature des sols et leurs propriétés hydrauliques (Mattikali *et al.*, 1996). Les méthodes de génération des MNT peuvent se baser sur plusieurs principes, selon les types de données sources disponibles (radar ou optiques). Elles font l'objet de présentations complètes par Charleux-Demargne (2001), par Toutin et Gray (2000) pour le cas précis des images radar, et par Toutin (2001) pour les images optiques. On retiendra quatre principes de génération d'information altimétrique à partir de données de télédétection aérospatiale, dont les deux premières peuvent s'appliquer autant à l'imagerie optique que radar :

- **la clinométrie**, qui dérive l'altitude des objets en fonction de l'ombre qu'ils génèrent. Cette méthode est applicable dans des zones radiométriquement homogènes, à reliefs modérés. Elle fournit des altitudes relatives d'une précision de 20 à 120 mètres avec des données radar et jusqu'à quelques mètres avec des données optiques, sur des cibles spécifiques. Elle n'a cependant jamais fait l'objet d'applications et de validation à grande échelle, la rendant relativement marginale.
- **la stéréoscopie**, qui exploite la capacité naturelle de l'homme à percevoir le relief à partir de deux images d'un objet acquises depuis deux endroits différents. Les précisions atteignables varient grandement selon les données utilisées (photographie aérienne, image optique, radar, ou combinaison des deux), les incidences, l'importance du relief... Pour exemple, la précision sera décamétrique avec Radarsat sur un relief peu marqué alors qu'Ikonos permettra d'atteindre un niveau métrique et qu'une photo aérienne aboutira à un MNT/MNS décimétrique ou mieux.
- **l'interférométrie**, fondée sur la phase du signal radar, permet d'extraire des altitudes relatives ou absolues. Le principe a été exposé dès 1974 (Maître, 2001). La précision absolue de ce mode de génération s'échelonne de 3 à 20 mètres selon notamment la résolution des images source, la longueur d'onde utilisée et l'humidité des zones étudiées. En relatif, on peut obtenir des précisions centimétriques, voire sub-centimétriques (Gens et Van Genderen, 1996). La mission SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) a utilisée cette méthode et annonce des précisions de 10 à 15 mètres pour l'acquisition en bande C, et de 6 à 10 mètres en bande X. En aéroporté, l'interférométrie peut atteindre une précision altimétrique de 50 cm, dans des zones dégagées et de pente inférieure à 20 ° (Aerosensing@).
- **la polarimétrie**, qui se fonde sur la pente locale du réflecteur et la dépolarisation du signal qu'elle engendre. Jusqu'à maintenant, elle n'a été utilisée qu'avec des données aéroportées, mais Radarsat 2 devrait ouvrir de nouvelles opportunités. Les précisions actuellement atteintes vont de 6 à 30 mètres en zone dégagée, et de 10 à 40 en zone forestière.
- enfin, on peut ajouter **l'altimétrie laser**, à des échelles plus restreintes, les techniques LiDAR aéroportées se montrent très efficaces, en affichant des précisions planimétrique infra-métrique et de 15 à 20 cm pour l'altimétrie (Cobby *et al.*, 2001 ; Bates *et al.*, 2002 ; French, 2003).

L'interférométrie radar apparaît souvent comme un moyen rapide et efficace de générer des MNT sur de vastes territoires, incluant les éléments naturels et artificiels qui peuvent modifier les écoulements des eaux de surface (Gebhardt *et al.*, 1997). En fait, la méthode de génération du MNT est à mettre en relation directe avec l'application visée. Pour la modélisation hydraulique, et plus spécifiquement le calcul d'extension de champ d'inondation, une maille fine est requise : une variation altimétrique de 10 cm est significative (Bates et Anderson, 1996). Par contre, la modélisation hydrologique, à l'échelle régionale d'un bassin versant, peut se contenter de résolutions plus communes : Stéréo SPOT (10 à 20 m en planimétrie, pour une précision altimétrique de 7 à 18 m) évalués par Endreny *et al.* (2000), produits SPOT 5 HRS (précisions inférieures à 10 m en altimétrie et 15 m en planimétrie, sans prise de points d'appui), MNT BD Alti IGN (50 m en planimétrie, pour une précision altimétrique décamétrique). Il est néanmoins nécessaire de rappeler que la précision du MNT, qu'il soit généré par interférométrie ou par toute autre méthode, aura une influence considérable sur les évaluations quantitatives des modèles auxquels ils seront rattachés (Kenward *et al.*, 2000).

Enfin, à une toute autre échelle, la rugosité des sols peut avoir une influence forte sur les vitesses d'écoulement des eaux. C'est un des paramètres extraits des images radar dans le projet Floodgen (Remond *et al.*, 1999 ; King *et al.*, 2001) qui s'attache à évaluer les effets du ruissellement de surface. L'exploitation de l'imagerie spatiale vise donc à caractériser les zones favorables ou non aux écoulements, ainsi qu'à l'extension des crues.

3.2.2 Validation

Plusieurs chercheurs se sont penchés sur la question de la validation des résultats de modèles en utilisant les informations déduites des observations spatiales. La donnée RSO est souvent ressortie comme étant efficace pour obtenir l'extension du champ d'inondation à un instant donné de son évolution. Ainsi, il est possible de le comparer avec celui calculé par un modèle hydraulique (Bates *et al.*, 1997), et en déduire ainsi des hauteurs d'eau et des débits en des points particuliers du cours d'eau.

Bates et de Roo (2000) présentent les tenants et les aboutissants des multiples méthodes de calcul, permettant de passer du modèle 1-D hydraulique à la distribution 2-D d'un champ d'inondation. Le modèle LISFLOOD, initialement développé par de Roo *et al.* (1999), est abordé sous une forme modifiée (LISFLOOD-FP) qui exploite un MNT à résolution moyenne (cellules échelonnées de 100 à 25 m) et un algorithme calculant les hauteurs d'eau en tout point. LISFLOOD est un modèle de simulation du ruissellement de surface et de champs d'inondation, à partir d'un événement pluviométrique (De Roo *et al.*, 2000), intégrable dans une interface SIG standard et par conséquent, ouvrant des possibilités de déclinaisons multiples. La validation de ces modélisations par l'analyse d'images RSO et/ou de photographies aériennes est assez concluante, bien que des divergences non-négligeables soient observées entre ces deux types de sources d'information sur le site test de la Meuse aval (Pays Bas).

Le modèle hydraulique HEC-2, développé par l'*Hydrologic Engineering Center* (*U.S. Army Corps of Engineers*), a fait l'objet d'études semblables. L'utilisation d'images ERS seules a permis à Brakenridge *et al.* (1998) de valider les résultats du modèle par la comparaison des profils altimétriques. Cette étude démontre grâce au modèle que le maximum de la crue a été observé par le satellite et de plus, indique à quel endroit sur le linéaire du cours d'eau il a été observé. Horrit et Bates (2002) présentent une étude comparative des performances de HEC-RAS (modèle hydraulique 1-D), TELEMAC 2-D et LISFLOOD-FP (modèles 2-D) utlisant des images ERS et Radarsat, acquises en période de crue sur la Severn (Grande Bretagne). L'imagerie spatiale intervient alors comme source pour la calibration et la validation, en parallèle de MNT à 50 m de résolution.

Concernant les modélisations hydrologiques, le modèle PROMET a fait l'objet de campagnes de validation similaires pour l'humidité du sol, à partir de données ERS. Rombach et Mauser (1997) présentent des écarts entre la détermination de l'humidité du sol par ERS et le modèle, qui proviennent essentiellement de la profondeur d'investigation (environ 5 cm pour le radar, contre 50 cm pour le modèle). La prise en compte de paramètres supplémentaires tels que l'occupation du sol ou la pédologie permet d'aboutir à une meilleure estimation (Mauser *et al.*, 2000). Des conclusions similaires sont établies par Meade *et al.* (1999) avec le modèle MATH et une méthode d'extraction de l'information des images RSO fondée sur l'emploi des réseaux neuronaux artificiels.

3.3 La gestion de crise

Les moyens spatiaux actuellement disponibles pour gérer les crises hydrologiques sont de deux ordres : les systèmes actifs (essentiellement radar) et les systèmes passifs (essentiellement optiques). Tous les systèmes sont susceptibles d'être utilisés afin de couvrir l'événement, en données actualisées comme de référence. Si les conditions atmosphériques lors d'événements hydrologiques graves sont moins favorables à l'acquisition optique que radar, plusieurs cas ont malgré tout été efficacement couverts par les systèmes optiques (Yamagata et Akiyama, 1988 ; Blasco *et al.*, 1992 ; Henry *et al.*, 2002b ; Yésou *et al.*, 2003). De plus, la gestion de crise impose des délais

de mise à disposition de l'information très courts, rendant la donnée spatiale particulièrement adéquate (Profeti et Macintosh, 1997).

Cette phase de gestion de crise nécessite la production de documents cartographiques localisant l'événement et son étendue. Toute donnée nécessite des traitements géométriques préalables pour corriger les effets dûs au système d'acquisition et au relief. Diverses méthodes existent pour dériver ce plan d'information des données spatiales, selon le jeu de données disponibles (image acquise pendant la crue accompagnée ou non d'une image de référence, données altimétriques). Répétées au cours du temps, elles permettent un suivi de la situation et de son impact. Ce type d'opération fait actuellement l'objet de développements importants en terme d'intégration des capacités des nouveaux capteurs et d'architecture de services, où l'accès à une information spatialisée, synthétique et synchrone sur de vastes territoires constitue l'enjeu majeur.

3.3.1 Pré-traitement géométrique

Même dans un contexte de crise, particulièrement contraignant en termes de disponibilité des données, de temps de réaction des services et de temps imparti à la production des informations, il est nécessaire de préparer géométriquement les images, avant toute analyse radiométrique. Deux options sont envisageables pour la géométrie : le géoréférencement et l'orthorectification.

La première est simple et rapide à mettre en œuvre, à partir de cartes ou de produits d'imagerie déjà corrigés. Elle se justifie dans les zones présentant un relief peu marqué, la rendant utilisable pour les inondations de plaine de grande ampleur (Chine, Russie, Amérique du Nord...). Elle ne peut cependant pas s'appliquer à tous les cas et toutes les zones, en particulier les plus encaissées. A partir de produits d'imagerie déjà géoréférencés, Igbowke (1999) présente une méthode d'affinage du référencement relatif en appliquant successivement plusieurs algorithmes de corrélation. Cette méthode est jugée particulièrement adaptée pour la détection de changement en matière d'occupation du sol, mais pourrait s'adapter à la cartographie de champs d'inondation.

L'orthorectification est plus exigeante mais tout à fait abordable en termes de moyens logiciels. Les implémentations actuelles, capables d'exploiter les informations d'orbite, peuvent rendre la saisie de points de calage surperflue. Elles nécessitent l'utilisation d'un modèle numérique de terrain, à une résolution spatiale compatible avec les données utilisées, pour pouvoir corriger les déformations dues au relief. La combinaison de données ERS acquises sur des orbites montantes et descendantes nécessite un MNT d'une précision de 4 mètres en altimétrie (Gigord, 1994).

3.3.2 Cartographie mono-image

L'information sur l'étendue de l'inondation peut-être extraite d'une image spatiale unique, acquise au cours de l'événement, par différentes méthodes de complexité variable : photo-interprétation, seuillage et segmentation d'image. Elles sont applicables tant avec des données optiques que radar, indépendamment de la résolution spatiale.

3.3.2.1 La photo-interprétation

La photo-interprétation assistée par ordinateur consiste à décrire manuellement le contour du champ d'inondation. Elle permet de dresser des cartographies précises à partir de données radar (Laugier *et al.*, 1997) en exploitant la réponse très basse des surfaces en eau non perturbées par le vent. Malgré tout, Oberstadler *et al.* (1997) soulignent la difficulté de l'interprétation d'une seule image radar. Ces cartes peuvent être également établies à partir de données optiques telles que SPOT, en utilisant les canaux de l'infra-rouge pour repérer les traces de l'extension du champ d'inondation 2 jours après le passage de l'eau (Yésou *et al.*, 2003).

Même si des procédés d'extraction plus automatiques sont utilisés, tels que ceux présentés dans la suite de cette section, la photo-interprétation constitue une étape d'expertise manuelle indispensable. Elle est le seul moyen pour l'opérateur de s'assurer de la bonne détection des zones et de corriger d'éventuelles erreurs.

3.3.2.2 Le seuillage

L'utilisation de seuils sur les canaux d'acquisition se fonde sur la réponse spectrale des objets. Sheng *et al.* (2001) présentent les différentes méthodes d'extraction des surfaces en eau, à partir de données NOAA-AVHRR, par application de seuils radiométriques et inter-comparaison des canaux. Clandillon *et al.* (1995) mettent en évidence les excellentes capacités du système SPOT pour une extraction des surfaces submergées. Elles ont d'ailleurs fait leurs preuves en situation de crise réelle lors des crues de la Meuse et du Gard en 2002 (Charte@). Avec les données radar du satellite RADARSAT, Liu *et al.* (2002) exposent une méthodologie de seuillages successifs, combinée à un algorithme de correction des fausses détections et des non-détections, provoquées par le chatoiement.

3.3.2.3 La segmentation

Les méthodes de segmentation d'images utilisent des principes mathématiques élaborés tels que la détection de contours, la logique floue avec le *data mining* ou les réseaux de neurones artificiels (*ANN, Artificial Neural Networks*).

La segmentation d'images par contours actifs a été reformulée par Horritt (1999) pour être applicable aux images radar. Cette formulation prend notamment en compte la distribution statistique du bruit aléatoire des images radar, dont l'intensité suit une loi Gamma. Le modèle du serpent (*Statistical Snake*) utilise une fonction d'énergie sur le principe de la croissance itérative d'un contour jusqu'à la rencontre d'un bord (*i.e.* un changement net de radiométrie). L'objectif est de produire un contour vectoriel continu lissé d'un groupe homogène de pixels. Cette méthode d'extraction a été testée avec succès sur la Tamise, validée par des photographies aériennes synchrones à l'acquisition par ERS-1 (Horritt *et al.*, 2001). La correspondance entre les contours de l'extension de la crue obtenus d'une part par la segmentation des images RSO et, d'autre part, l'interprétation des photographies est évaluée à 70%.

Les réseaux de neurones artificiels font l'objet de nombreuses études, tant sur le plan théorique qu'applicatif. Appliquée à une série temporelle d'images NOAA-AVHRR, cette méthode d'extraction a permis à Zhou *et al.* (1999) de distinguer trois classes génériques (eau, nuages, terres émergées). La délimitation de l'inondation est complétée par l'analyse classique de données Radarsat en mode ScanSAR. Malgré des résultats encourageants, les auteurs suggèrent l'emploi de bases de données externes, topographiques et hydrographiques, pour parfaire les cartographies.

3.3.3 Cartographie multi-images

Lorsque l'image acquise pendant l'événement peut être mise en relation avec une image de référence acquise en régime hydrique normal, on peut procéder à une détection de changement. Selon la nature des capteurs et des produits image utilisés, plusieurs approches de détection sont disponibles.

3.3.3.1 La détection de changement

Concernant la délimitation à proprement parler des zones touchées par le champ d'inondation, la littérature fait état de multiples méthodologies exploitant données radar et optiques, conjointement ou non (Singh, 1989). Plusieurs auteurs (Badji et Dautrebande, 1997 ; Nico *et al.*, 2000)

proposent le calcul d'indices de changement simples tels que la différence normalisée ou le ratio (Rignot et Van Zyl, 1993) entre une image d'archive (en période hydrologique normale) et une image acquise au cours de l'événement. Ce type de calculs permet de produire très rapidement des plans d'information sur l'extension de la crue (Henry *et al.*, 2002a).

D'autres exploitent des techniques d'analyse statistique telles que l'Analyse en Composantes Principales (Fung et Ledrew, 1987 ; Gong, 1993). L'interprétation de la composition colorée de la seconde composante avec les images de référence et de crue permet une cartographie efficace de l'extension de l'inondation au moment de l'acquisition (Brivio *et al.*, 2002). Enfin, Islam et Sado (2000) présentent une méthode d'extraction des champs d'inondation basée sur une segmentation par iso-classes d'une combinaison d'images de crue et de référence.

3.3.3.2 L'information de phase

Pour les données radar, de nombreuses études (Marinelli *et al.*, 1997 ; Smith et Alsdorf, 1997 ; Dellepiane *et al.*, 2000 ; Nico *et al.*, 2000 ; Yésou *et al.*, 2000) montrent l'apport important de la variation de cohérence de phase, obtenue à partir d'une paire interférométrique d'images radar ERS (une avant et une pendant l'inondation), en complément à l'étude de l'amplitude du signal. L'utilisation combinée de ces deux plans d'information radar permet une cartographie sans ambiguïté des zones inondées, qui se manifestent par une chute concomittante de l'amplitude du signal et de la cohérence de phase entre les deux dates. L'utilisation de la cohérence de phase est particulièrement indiquée lorsque les zones considérées sont soumises au vent, occupées par de la végétation ou des bâtiments hauts.

L'analyse polarimétrique, en particulier la différence de phase, constitue un second volet de l'exploitation de l'information de phase. Elle nécesite l'acquisition simultanée de données, avec plusieurs combinaisons de polarisation en émission et en réception. Exploitant les inversions de polarisation dues au mécanisme de double réflexion (Ulaby *et al.*, 1987), cette technique permet de s'affranchir efficacement des effets provenant de la rugosité et de la végétation inondée (Hess *et al.*, 1990 et 1995 ; Wang et Davis, 1997 ; Horritt *et al.*, 2003).

3.3.4 Cartographie altimétrique

Deux types de données sont nécessaires : d'une part, l'image radar de la crue et d'autre part, des données topographiques (cartes, MNT) afin d'évaluer l'altitude de la surface du champ d'inondation à partir de ses limites (Oberstadler *et al.*, 1997 ; Brakenridge *et al.*, 1998). Une autre méthode utilisant l'altimètre radar du système TOPEX/POSEIDON, pour mesurer les hauteurs d'eau du fleuve Congo, est proposée par Rosenqvist *et al.* (1999) pour valider des cartographies de champs d'inondation réalisées avec les données de JERS-1. Cette étude montre à nouveau l'intérêt de l'information altimétrique. Enfin, les variations d'altitudes accessibles par interférométrie sont comparables à la sensibilité des jauges hydrométriques. Cette technique permet alors de disposer d'une information altimétrique fiable sur l'ensemble de la zone inondée (Alsdorf *et al.*, 2001).

L'utilisation de l'information altimétrique peut aussi présenter un intérêt pour combler les lacunes de l'imagerie spatiale, tant sur le plan spectral que temporel. Avec des données à haute résolution (Landsat TM), Wang *et al.* (2002) proposent une méthode de cartographie très simple, néanmoins conditionnée par la couverture nuageuse. En complétant l'analyse par l'inondation d'un MNT, en utilisant les mesures aux stations de jauge comme valeurs de contrainte, cette étude avance de bons résultats, en particulier pour la détermination des zones forestières inondées. Elle met cependant en évidence qu'une telle méthode ne peut être appliquée que dans des zones à relief modéré et à distance raisonnable des jauges. Brivio *et al.* (2002) présentent

une méthode similaire pour compenser la sous-évaluation des surfaces inondées cartographiées à partir d'une image ERS-1 postérieure de trois jours au pic de crue. Validée par les cartographies établies par les services de l'Etat, elle utilise une analyse de voisinage et une fonction de coût évaluée sur le MNT pour déterminer les zones inondées au moment du pic de crue.

3.3.5 Suivi temporel de la crue et de son impact

Les différentes méthodes de cartographies qui viennent d'être exposées sont applicables au suivi dynamique. C'est lors de ce suivi que se situe le goulot d'étranglement de l'exploitation de l'imagerie spatiale pour une majorité d'opérationnels. En effet, les fréquences de passage des satellites sont fixes (35 jours pour ERS par exemple) même si certains systèmes sont capables de dépointage augmentant la fréquence de revisite (SPOT, RADARSAT, ENVISAT), les délais de programmation des systèmes peuvent être assez longs (24h pour SPOT, jusqu'à 72h pour RADARSAT), les temps de pré-traitements des données acquises peuvent repousser l'interprétation de plusieurs jours. De fait, les données utilisées pour la cartographie de crise et le suivi se limitent à celles disponibles sur le moment.

La gestion de la crise et le suivi de l'événement par l'utilisation des technologies d'imagerie spatiale nécessitent de la part des opérateurs satellite la mise en œuvre de programmations ciblées sur l'événement en cours. Hormis le problème technique de disposer au moment voulu d'un système au-dessus de la zone considérée, l'alimentation d'un outil de suivi avec des données d'imagerie à haute fréquence spatiale apparaît comme un objectif majeur pour une gestion à grande échelle (Profeti et Macintosh, 1997 ; Oberstadler *et al.*, 1997).

Plusieurs sources de données spatiales ont déjà été utilisées pour cartographier l'extension des champs d'inondations, ou tout du moins, qualifiées pour ce type d'application. Comme précisé plus haut, l'imagerie radar apparaît comme la solution la plus adéquate puisque la moins sensible aux conditions de nébulosité atmosphérique. Même si cette caractéristique est fondamentale pour l'acquisition en crise, elle n'est cependant pas la seule donnée utilisée pour qualifier l'extension et l'impact d'une crue. Les données optiques et leur exploitation constituent le fondement de tout système visant à évaluer rapidement les impacts d'un événement donné, en fournissant un accès aux enjeux. Ainsi, il est indispensable pour avoir une démarche complète d'analyse du phénomène extrême de pouvoir disposer de ces deux sources de données (Imhoff *et al.*, 1987 ; Tholey *et al.*, 1996 ; Profeti et Macintosh,1997 ; Yésou et Chastanet, 2000).

Plusieurs études ont eu pour objet le suivi temporel d'un événement hydrologique (Smith, 1997). Elles exploitent très souvent plusieurs sources d'imagerie spatiale pour arriver à leurs fins, mais les grands principes restent les mêmes : déterminer l'emprise du champ d'inondation à un instant de la crue, et suivre son évolution géographique. Les couplages avec les données météorologiques et/ou hydrométriques permettent une validation et un enrichissement notable de l'information élaborée. Quoi qu'il en soit, chaque étude a tenté de mettre en place une méthode propre, s'adaptant aux contraintes de la zone choisie et aux images disponibles.

On notera tout de même que les méthodes présentées sont, pour la plus grande majorité, construites *a posteriori* et n'ont pas nécessairement fait l'objet d'une application en situation de crise. Comme cela a été mis en évidence précédemment, l'exploitation conjointe de données optiques et radar apparaît très souvent comme une démarche de base. La donnée optique sert de fond cartographique, voire à établir une description de l'occupation du sol et parfois à délimiter le champ d'inondation, lorsque les conditions météorologiques le permettent. Les données radar, quant à elles, sont utilisées presque exclusivement à la détection du champ d'inondation (ESA SP, de 1993 à 2000). C'est notamment le cas des études utilisant à la fois :

- Landsat TM, ERS-1 et Radarsat sur la crue de l'Oder (Pologne, Allemagne) en 1997, mettant en œuvre les principes de la logique floue pour réaliser des cartographies automatiques sur des séries temporelles d'images RSO, sur 3 semaines avec 5 images (Hagg et Sties, 1998) ; sur les crues de la Glomma (Norvège) de 1995, où Weydahl (1996) envisage l'emploi de Radarsat pour améliorer la fréquence de revisite, et de la bande L pour éviter les fréquents problèmes de rugosité de l'eau en bande C.
- Landsat TM, SPOT et ERS sur la crue du Missouri et du Mississippi (USA) en 1993 mettant en exergue les forces et faiblesses de chacun de ces systèmes pour la cartographie d'impact (Sivaprasad et Bolus, 1994). Sur le même événement, Teti *et al.* (1994) proposent une technique de filtrage polarimétrique des données P3 (*US Navy*) et Air-SAR (*NASA JPL*) permettant une amélioration des images, et par conséquent, de l'information qui en est extraite,
- Landsat TM, NOAA-AVHRR et CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*) en 1982 et 1983 sur les crues de la rivière Parana, en Amérique du Sud (Wiesnet et Deutsch, 1987),
- SPOT et ERS sur les crues en Camargue (France) de 1994, fondée sur une interprétation visuelle des images RSO acquises tous les trois jours pendant les crues (Tholey *et al.*, 1996 ; Laugier *et al.*, 1997), sur les crues de la Saône (France) en 2001 avec une image tous les jours pendant 4 jours (Henry *et al.*, 2002a), de la Meuse (France) en 2002 avec une image tous les jours pendant 5 jours (Henry *et al.*, 2002b), du lac Poyang-Hu et du Yang-Tseu-Kiang (Chine) en 1995 (Prinet *et al.*, 1998),
- SPOT sur la crue du Gard (Yésou *et al.*, 2003) et de la Meuse (Charte@) en 2002,
- IKONOS et ERS, sur la crue de la Meuse en 1995 (Yésou *et al.*, 2000),
- IRS 1A LISS-I et ERS sur les crues de 1988 et 1993 dans la province du Punjab (Inde), qui a permis la mise en évidence des causes et la formulation de recommandations d'aménagement pour limiter les conséquences des événements à venir (Sharma *et al.*, 1996),
- les capteurs RSO et OPS du satellite JERS-1 sur les crues de Corée du Nord, présentant une analyse de l'inter-opérabilité de ces deux capteurs de telle sorte que la méthode proposée soit capable de fournir une carte d'impact en procédant à une simple fusion de données (Kim, 1999),
- Radarsat sur la crue de la Rivière Rouge en 1996 (Patterson *et al.*, 1996). Sur le Nenjiang (Chine), le mode ScanSAR a été combiné à des données NOAA-AVHRR (Zhou *et al.*, 2000) et Landsat TM (Liu *et al.*, 2002).

Ces nombreuses études démontrent les capacités des systèmes d'observation de la Terre pour la cartographie et le suivi des inondations, notamment par l'utilisation combinée de capteurs optiques et radar. Mais l'exploitation de cette synergie entre les deux grandes familles d'imagerie n'est pas absolument nécessaire pour aboutir à une cartographie dynamique d'un champ d'inondation. En effet, de multiples développements se sont portés sur l'utilisation de données optiques seules, en particulier avec les images des satellites météorologiques évoquées précédemment. Malgré tout, l'utilisation des données radar à haute résolution a concentré beaucoup d'efforts, notamment l'interférométrie et la polarimétrie.

L'intérêt de l'amplitude radar pour réaliser des cartographies de l'extension d'une inondation fait désormais l'objet d'un large consensus (Oberstadler *et al.*, 1997). Cependant, dans des conditions de vent défavorables, la rugosité de surface induite entraîne des erreurs de détection qui peuvent être importantes. Par conséquent, l'analyse diachronique de la cohérence de phase interférométrique apporte un élément supplémentaire de la présence ou de l'absence d'eau sur une zone. Des applications à un suivi temporel de l'évolution du champs d'inondation sont proposées par :

- Geudtner *et al.* (1996) sur l'exemple des crues du Rhin sur la période 1993/1994, à partir de paires tandem ERS (3 paires sur 10 jours), où les effets du vent sur l'eau limitaient les possibilités d'élaboration d'une cartographie précise,

– Alsdorf *et al.* (2001) qui montrent, avec des données SIR-C en bande L-HH, l'intérêt de la cohérence de phase pour la détection des surfaces inondées sous les canopées et le suivi de leurs variations.

3.4 Le retour d'expérience et la prévention

Le principal objectif du retour d'expérience est d'alimenter la phase de prévention. Il s'agit de tirer les enseignements des événements passés en analysant leurs différents facteurs déterminants. L'étude *a posteriori* d'événements hydrologiques extrêmes constitue d'une part la meilleure façon d'évaluer les productions en période de crise, si elles ont eu lieu ; et d'autre part, d'évaluer les moyens nécessaires pour se prémunir de faits similaires. C'est pour ces raisons que ces deux phases sont abordées conjointement, refermant la boucle de la gestion du risque. D'autant que l'on constate souvent que les dispositions de prévention sont généralement prises en réaction à une ou plusieurs catastrophes dans une même région, suite à la mise en évidence des carences par une étude *a posteriori*.

3.4.1 Retour d'expérience, mitigation

L'objectif principal de cette phase est de mettre en évidence les éléments qui n'ont pu être analysés pendant la crise. Ainsi, il est possible de tirer le maximum de leçons de l'événement qui vient de se produire, et de prescrire les dispositions qui permettront de limiter les impacts d'une occurrence similaire de l'aléa. La mise en œuvre des dispositions visant à limiter et réparer les conséquences d'un événement d'une ampleur donnée constitue la phase de mitigation.

Puech et Raclot (2002) proposent une méthodologie alliant les nombreux documents photographiques réalisés lors de crues importantes, logique floue et modélisation hydraulique par casiers. Elle fait le lien entre les différentes phases de modélisation des phénomènes, l'observation d'une inondation et sa reconstruction *a posteriori*. Nécessitant une information altimétrique fine (métrique à décimétrique), cette méthode détermine des fourchettes de hauteur d'eau par casiers qui sont ensuite contraintes par des règles simples assurant la cohérence hydraulique de la modélisation de la lame d'eau observée. Testée sur la crue de 1994 de l'Hérault (France), elle aboutit à des hauteurs d'eau de qualité décimétrique.

3.4.2 L'observation de la Terre comme outil de gestion préventive

Les moyens d'observation de la Terre apparaissent souvent comme n'étant adéquats qu'avec les impératifs de la prévention. Ceci trouve son explication dans les temps de revisite généralement élevés des plate-formes orbitales d'acquisition d'images : de quelques jours à plusieurs dizaines de jours selon les systèmes et leur mode d'activation. Ils n'en demeurent pas moins très performants pour produire des couches d'information pertinentes en matière d'analyse du développement des territoires et d'élaboration de stratégies globales et durables d'aménagement.

3.4.2.1 Cartographie des territoires

C'est en tant qu'outil de cartographie que les techniques de télédétection se sont rapidement imposées comme les plus appropriées pour la réalisation de couvertures thématiques synchrones de vastes territoires. Les données de télédétection sont injectées à différents niveaux de prévention, pour cartographier tant l'évolution des territoires que leurs aptitudes à développer une vulnérabilité, et une protection, face à un risque donné. En préalable à toute opération de prévention, l'élaboration d'une description de l'occupation et de l'utilisation du sol est nécessaire (Yésou *et al.*, 1999). Celle-ci peut être réalisée à différentes échelles et différentes précisions sémantiques selon la typologie du territoire considéré (extension, occupation du sol

majoritaire, relief, densité des zones jugées vulnérables...), la nature du risque considéré (inondation de plaine ou torrentielle) et enfin, le type et la qualité des données disponibles (basse, haute, très haute résolution, taux de couverture nuageuse, saturation de capteurs).

En matière de description de l'occupation du sol à des fins hydrologiques, on rencontre assez peu souvent l'emploi des systèmes à basse résolution, tels que l'AVHRR des satellites NOAA. Les produits sont généralement peu précis tant du point de vue géométrique que thématique : Islam et Sado (2000) évoquent, sur le Bangladesh, la détection des zones de cultures, de forêts mais aussi et surtout, des classes mixtes d'habitat et de zones agricoles ou naturelles. La topographie, la densité urbaine de ce pays, les modes de vies et de peuplement des espaces justifient l'emploi de telles données. Le descriptif des classes montre la difficulté de l'opération, inhérente à la résolution kilométrique de l'instrument, qui a néanmoins l'avantage de couvrir des zones importantes tout en impliquant un faible volume de données (Sheng *et al.*, 2001) pour un coût d'acquisition quasi nul. Les précédentes sections ont montré que ces données sont souvent beaucoup plus appréciées en tant que données d'entrée ou de contrôle pour les modèles.

Adapté pour des études à l'échelle régionale, la résolution du système NOAA apparaît insuffisante dès que l'on s'intéresse aux échelles locales. Les systèmes d'observation de la Terre offrent alors des résolutions spatiales et spectrales bien plus adaptées (Baumgartner et Apfl, 1996). On s'intéresse alors aux systèmes optiques SPOT, Landsat, IRS, et radar ERS, ENVISAT, Radarsat, J-ERS dont les résolutions spatiales s'échelonnent de la centaine de mètres à quelques mètres. Enfin, les systèmes aéroportés, tels que l'E-SAR, SIR-C/X-SAR ou AIRSAR (systèmes polarimétriques, multi-fréquence) permettent de travailler à des échelles plus fines et d'accéder à des paramètres utilisables dans toutes les phases (Hajnsek *et al.*, 1998 ; Neusch, 2000).

3.4.2.2 Amélioration de la prévention

Les aspects préventifs de l'exploitation des données d'observation de la Terre pour la gestion du risque d'inondation s'articulent autour des Systèmes d'Information Géographique (SIG). En effet, la nécessité de combiner un grand nombre de sources de données pour une prise en compte, aussi complète que possible, des différents paramètres influant sur l'évolution d'un système naturel amène ces outils au premier plan (Vehviläinen et Lohvansuu, 1996 ; Sanders et Tabuchi, 2000). Des limitations sont cependant imposées par l'échelle de variation temporelle des paramètres retenus (Schultz, 1996).

Les résultats obtenus par Fohrer *et al.* (2001) sur des bassins allemands avec des données Landsat TM mettent clairement en évidence, grâce à un modèle de simulation bien validé ($SWAT_{mod}$), la relation entre les modifications de l'occupation du sol et la variation des volumes d'eau ruisselée. La diminution des surfaces forestières au profit d'une intensification de l'agriculture apparaît notamment comme une cause majeure de l'augmentation du ruissellement de surface, augmentant d'autant le risque d'inondation. Townsend et Foster (2002) arrivent à des constatations similaires sur la dynamique du fonctionnement d'un bassin, avant et après la construction d'un barrage. Bien évidemment, le plus important facteur d'augmentation de ruissellement reste l'imperméabilisation des sols par l'urbanisation. Pour contrer les effets néfastes des inondations, les autorités locales prennent le plus souvent des dispositions de sauvegarde (ouvrages de génie civil, mesures de protections...). Sauri-Pujol *et al.* (2001) démontrent les conséquences d'un effet dit d'escalator, trouvant principalement ses origines dans l'absence de procédure générale pour la gestion des territoires, l'action au coup par coup pour répondre aux nécessités créées par les nouvelles urbanisations et la vision partielle, à court terme des autorités publiques sur les questions d'aménagement. C'est dans une démarche assez similaire que s'inscrivent les résultats et recommandations de Yésou *et al.* (2000), qui démontrent l'intérêt des nouveaux systèmes à très haute résolution spatiale pour une description plus exhaustive du territoire. Ainsi, c'est

une meilleure efficacité des procédures réglementaires existantes qui est visée et ceci, de façon homogène sur l'ensemble d'un territoire.

S'intéressant à la fois à la réponse radar des sols, sa corrélation avec le modèle numérique de terrain et la carte de sols, Badji et Dautrebande (1997) présentent un indice exploitable autant en cartographie de crise qu'en étude préventive. En considérant les variations du coefficient de rétrodiffusion, cette étude met en évidence des zones préférentielles d'épandage des crues. Tous les résultats obtenus dans les études citées dans ce chapitre, qu'elles s'intéressent à la cartographie de crise ou à l'analyse a posteriori d'un événement, constituent des entrées utiles voire nécessaires aux démarches de prévention. Il apparaît très clairement que les trois grandes étapes de gestion du risque doivent former un cercle continu dans le temps.

3.5 Perspectives actuelles

L'évolution des risques, en particulier la très forte augmentation de la vulnérabilité (notamment par la colonisation des lits majeurs), amène les instances nationales et internationales à évaluer l'apport des techniques spatiales dans des procédures opérationnelles. Ces développements passent par la mise au point d'architectures de services, au travers de programmes cadres et de projets de recherche, et par la construction de systèmes d'observation de la Terre capables de répondre au mieux à la problématique posée.

3.5.1 Développement et architectures de services

À l'heure actuelle, la réalisation principale permettant d'exploiter des images d'observation de la Terre en cas d'événement grave est la Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures. Issu de la conférence UNISPACE III de Vienne en juillet 1999, cet accord entre plusieurs grandes agences spatiales (ESA et CNES au départ, puis NOAA, CSA, ISRO, CONAE)[1] permet d'activer tous les systèmes d'observation disponibles sur une zone donnée, dès que les autorités compétentes en font la demande. De multiples cas d'action de cette charte ont eu pour cadre les inondations (Henry *et al.*, 2002a et b ; Yésou *et al.*, 2003), mais sa sphère d'intervention s'étend bien au-delà des seuls événements hydrologiques (marées noires, tremblements de terre, éruptions volcaniques...). Tous les éléments relatifs aux différentes occurences d'activation de la Charte sont présentés sur son site internet (Charte@).

Les entreprises à l'échelle européenne pour améliorer l'utilisation des techniques spatiales ne se limitent évidemment pas à la Charte. Elles se regroupent sous forme de grands programmes et de projets, impliquant tour à tour les institutions européennes, les agences spatiales et les industriels. On retiendra notamment l'initiative GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) qui a pour objectif de développer des services de fourniture et de partage d'information pour la gestion des catastrophes naturelles.

Au cours des années 90, des programmes européens tels que les PCRD (*Programme Cadre de Recherche et de Développement*), TEN-Telecom (*Trans-European Telecommunication Network*) puis IST (*Information Society Technologies*), ou le RTE (*Réseau Terre et Espace*) français ont permis de financer et développer des projets en alliant scientifiques, industriels et utilisateurs. Ces projets ont pour objectif de mettre en place des démonstrateurs de service, utilisant principalement les techniques d'imagerie spatiale pour la génération d'informations cartographiques et les nouvelles technologies de l'information et de la communication pour les diffuser (serveur cartographique, liaisons Internet standard ou connexions sécurisées par satellite...). Plusieurs

[1] *European Space Agency, Centre National d'Études Spatiales, National Oceanic and Atmospheric Administration, Canadian Space Agency, Indian Space Research Organisation, Comisión Nacional de Actividades Espaciales*

types de risques ont été abordés au cours de ces démarches, mais la liste qui suit se limite à la problématique des inondations :

- **Eau et Feu**, financé par l'ESA, dont un volet est centré sur les crues torrentielles dans le Sud de la France et un second sur les crues de plaine du Nord-Est (Yésou *et al.*, 2000),
- **CLIFF** (*CLuster Initiative for Flood and Fire emergencies*), projet IST coordonné par l'ESA, consacré au développement et à l'amélioration des applications de gestion des risques d'incendie et d'inondations,
- **DeciDe** (*Earth Observation Technologies for DECIsion support DEmonstration*), financé par l'ESA et visant à développer un service d'aide à la décision basée sur la fourniture d'alerte d'inondation, à destination de la Sécurité Civile,
- **EMERG-SAT**, financé par l'ESA et consacré aux télécommunications pour une livraison en quasi-temps réel de produits dérivés de l'observation de la Terre,
- **OSIRIS** (*Operational Solutions for the management of Inundation Risks in the Information Society*), projet IST qui vise à développer de nouvelles méthodes d'accès à l'information pour la gestion du risque d'inondation via une infrastructure de communication,
- **ANFAS** (*Data Fusion for Flood Analysis and Decision Support*), projet sino-européen financé par la Communauté Européenne visant à développer des modèles de simulation et des méthodologies d'évaluation d'impact grâce aux données d'observation de la Terre,
- **GENESIS 2000** (*Geospatial Emergency management NEtwork for Support by Imagery Services*), financé par TEN-Telecom et la Commission Européenne (DG XIII), ciblé sur un accès aux données pour les différentes phases de gestion du risque (Henry, 2002),
- **NOAH** (*New Opportunities for Altimetry in Hydrology*), financé par le CEO (*Committee for Earth Observation*) dans le cadre du programme 'Environnement et climat' de l'Union Européenne, a pour objectif de promouvoir l'utilisation des données d'observation de la Terre pour la gestion des inondations,
- **EFFS** (*European Flood Forecasting System*), financé par le 5^{e}PCRD et qui a pour objectif de mettre au point un système de pré-alerte grâce à des prévisions sur 4 à 10 jours,
- **SIREN** (*Earth Observation Based Flood Risk Information Management Service*), financé par le 4^{e}PCRD, étudie les coûts et avantages d'un système d'information en cherchant à utiliser au mieux les résultats de la recherche pour répondre aux attentes des utilisateurs (Rabaute *et al.*, 2002),
- **FLOODGEN** (*Flood Risk Reduction by Space Borne Recognition of Excess Runoff Generating Areas*), financé par la Commission (DG XII), qui développe des produits cartographiques et des outils de simulation du ruissellement devant permettre une prise de décision en matière de réduction des conséquences économiques et environnementales de ce phénomène (King *et al.*, 2001).

A ces projets ciblés sur les inondations, on peut en ajouter d'autres plus généralistes, tels que le projet IST FORMIDABLE (*Friendly Operational Risk Management through Interoperable Decision aid Based on Local Levels*) ou le projet DISMAN (*Disaster Management Database*) de l'ESA, qui regroupe un grand nombre d'informations sur la gestion des risques dans différents pays de l'Union Européenne, des cas par type de risques...

Cette liste est finalement complétée par les projets PACTES (*Prévention et Anticipation des inondations au moyen de Techniques Spatiales*) financé dans le cadre du RTE, EOMD (*Earth Observation Development Market*) co-financé par l'ESA et TecSpIn (*Techniques Spatiales pour la gestion des Inondations*) financé par le CNES. Ces projets constituent les points d'entrée de cette étude et sont présentés dans les chapitres suivants, avec les zones sélectionnées.

3.5.2 Développement des systèmes d'observation de la Terre

Jackson *et al.* (1996) suggèrent l'emploi combiné de capteurs hyperfréquence actif et passif. C'est d'ailleurs un point récurrent dans une grande majorité d'études, souvent plutôt centrées sur la prévention ou le retour d'expérience, utilisant à la fois capteurs actifs et passifs. De ce fait, des acquisitions simultanées par différents types de capteur seraient susceptibles de faciliter les opérations de cartographies rapides en cas de crise. Les auteurs mettent cependant l'accent sur les problèmes de résolution liés à l'emploi des micro ondes passives, et sur les interactions de l'onde radar avec divers éléments du paysage qui peuvent affecter la mesure de l'humidité.

Concernant l'emploi de systèmes optiques, Yésou *et al.* (2001) montrent les apports de la très haute résolution sur une étude de cas de la plaine d'Alsace. Elle met notamment en évidence les apports en terme d'échelle : une résolution de 20 mètres (SPOT 1 à 4) est adaptée pour des études au 1/50 000e, alors que le système SPOT 5, avec une résolution spatiale pouvant atteindre 2,5 mètres permet de travailler du 1/5 000e au 1/2 500e. Ainsi, l'identification d'éléments du paysage ayant un rôle hydrologique important, tels que les haies ou les chemins agricoles et leurs fossés, devient réalisable. D'autre part, l'auteur met en avant les capacités du système pour la réalisation des documents réglementant l'urbanisation des zones soumises au risque d'inondation (PPR-I) et des documents prévoyant les plans d'intervention et de secours. Les apports de la Très Haute Résolution apparaissent comme très importants pour la phase de prévention, mais il ne semble pas qu'en matière de gestion de crise ils constituent aussi une avancée significative. En effet, le besoin récurrent des opérationnels, mis en évidence dans une majorité d'études, est une fréquence d'actualisation des informations spatiales beaucoup plus élevée qu'elle ne l'est à l'heure actuelle. Malgré tout, si cette fréquence temporelle peut être atteinte, le gain en résolution spatiale demeure un atout pour une évaluation plus fine des impacts. Les nouveaux systèmes optiques comme SPOT 5 ou Quickbird, et les futurs tels que Pléiades HR, vont sans doute constituer une avancée importante vers la satisfaction de ces exigences.

Les nouveaux et les futurs systèmes radar d'observation de la Terre veulent d'une part rejoindre les exigences des utilisateurs finaux envers ces impératifs de délai de mise à disposition de l'information, et d'autre part donner aux analystes des outils de cartographie performants. C'est un des nombreux aspects soulignés lors du Symposium ERS-ENVISAT "*Looking down to Earth for the New Millenium*" de Göteborg, en octobre 2000 (ESA, 2000), tant lors des deux sessions "*Hydrology*" que lors de la session "*Floods and storms*". Les bons résultats obtenus avec ERS dans de nombreuses études sont largement présentés afin de mieux envisager les possibilités offertes par ENVISAT, et notamment par son radar multi-modes et multi-polarisations, mais aussi toute la gamme des instruments embarqués à son bord. Les capacités d'ENVISAT pour la cartogaphie de crue ont déjà pu être évaluées lors des inondations de l'Elbe en aôut 2002 (Henry *et al.*, 2003). Ces atouts seront complétés par les futures générations de satellites radar tels que RADARSAT 2, ALOS, COSMO-SKYMED, augmentant du même coup les fréquences de revisite des sites.

3.6 Conclusions

De nombreuses méthodes d'acquisition d'information géographique sont disponibles pour l'étude des risques naturels, notamment celles de la télédétection aéroportée ou spatiale. Ces techniques et méthodes peuvent être employées à différents moments du processus de gestion des risques : en prévision et en anticipation ; en gestion de crise ; puis pour le retour d'expérience et la prévention. Ce chapitre est axé sur la problématique des inondations et de leur étude par l'utilisation des techniques spatiales.

Pour la phase de prévision et anticipation de l'événement, la modélisation est l'application majeure des données d'observation de la Terre. Il s'agit pour le moment essentiellement des modèles météorologiques et climatologiques, exploitant des images à basse résolution. Les produits qui en ressortent sont finalement de portée globale ou régionale. Concernant les données à haute résolution, exploitables à des échelles plus fines, on constate que peu de modèles hydrologiques sont en mesure d'utiliser les paramètres qui en sont extraits, hormis l'altimétrie. Cependant, les difficultés que posent ces paramètres en terme d'intégration et de prise en compte par les modèles doivent être également imputées à la complexité de leur obtention. De ce fait, on assiste à des développements parallèles avec d'un côté des modèles liant une grandeur physique à une mesure effectuée sur des images (l'humidité du sol avec le coefficient de rétrodiffusion radar par exemple), et de l'autre, des modèles liant des pluviométries à des débits ou des hauteurs d'eau. Le lien actuel entre ces deux "mondes" se limite donc souvent à des validations des résultats de l'un par ceux de l'autre, et vice-versa.

La gestion de crise est quant à elle moins exigeante sur la finesse des paramètres extraits. Le propos principal des données d'observation de la Terre dans cette phase est d'une part de fournir des cartographies objectives et synchrones sur de vastes territoires, et d'autre part d'en assurer leur mise à jour à un pas de temps aussi réduit que possible. La Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures a été le cadre de nombreuses applications des données spatiales au service de ces objectifs. Tous les types de données disponibles sont alors utilisés. Même en situation d'urgence, les données nécessitent des pré-traitements avant interprétation et intégration dans une représentation cartographique. Le point clef qui ressort de la majorité des cas est que la fréquence de réactualisation des informations prime largement sur la résolution spatiale. Quoi qu'il en soit, lorsque la résolution temporelle est atteinte, plus fine sera l'information cartographique produite, plus précise sera l'évaluation de la situation et l'efficacité des moyens déployés pourra être augmentée.

Enfin, en matière de prévention, l'étude des phénomènes historiques graves permet de prendre les mesures nécessaires à la réduction de leurs conséquences s'ils venaient à se reproduire. Disponibles depuis relativement peu de temps, par rapport aux échelles de temps d'usage en hydrologie ou en climatologie, les données d'observation de la Terre ne peuvent apporter une réponse satisfaisante à elles seules sur cet aspect. Les événements importants ne sont pas nécessairement bien couverts dans le temps et dans l'espace, voire même parfois pas du tout. La qualification de l'aléa est par conséquent difficile à cause du manque de finesse et de recul. Néanmoins, les capacités de cartographie de cet outil permettent de fournir une description poussée des territoires, pour ainsi aboutir à une approche de la vulnérabilité des sites et de leur évolution dans le temps. L'utilisation conjointe d'informations dérivées de l'observation de la Terre avec d'autres sources est un moyen efficace de proposer des nouveaux produits utilisables dans les processus décisionnels. D'autre part, les observations réalisées par les satellites pendant un événement peuvent servir de base de comparaison et de validation des résultats de modélisation, améliorant ainsi la qualité de l'outil.

Le renforcement des dispositions légales et réglementaires en matière de gestion des risques, l'effort continu des agences spatiales et des acteurs scientifiques, techniques, industriels devraient amener prochainement à un recours plus fréquent à l'observation de la Terre. Les nombreux projets de recherche, visant à développer la connaissance des phénomènes ou à mettre en place des architectures de service, témoignent de cette intention ferme de transférer les résultats scientifiques au monde opérationnel. Même si beaucoup d'efforts restent encore à fournir, les programmes comme les PCRD, TEN-Telecom ou RTE ont fait considérablement progresser la place des techniques spatiales dans les procédures, faisant évoluer de paire les mentalités. Enfin, les capacités accrues des nouveaux systèmes d'observation de la Terre contribuent à augmenter leur impact auprès des opérationnels comme du public.

3.7 Bibliographie

Alsdorf D.E., Smith L.C., Melack J.M., 2001, Amazon water level changes measured with interferometric SIR-C radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39 (2), 423-431.

Armstrong R.L., Brodzik M.J., 2001, Validation of passive microwave snow algortithms, *Remote Sensing and Hydrology 2000*, IAHS Pub. No. 267, 87-92.

Bach H., Lampart G., Strasser G., Mauser W., 1999, First results of an integrated flood forecast system based on remote sensing data, *Proceedings of IGARSS'99*, 864-866.

Badji M., Dautrebande S., Mokadem A.I., Dewez A., 1994, ERS-1 SAR imagery applied to rural basins hydrological studies. I : Flood inundation mapping and monitoring, *Proceedings of First ERS-1 Pilots Projects*, 117-124.

Baret F., Guyot G., 1990, Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR estimation, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 35 (2-3), 161-173.

Bates P.D., Anderson M.G., 1996, A preliminary investigation into the impact of initial conditions on flood inundation predictions using a time/space distributed sensitivity analysis, *Catena*, Vol. 26 (1-2), 115134.

Bates P.D., Horritt M.S., Smith C.N., Mason D., 1997, Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modeling, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (14), 1777-1795.

Bates P.D., De Roo A.P.J, 2000, A simple raster-based model for flood inundation simulation, *Journal of Hydrology*, Vol. 236, 54-77.

Bates P.D., Marks K.J., Horritt M.S., 2002, Optimal use of high-resolution topographic data in flood inundation models, *Hydrological Processes*, Vol. 17 (3), 537-557.

Baumgartner M.F., Seidel K., Haefner H., Itten K.I., Martinec J., 1986, Snow cover mapping for runoff simulations based on Landsat-MSS in an alpine basin, *Hydrologic Applications of Space Technology*, IAHS Pub. No. 160, 191-200.

Baumgartner M.F., Apfl G.M., 1996, Remote sensing and geographic information systems, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 41 (4), 593-607.

Beven K.J., Kirkby M.J., 1979, A physically-based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, 27-53.

Blasco F., Bellan M.F., Chaudhury M.U., 1992, Estimating the extent of floods in Bangladesh using SPOT data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 39 (3), 167-178.

Booij M.J., 2003, Determination and integration of appropriate spatial scales for river basin modelling, *Hydrological Processes*, Vol. 17 (13), 2581-2598.

Brakenridge G.R., Tracy G.R., Knox J.C., 1998, Orbital SAR remote sensing of a river flood wave, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19 (7), 1439-1445.

Brivio P.A., Colombo R., Maggi M., Tomasoni R., 2002, Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23 (3), 429-441.

Brun C., Bernard R., Vidal-Madjar D., Gascuel-Odoux C., Merot P.,1990, Mapping saturated areas with a helicopter-borne C-band scaterrometer, *Water Resources Research*, Vol. 26 (5), 945-955.

Brown R.J., Wood D., Brisco B., 1997, Mapping rainfall distribution using RADARSAT data, *Proceedings of GER'97, Geomatics in the Era of RADARSAT*, Ottawa, 25-30 May.

Carpenter T.M., Sperfslage J.A., Georgakakos K.P., Sweeney T., Fread D.L., 1999, National threshold runoff estimation utilizing GIS support of operational flash flood warning systems, *Journal of Hydrology*, Vol. 224, 21-44.

Charleux-Demargne J., 2001, *Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie - Application à la caractérisation du régime de crues des bassins versants*, Thèse de Doctorat de l'Université de Marne-La-Vallée, Spécialité Sciences de l'Information Géographique, 275 + annexes.

Ciach G.J., Krajewski W.F.,1999, On the estimation of radar rainfall error variance, *Advances in Water Resources*, Vol. 22 (6), 585-595.

Clandillon S., de Fraipont P., Yésou H., 1995, Assessment of the future SPOT 4 MIR for wetland monitoring and soil moisture analysis. A simulation case over the Grand Ried dAlsace (France), *Proceedings of European Symposium on Remote Sensing II*, Paris, France, 25-28 Sept.

Cobby D.M., Mason D.C., Davenport I.J., 2001, Image processing of airborne scanning laser altimetry data for improved river flood modelling, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 56 (2), 121-138.

De Roo A.P.J., Wesseling C.G., Van Deursen W.P.A., 2000, Physically based river basin modeling within a GIS : the LISFLOOD model, *Hydrological Processes*, Vol. 14, 1981-1992.

De Roo A.P.J., Price D.A., Schmuck G., 1999, Simulating the Meuse and Oder floods using the LISFLOOD model. In : Doel P., Fohrer N. (Ed.), *Modellierung des Wasser- und Stofftransport in großen Einzugsgebieten. Proceedings of the Giessen Meeting*, November, Kassel University Press, 41-50.

Droogers P., Kite G., 2002, Remotely sensed data used for modelling at different hydrological scales, *Hydrological Processes*, Vol. 16 (8), 1543-1556.

Dubayah R.O., Wood E.F., Engman E.T., Czajkowski K.P., Zion M., Rhoads J., 2000, Remote sensing in hydrological modeling, in : *Remote sensing in hydrology and water management*, Schultz G.A. and Engman E.T. Eds, Springer Verlag, Berlin, 85-102.

Dubois P.C., Van Zyl J., Engman T., 1995, Measuring soil moisture with imaging radars, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33 (4), 915-926.

Endreny T.A., Wood E.F., Lettenmaier D.P., 2000, Satellite-derived digital elevation model accuracy : hydrological modelling requirements, *Hydrological Processes*, Vol. 14 (2), 177-194.

Engman E.T., Angus G., Kustas W.P., 1989, Relationships between the hydrologic balance of small watershed and remotely sensed soil moisture, *Remote Sensing and Large-Scale Global Processes*, IAHS Pub. No. 186, 75-84.

Engman E.T., Chauhan N., 1995, Status of microwave soil moisture measurements with remote sensing, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 51 (1), 189-198.

Engman E.T., Gurney R.J., 1991, *Remote sensing in hydrology*, Chapman And Hall, London, 225.

ESA, 1993, *Proceedings of the second ERS-1 symposium : Space at the service of our environment*, Hamburg, 11-14 October, ESA SP-361.

ESA, 1994, *Proceedings of the first ERS-1 pilot project workshop*, Toledo, 22-24 June, ESA SP-365.

ESA, 1995, *First ERS thematic working group meeting on flood monitoring*, ESRIN, Frascati, 26-27 June.

ESA, 1996a, *New views of the Earth. Applications achievements of ERS-1*, ESA SP-1176.

ESA, 1996b, *Proceedings of the second ERS applications workshop*, London, 6-8 December, ESA SP-383.

ESA, 1997, *Proceedings of the third ERS symposium*, Florence, 21-26 March, ESA SP-414.

ESA, 2000, *Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium "Looking down to Earth for the New Millennium"*, Gothenburg, 16-20 October, SP-461.

Eva H., Lambin E.F., 1998, Remote Sensing of Biomass Burning in Tropical Regions : Sampling Issues and Multisensor Approach, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 64 (3), 292-315.

Faure D., 1993, *Application à l'hydrologie du radar météorologique : comparaison d'estimations radar et pluviométriques pour des lames d'eau horaires sur de petits bassins versants cévenols*, Thèse de doctorat, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 292.

Fellah K., Besnus Y., Clandillon S., Meyer C., de Fraipont P., 1994, Données multi-temporelles SAR ERS-1 pour une étude environnementale : recherche de la mesure d'un paramètre d'humidité des sols en Alsace, *Bulletin de la SFPT*, No. 136, 23-32.

Fellah K., Bally P., Besnus Y., Meyer C., Rast M., de Fraipont P., 1995, Impact of SAR radiometric resolution in hydrological and agro-environmental applications, *Actes du Symposium International, Extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres*, CNES, 337-346.

Fellah K., 1997, *Mesures des paramètres des sols à partir de données des satellites radar pour les applications hydrologiques*, Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, mention Doctorat Européen, No. 2755, 250.

Fellah K., 2000, A rapid mapping system for hurricane damage assessment, *Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium, Looking down to Earth for the New Millennium*, Gothenburg, 16-20 October, ESA SP-461.

Fisher B., Wolff D.B., Amitai E., 2001, Analytical software for validating time synchronous radar and raingauge data, *Remote Sensing and Hydrology 2000*, IAHS Pub. No. 267, 27-31.

Fohrer N., Haverkamp S., Eckhardt K., Frede H.G., 2001, Hydrologic Response to land use changes on the catchment scale, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B : Hydrology, Oceans and Atmosphere*, Vol. 26 (7-8), 577-582.

Francis P.W., 1989, Remote sensing of volcanoes, *Advances in Space Research*, Vol. 19 (1), 89-92.

Francks S.W., Gineste P., Beven K.J., Merot P., 1998, On constraining the predictions of a distributed model : the incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process, *Water Resources Research*, Vol. 34 (4), 787-797.

French J.R., 2003, Airborne LiDAR in support of geomorphological and hydraulic modelling, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 28 (3), 321-335.

Fung A.K., Li Z., Chen K.S., 1992, Backscattering from a randomly rough dielectric surface, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30, 356-369.

Fung T., Ledrew E., 1987, Application of Principal Components Analysis to change detection, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53 (12), 1649-1658.

Gebhardt M., Warner M., Bungey T., Currie A., Holden N., 1997, Airborne SAR interferometry applied to flood modelling, *Proceedings of IGARSS'97*.

Gens R., Van Genderen J.L., 1996, Review Article : SAR Interferometry - Issues, Techniques, Applications, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17(10), 1803-1835.

Georgakakos K.P., Tsintikidis D., Attia B., Roskar J., 2001, Estimation of pixel-scale daily rainfall over Nile River catchments using multispectral METEOSAT data, *Remote Sensing and Hydrology 2000*, IAHS Pub. No. 267, 11-15.

Geudtner D., Winter R., Vachon P.W., 1996, Flood monitoring using ERS-1 SAR interferometry coherence maps, *Proceedings of IGARSS'96*, 966-968.

Gigord P., 1994, Thèmes cartographie, Session Cartographie et Géologie, *Séminaire de Prospective en Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture, Rapport Final*, CNES.

Gineste P, 1998, *Contribution de l'imagerie satellitale radar ERS à la détection des zones saturées et à la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant agricole par TOPMODEL*, Thèse de doctorat de l'ENGREF, Spécialité : Sciences de l'Eau, Montpellier.

Gineste P., Puech C., Merot P., 1998, Radar remote sensing of the source areas from the Coët-Dan catchment, *Hydrological Processes*, Vol. 12, 267-284.

Gong P., 1993, Change detection using principal component analysis and fuzzy set theory, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, 22-29.

Guyot G., 1989, *Signatures spectrales des surfaces naturelles*, Paradigme, Caen.

Hagg W., Sties M., 1998, Monitoring the Oder flood with ERS, Radarsat and optical data, *Proceedings of IGARSS'98*, 1614-1616.

Hajnsek I., Ergenzinger P., Schmullius C., 1998, Flood plain mapping of the River Elbe with multi-frequency and multi-polarisation airborne-radar data (DLR E-SAR), *Proceedings of IGARSS'98*, 998-1000.

Henry J.-B., Chastanet P., Fellah K., Desnos Y.L., 2003, ENVISAT Multi-Polarised ASAR data for flood mapping, *Proceedings of IGARSS'03*.

Henry J.-B., 2002, Techniques spatiales et systèmes d'information pour la gestion des inondations, Prix d'Honneur au Concours Jeunes Diplômés de l'Association Française de Topographie 2001, *XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie*, No. 93, 42-50.

Henry J.-B., Fellah K., Clandillon S., Allenbach B., de Fraipont P., 2002a, Earth observation and case-based systems for flood risk management, *Proceedings of IGARSS'02*.

Henry J.-B., Tholey N., P. de Fraipont, 2002b, Multi-sensor flood crisis management and case-based database on River Moselle (France), *Proceedings of the 1st International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, Torrent-Valencia, 426-430.

Henry J.-B., Malet J.-P, Maquaire O., Grussenmeyer P., 2002c, The use of small format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 27 (12), pp. 1339-1350.

Hess L.L., Melack J.M., Simonett D.S., 1990, Radar detection of flooding beneath the forest canopy : a review, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 11 (7), 1313-1325.

Hess L.L., Melack J.M., Filoso S., Wang Y., 1995, Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33 (4), 895-903.

Horn R., Papathanassiou K.P., Reigber A., Scheiber R., Hauskneckt P., Strobl P., Boehl R., Scheele M., Reulke R. Baerwald W., Puglisi G., Coltelli M., Fornaro G., 1997, The Mount Etna case study : a multisensor view, *Proceedings of IGARSS'97*.

Horritt M.S., 1999, A statistical active contour model for SAR image segmentation, *Image Vision and Computing*, Vol. 17, 213-224.

Horritt M. S., Bates P. D., 2002, Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation, *Journal of Hydrology*, Vol. 268 (1-4), 87-99.

Horritt M.S., Mason D.C., Luckman A.J., 2001, Flood boundary delineation from synthetic aperture radar imagery using a statistical active contour model, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (13), 2489-2507.

Horritt M.S., Mason D.C., Cobby D.M., Davenport I.J., Bates P.D., 2003, Waterline mapping in flooded vegetation from airborne SAR imagery, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85 (3), 271-281.

Igbowke J.I., 1999, Geometrical processing of multi-sensoral multi-temporal satellite images for change detection studies, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20 (6), 1141-1148.

Imhoff M.L., Vermillion C., Story M.H., Polcyn F., 1987, Monsoon flood boundary delineation and damage assessment using space borne imaging radar and Landsat data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53 (4), 405-413.

Islam M. M., Sado K., 2000, Flood hazard assessment in Bangladesh using NOAA AVHRR data with geographical information system, *Hydrological Processes*, Vol. 14 (3), 605-620.

Jackson R.D., 1983, Spectral indices in n-space, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 13, 409-421.

Jackson T.J., Schmugge J., Engman E.T., 1996, Remote sensing applications to hydrology : soil moisture, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 41 (4), 517-530.

Jaiswal R.K., Mukherjeeb S., Rajuc K.D., Saxenad R., 2002, Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 4 (1), 1-10.

Johnson A.I. (Ed.), 1986, *Hydrologic applications of space technology*, IAHS Pub. No. 160, IAHS Press, Wallingford.

Kenward T., Lettenmaier D.P., Wood E.F., Fieldin E., 2000, Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 74, 432-444.

Kim C., 1999, Flood damage mapping in North Korea using JERS-1 data, *Proceedings of IGARSS'00*, 870-872.

King C., Le Bissonais Y., Bonn F., Caloz R., Hill S.J., Rasio R., Bourget M., Clément P., 2001, Floodgen : flood risk reduction by spaceborne recognition of indicators of excess runoff generating areas, *Proceedings of EARSeL - Observing our environment from space. New solutions for a new millenium*, Paris, France.

Kontoes C., Sykioti O., Elias P., Briole P., Remy D., Sachpazi M., Veis G., Kotsis I., 2000, Two examples of using ERS-2 SAR interferometry in Greece. Study of the September 7, 1999 Athens earthquake and the Nisyros volcano activity, *Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium, Looking down to Earth for the New Millennium*, Gothenburg, 16-20 October, SP-461.

Laugier O., Fellah K., Tholey N., Meyer C., de Fraipont P., 1997, High Temporal Detection and Monitoring of Flood Zone Dynamic using ERS Data around Catastrophic Natural Events : the 1993 and 1994 Camargue Flood Events, *Proceedings of the third ERS Symposium*, ESA SP-414, Vol. 1, 559-564.

Liu Z., Huang F., Li L., Wan E., 2002, Dynamic monitoring and damage evaluation of flood in north-west Jilin with remote sensing, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 23 (18), 3669-3679.

Maître H., 2001, *Traitement des images de RSO*, Hermès, Paris, 351.

Mantovani F., Soeters R., Van Westen C.J., 1996, Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe, *Geomorphology*, Vol. 15 (3-4), 213-225.

Marinelli L., Michel R., Beaudoin A.,1997, Flood mapping using ERS tandem coherence image : a case study in southern France, *Proceedings of the third ERS Symposium*, ESA SP-414, Vol. 1, 531-536.

Massonnet D., 1995, Application of remote sensing data in earthquake monitoring, *Advances in Space Research*, Vol. 15 (11), 37-44.

Mattikalli N.M., Engman E.T., Ahuja L.R., Jackson T.J., 1996, A GIS for spatial and temporal monitoring of microwave remotely sensed soil moisture and estimation of soil properties, *Proceedings of the Vienna Conference HYDROGIS 96*, IAHS Pub. No. 235, 621-628.

Mauser W., Rombach M., Bach H., Demircan A., Kellndorfer J., 1994, The use of ERS-1 data for spatial surface-moisture determination, *First ERS-1 Pilot Project Workshop*, Toledo, ESA SP-365, 61-73.

Mauser W., Bach H., Demircan A., Eibl B., Riegler G., Schneider K., 1997, The contribution of microwave data to distributed hydrologic modeling, *Proceedings of the third ERS Symposium*, ESA SP-414, Vol. 1, 77-84.

Mauser W., Stolz R., Schneider K., Bach H., 2000, Comparison of ERS SAR data derived soil moisture distributions with SVAT-model results, *Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium Looking at our Earth for the New Millennium*, Gothenburg, 16-20 October, ESA SP-461.

Meade N.G., Hinzman L.D., Kane D.L., 1999, Spatial estimation of soil moisture using synthetic aperture radar in Alaska, *Advances in Space Research*, Vol. 24 (7), 935-940.

Moses J.F., Barrett E.C., 1986, Interactive procedures for estimating precipitation from satellite imagery, *Hydrologic Applications of Space Technology*, IAHS Pub. No. 160, 25-39.

Neusch T., Sties M., 1999, Application of the Dubois model using experimental synthetic aperture radar data for the determination of soil moisture and surface roughness, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 54, 273-278.

Neusch T., 2000, *Multi-Frequency and Multi-Polarization Synthetic Aperture Radar Data for Modelling Hydrological Parameters*, Aachen : Shaker (Geodäsie , Bd. 5), Zugl. : Karlsruhe, Univ., Diss.

Nico G., Pappalepore M., Pasquariello G., Refice A., Samarelli S., 2000, Comparison of SAR amplitude vs. coherence flood detection methods - a GIS application, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 21 (8), 1619-1631.

Oberstadler R., Hönsch H., Huth D.,1997, Assessment of the mapping capabilities of ERS-1 SAR data for flood mapping : a case study in Germany, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), 1415-1425.

Oevelen P.J. (Van), Hoekman D.H., 1999, Radar backscatter inversion techniques for estimation of surface soil moisture, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37 (1), 113-123.

Oh Y., Sarabandi K., Ulaby F.T., 1992, An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soils surfaces, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 30 (2), 370-381.

Owe M., Brubaker K., Ritchie J., Rango A. (Eds.), 2001, *Remote sensing and hydrology 2000*, IAHS Pub. No. 267, IAHS Press, Wallingford.

Paloscia S., Pampaloni P., Macelloni G., Sigismondi S., 1999, Microwave remote sensing of hydrological parameters on the NOPEX area, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 98-99, 375-387.

Pareschi M.T., Cavarra L., Favalli M., Giannini F., Meriggi A., 2000, GIS and volcanic risk management, *Natural Hazards*, Vol. 21 (2-3), 361-379.

Patterson S., Pultz T.J., Saper R., Crevier Y., 1996, Operational flood monitoring : a reality with RADARSAT ?, *Earth Observation Magazine*, September, 18-20.

Pauwels V.R.N., Hoeben R., Niko E. C., Verhoest N.E.C., De Troch F.P., 2001, The importance of the spatial patterns of remotely sensed soil moisture in the improvement of discharge predictions for small-scale basins through data assimilation, *Journal of Hydrology*, Vol. 251 (1-2), 88-102.

Pauwels V.R.N., Hoeben R., Verhoest N.E.C, de Troch F.P., Troch P.A., 2002, Improvement of TOPLATS-based discharge predictions through assimilation of ERS-based remotely sensed soil moisture values, *Hydrological Processes*, Vol. 16 (5), 995-1013.

Petty G.W., 1995, The status of satellite-based rainfall estimation over land, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 51, 125-137.

Portman F. et Mendel H.G., 1997, Soil moisture estimation in hydrological mesoscale modelling using ERS SAR data, *Third ERS Symposium on Space at the Service of our Environment*, Florence, ESA SP-414, Vol. I, pp. 85-92.

Prinet V., Zhou Z., Ma S., Monga O., Perlant F., 1998, A framework for flood assessment using satellite images, *Proceedings of IGARSS'98*, 822-824.

Profeti G., Macintosh H., 1997, Flood management through LANDSAT TM and ERS SAR data : a case study, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), 1397-1408.

Puech C., Raclot D., 2002, Using geographical information systems and aerial photographs to determine water levels during floods, *Hydrological Processes*, Vol. 16 (8), 1593-1602.

Qobilov T., Pertziger F., Vasilina L., Baumgartner M.F., 2001, Operationnal technology for snow-cover mapping in the Central Asian mountains using NOAA-AVHRR data, *Remote Sensing and Hydrology 2000*, IAHS Pub. No. 267, 76-80.

Quesney A., François C., Ottle C., Le Hégarat S., Loumagne C., Normand M., 2001, Sequential assimilation of SAR/ERS data in a surface hydric model coupled to a lumped rainfall-runoff model with an extended Kalman filter, *Proceedings of the 8th International Symposium Physical Measurements and signatures in Remote Sensing, ISPRS et CNES*, 689-692.

Rabaute T., Gonzales G., Dupouyet J.P., Vidal J.J., Colin Y., Denave B., 2002, Space technologies for flood risk management : from images to products and services, *Proceedings of EARSeL*, Prague, République Tchèque.

Rango A. (Ed.), 1989, *Remote sensing and large-scale global processes*, IAHS Pub. No. 186, IAHS Press, Wallingford.

Rao Y., Rao K., 1997, ERS-1 and JERS-1 SAR data analysis for soil moisture, *Proceedings of the third ERS Symposium*, ESA SP-414, Vol. 1, 429-434.

Remond A., Beaudoin A., King C., 1999, SAR imagery to estimate roughness parameters when modeling runoff risk, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20 (13), 2613-2625.

Rignot E.J.M., Van Zyl J.J., 1993, Change detection techniques for ERS-1 SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31 (4), 896-906.

Rombach M., Mauser W., 1997, Multi-annual analysis of ERS surface soil moisture measurements of different land uses, *Proceedings of the third ERS Symposium*, ESA SP-414, Vol. 1, 27-34.

Rosenqvist A., Birkett C.M., Bartholomé E., De Grandi G., 1999, Using satellite altimetry and historical gauge data for validation of the hydrological signifiance of the JERS-1 SAR mosaics in Central Africa, *Proceedings of IGARSS'99*, 2754-2758.

Rott H., 1986, Prospects of microwave remote sensing for snow hydrology, *Hydrologic Applications of Space Technology*, IAHS Pub. No. 160, 215-224.

Sanders R., Tabuchi S., 2000, Decision support system for flood risk analysis for the River Thames, United Kingdom, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66 (10), 1185-1193.

Saurí-Pujol D., Roset-Pagès D., Ribas-Palom A., Pujol-Caussa P., 2001, The 'escalator effect' in flood policy : the case of the Costa Brava, Catalonia, Spain, *Applied Geography*, Vol. 21, 127-143.

Sauvageot H., 1982, *Radarmétéorologie, Télédétection active de l'atmosphère*, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications, Eyrolles.

Schmullius C., Evans D., 1997, Synthetic Aperture Radar frequency and polarization requirements for applications in ecology, geology, hydrology and oceanography – A tabular status quo after SIR-C/X-SAR, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18 (13), 2713-2722.

Schultz G.A., 1996, Remote sensing and GIS techniques from the perspective of hydrological systems and process dynamics, *Proceedings of the Vienna Conference HYDROGIS 96*, IAHS Pub. No. 235, 637-647.

Schultz G.A., Engman E.T., 2000, *Remote sensing in hydrology and water management*, Springer Verlag, Berlin, 483.

Schumann A.H., Schultz G.A., 2000, Detection of land cover change tendencies and their effect on water management, in : *Remote sensing in hydrology and water management*, Schultz G.A. and Engman E.T. Eds, Springer Verlag, Berlin, 419-442.

Sharma P.K., Chopra R., Verma V.K., Thomas A., 1996, Flood management using remote sensing technology : the Punjab (India) experience, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 17 (17), 3511-3521.

Sheng Y., Gong P., Xiao Q., 2001, Quantitative dynamic flood monitoring with NOAA AVHRR, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (9), 1709-1724.

Shi J., Wang J., Hsu A., O'Neill P., Engman E.T., 1997, Estimation of bare soil moisture and surface roughness parameters using L-band SAR image data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 35 (5), 1254-1266.

Singh A., 1989, Digital change detection techniques using remostely sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10 (6), 989-1003.

Singhroy V., Mattar K., Gray A.L., 1998, Landslide characterizaton in Canada using interferometric SAR and combined SAR and TM images, *Advances in Space Research*, Vol. 21 (3), 465-476.

Sivaprasad K., Bolus R.L., 1994, Delineation of 1993 midwest flooding using ERS-1 SAR, SPOT and Landsat imagery, *Proceedings of IGARSS'94*, 1439-1441.

Smith L.C., 1997, Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge : a review, *Hydrological Processes*, Vol. 11 (10), 1427-1439.

Smith L.C., Alsdorf D.E., 1997, Flood mapping from phase decorrelation of tandem ERS data : Ob river, Siberia, *Proceedings of the third ERS Symposium*, ESA SP-414, Vol. 1, 537-539.

Teti J.G., Ilsemann F.J., Verdi J.S., Boerner W.M., Krasznay S.K., 1994, Application of the polarimetric matched image filter to the assessment of SAR data from the Mississippi flood region, *Proceedings of IGARSS'94*, 1368-1370.

Tholey N., Clandillon S., De Fraipont P., 1996, The contribution of spaceborne SAR and optical data in monitoring flood events : examples in northern and southern France, *Hydrological Processes*, Vol. 11, 1409-1413.

Toutin T., 2001, Review article : elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (6), 1097-1125.

Toutin T., Gray L., 2000, State of the art of elevation extraction from satellite SAR data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 55 (1), 13-33.

Townsend P.A., Foster J.R., 2002, A synthetic aperture radar-based model to assess historical changes in lowland floodplain hydroperiod, *Water Resources Research*, Vol. 38 (7), 20-1/20-10.

Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K., 1982, *Microwave remote sensing, Active and passive, Vol. II : Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*, Artec House, Dedham, MA.

Ulaby F.T., Brisco B., Dobson C., 1983, Improved spatial mapping of rainfall events with spaceborne SAR imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-21 (1), 118-121.

Ulaby F.T., Held D., Dobson M.C., Mc Donald K.C., Senior T.B.A., 1987, Relating polarization phase difference of SAR signals to scene properties, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 25 (1), 83-92.

Vachon P.W., Katsaros K., Black P., Dodge P., 1999, RADARSAT synthetic aperture radar measurements of some 1998 hurricanes, *Proceedings of IGARSS'99.*

Vauclin M., 1983, L'humidité des sols en hydrologie : intérêt et limites de la télédétection, *Hydrological Applications of Remote Sensing and Remote Data Transmission*, IAHS Pub. No. 145, 511-527.

Verstraete M.M., Pinty B., 1997, On the role of models in the interpretation of existing and future earth observation satellite data. In : *Mesures physiques et signatures en télédétection, ISPRS Seventh International Symposium*, Courchevel, France, 7-11 avril, 35-36.

Vehviläinen B., Lohvansuu J., 1996, Watershed simulation and forecasting system with a GIS-oriented user interface, *Proceedings of the Vienna Conference HYDROGIS 96*, IAHS Pub. No. 235, 493-500.

Wang J., O'Neill P., Engman E.T., Pardipuram R., Shi J., Hsu A., 1995, Estimating surface soil moisture from SIR-C measurements over the Little Washita watershed, *Proceedings of IGARSS'95.*

Wang Y., Davis F.W., 1997, Decomposition of polarimetric synthetic aperture radar backscatter from upland and flooded forests, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18 (6), 1319-1332.

Weydahl D.J., 1996, Flood monitoring in Norway using ERS-1 SAR images, *Proceedings of IGARSS'96*, 151-153.

Wickel A.J., Jackson T.J., Wood E.F.,2001, Multitemporal monitoring of soil moisture with RADARSAT SAR during the 1997 Southern Great Plains hydrology experiment, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (8), 1571-1583.

Wiesmann A., Demargne L., Honikel M., Yésou H., Wegmüller U., 2000, Forest storm damage assessment with ERS tandem data, *Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium Looking at our Earth for the New Millennium*, Gothenburg, 16-20 October, ESA SP-461.

Wiesnet D.R., Deutsch M., 1987, Flood monitoring in South America from the Landsat NOAA and Nimbus satellites, *Advances in Space Research*, Vol. 7 (3), 77-84.

Wooding M.G., Griffiths G.H., Evans R., 1993, Temporal monitoring of soil moisture using ERS-1 SAR data, *Proceedings of the First ERS-1 Symposium - Space at the Service of our Environment*, Cannes, ESA SP-359, 641-648.

Yamagata Y., Akiyama T., 1988, Flood damage analysis using multitemporal Landsat Thematic Mapper data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 9 (3), 503-514.

Yésou H., Chastanet P., 2000, Contribution des données d'observation de la Terre à la gestion des crues lentes, Rapport Final WP3, Programme Eau et Feu, ESA, 35.

Yésou H., Chastanet P., Fellah K., Jeanblanc Y., de Fraipont P., Béquignon J., 2000, Contribution of ERS SAR images and ERS coherence data to a flood system on the Meuse basin – France, *Proceedings of ERS-ENVISAT Symposium "Looking at our Earth for the New Millennium"*, Gothenburg, 16-20 October, ESA SP-461.

Yésou H., Meyer C., Clandillon S., de Fraipont P., 2001, Apport des données simulées SPOT 5 pour la gestion du risque inondation, Actes du Colloque " SPOT5 vers de nouvelles applications ", Toulouse, 27-28 novembre, CNES Ed.

Yésou H., Clandillon S., Allenbach B., Bestault C., de Fraipont P., 2003, Exploitation de données SPOT 5, SPOT 4 et SPOT 2 pour la cartographie des zones affectées par les inondations de type Cévenol les 9-10 Septembre 2002 dans le département du Gard, *Actes de la* 3ème *Conférence SIRNAT*, Orléans, 29-30 Janvier, 6.

Zhou C., Luo J., 2000, Flood monitoring using multi-temporal AVHRR and RADARSAT imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66 (5), 633-638.

Zribi M., Dechambre M., 2003, A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from C-band radar data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 84 (1), 42-52.

Références Internet

(Aerosensing@), Aerosensing Intermap Technologies
http ://www.intermaptechnologies.com

(Charte@), Charte Internationale Espace et Catastrophes Majeures,
http ://www.disasterscharter.org

(DISMAN@), ESA Disaster Management Database,
http ://earth.esa.int/applications/dm/disman/db/

Deuxième partie

Intégration et exploitation des données d'observation de la Terre pour la gestion des inondations

Introduction

La phase de prévision et d'anticipation constitue la clef de vôute du processus de gestion du risque d'inondation de plaine, parcequ'elle se situe en amont et qu'elle demande une analyse approfondie des variables et du fonctionnement du bassin versant. Les outils de modélisation sont capables de simuler des débits, des hauteurs d'eau et des extensions d'inondation à partir de mesures ponctuelles. Ils permettent ainsi d'anticiper l'évolution et les conséquences d'un événement en cours. L'apport d'une information spatialisée, cartographique par nature, est par conséquent crucial pour en compléter et améliorer la définition. Cette problématique cartographique touche à la fois la description et la réalisation de l'aléa (l'inondation) et les enjeux concernés (les biens et les personnes). D'une part l'imagerie satellitaire intervient pour fournir une information spatialisée et instantanée sur l'extension de la zone inondée. D'autre part, elle permet de décrire à un instant donné les enjeux et leur vulnérabilité face à un aléa connu ou simulé. Ainsi, les développements de la prévision ont des implications fortes dans les deux autres phases de gestion du risque, et leur organisation cyclique génère des interactions qui contribuent à leurs efficacités mutuelles.

Sur le bassin de la Moselle, le programme PACTES[2] (Prévention et Anticipation des Crues au moyen des TEchniques Spatiales) a initié un transfert technologique vers des utilisateurs. Les larges bases de données construites sur la zone ont contribué à l'amélioration des moyens existants pour la gestion du risque d'inondation, notamment pour la prévention. La durée limitée du projet et la disponibilité des données n'ont pas permis de couvrir l'ensemble du spectre de la gestion du risque hydrologique. Le projet TecSpIn[3] (Techniques Spatiales pour les Inondations) s'inscrit dans la continuité de PACTES. Collaboration avec le CRP-GL (Centre de Recherche Public–Gabriel Lippmann à Luxembourg), il vise à une meilleure intégration des paramètres dérivés de l'observation de la Terre aux outils de la modélisation hydrologique et hydraulique classique. La cartographie des champs d'inondation est une donnée géographique fondamentale et commune à ces deux volets de l'analyse du risque hydrologique. Le projet *Plain Flood Monitoring* du programme EOMD[4] (*Earth Observation Market Development*) s'intéresse à la production rapide de cette information, sa mise en forme et sa valorisation. Une de ses préoccupations majeures est l'exploitation du système radar embarqué sur le satellite ENVISAT. Ces projets (présentés plus en détail en annexe B) fournissent des cadres généraux aux travaux présentés dans les trois chapitres de cette seconde partie.

Cette seconde partie s'attache à présenter les résultats des travaux réalisés sur différents sites d'étude, avec les données de différents capteurs, sur la problématique centrale des crues lentes et des inondations de plaine. Elle s'organise comme précédemment autour des trois grandes phases de la gestion du risque : prévision et anticipation ; gestion de la crise ; retour d'expérience et prévention. L'apport des techniques spatiales d'acquisition et d'analyse de l'information est abordé dans le quatrième chapitre sous l'angle de l'extraction de paramètres spatialisés, ai-

[2]financé par le Réseau Terre et Espace du Ministère de la Recherche et coordonné par le Centre National d'Etudes Spatiales

[3]financé par le Centre National d'Etudes Spatiales

[4]soutenu par l'Agence Spatiale Européenne

dant à la modélisation hydraulique et hydrologique. L'analyse de l'interaction entre le signal radar et les surfaces naturelles permet de dégager des relations claires avec les variables hydro-climatologiques, telles que la pluviométrie ou les niveaux de nappes. De plus, l'étude de séries temporelles historiques d'images radar permet d'accéder à une classification des comportements de la plaine alluviale, soumise aux débordements et aux résurgences de nappes. Enfin, la comparaison des champs d'inondation extraits de l'imagerie spatiale avec les champs modélisés autorise une validation et une calibration entre les deux outils, visant à obtenir une plus grande efficacité et fiabilité. Les éléments mis en évidence dans cette partie de l'étude viennent directement alimenter les discussions sur les méthodes d'analyse employées pendant et après l'inondation.

La production d'information cartographique sur l'extension du champ d'inondation pendant le déroulement de l'événement fait l'objet du cinquième chapitre. Il consiste en une étude technologique visant à tester les capacités du radar du satellite ENVISAT sur ce type d'application. A partir d'un jeu de données très fourni, les modes mono- et multi-polarisation sont étudiés. Une évaluation de la résolution radiométrique des produits d'imagerie est proposée ; elle vérifie d'une part leur qualité et d'autre part, le respect des spécifications du système. L'apport de la polarisation pour la cartographie du champ d'inondation et la description du paysage est analysé ainsi que l'impact de la résolution spatiale. Une première évaluation de l'adéquation des modes de fonctionement de cet instrument est proposée vis-à-vis de la problématique de la cartographie des inondations.

L'analyse d'événements *a posteriori* permet de valider les outils de modélisation lorsqu'ils existent, mais aussi de s'intéresser à leurs impacts sur le paysage. Le sixième et dernier chapitre est centré sur la description des enjeux et de leur évolution. L'utilisation de données militaires déclassifiées du système CORONA et de données plus classiques des systèmes d'observation de la Terre a permis la création d'un plan d'information sur la dynamique des zones urbanisées sur une période de quarante ans. Une base de données sur les champs d'inondation historiques est construite à partir de cartographies dérivées de l'imagerie radar ou provenant des services gestionnaires. Le croisement géographique de ces deux informations permet alors d'évaluer l'évolution de la vulnérabilité des zones urbaines face à un aléa défini, notamment par le développement d'une représentation graphique adaptée. Enfin, une approche innovante de l'évaluation des enjeux est proposée en exploitant conjointement les données du recensement de population et les produits de classification d'occupation du sol. La méthode consiste à affecter un nombre d'habitants par zone d'habitat ou par pixel, sur la seule base de la population communale et de la cartographie des zones habitables.

Chapitre 4

Extraction de paramètres spatialisés pour la modélisation

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer des méthodes destinées à alimenter les modèles hydrologiques et hydrauliques avec des paramètres spatialisés issus de l'imagerie radar d'observation de la Terre. Les acquis sur l'influence de la teneur en eau sur la rétrodiffusion du signal radar par les sols sont largement mis à profit. Cette partie de l'étude vise d'abord à construire des relations entre les variables hydro-climatologiques, mesurées ponctuellement, et la mesure radar. Puis, l'analyse de séries temporelles d'images permet d'identifier des comportements hydrauliques particuliers dans la plaine alluviale, confirmés par les mesures de terrain. Enfin, les capacités de cartographie sont exploitées pour obtenir des extensions instantanées des inondations servant au paramétrage des modèles de simulation hydraulique. L'ensemble de la démarche s'inscrit dans un processus d'approfondissement de la connaissance du fonctionnement d'un bassin versant.

4.1 Problématique et objectifs

En amont de la chaîne de gestion du risque, la phase de prévision et d'anticipation développe, valide et exploite des outils de modélisation pour simuler les réactions d'un système hydrologique. La qualité des informations que ces modèles peuvent fournir dépend essentiellement de la qualité des données d'entrée et de la finesse de représentation des interactions entre les variables. L'extraction de paramètres utiles à la modélisation hydrologique et hydraulique constitue un des enjeux majeurs de l'utilisation des données satellitaires. L'élaboration de stratégies de couplage et d'exploitation conjointe de données hydro-météorologiques classiques et de données d'imagerie spatiale peut d'une part apporter une amélioration des outils de modélisation et d'autre part, proposer des solutions utilisables sur des bassins non équipés de réseaux de mesure.

L'observation en temps réel de multiples variables hydro-météorologiques est une condition indispensable à une meilleure compréhension de la genèse des crues et inondations, tout comme elle permet la calibration des modèles hydrologiques de prévision des crues. Tout site d'observation étant par définition à caractère ponctuel, son choix doit répondre à des critères de représentativité par rapport au fonctionnement général de l'hydrosystème. Pour certaines variables hydro-météorologiques, des méthodes d'interpolation plus ou moins sophistiquées aboutissent à une information spatialisée, indispensable dans la plupart des outils de prévision et de gestion des crues et inondations (SIG, modèles hydrologiques et hydrauliques).

Les systèmes de télédétection spatiale permettent l'observation simultanée de multiples variables biophysiques, sur de larges étendues et à intervalles de temps réguliers. Même si les systèmes d'observation de la Terre opérationnels sont encore insuffisants pour répondre à l'ensemble des

besoins de la gestion des inondations, il est nécessaire d'approfondir la valorisation de l'existant et de débuter l'intégration et l'exploitation des nouveaux systèmes d'observation de la Terre, notamment ENVISAT lancé en 2002, pour améliorer la contribution des techniques spatiales à la gestion des inondations. Les techniques d'imagerie radar présentent beaucoup d'intérêts, notamment l'influence de l'humidité superficielle sur la constante diélectrique des sols.

Du point de vue de la modélisation hydraulique et hydrologique, la question essentielle qui demande à être investiguée est celle des paramètres spatialisés qui peuvent être obtenus de l'imagerie spatiale radar et comment ils peuvent apporter une nouvelle dimension aux mesures ponctuelles, renseigner sur le fonctionnement des zones inondables et être exploités par les outils de modélisation.

S'intégrant au projet TecSpIn (Techniques Spatiales pour les Inondations, décrit en annexe B.2), cette partie de l'étude explore trois axes de recherche principaux pour apporter des éléments de réponse au problème formulé précédemment, en se fondant sur les acquis du chapitre 3 (cf. §3.2 en particulier) :
- évaluation du degré de saturation du bassin par la mesure radar, par la construction de relations empiriques avec la pluviométrie (*e.g.* Fellah *et al.*, 1994) et les niveaux piézométriques,
- exploitation des caractéristiques de la réponse radar de l'eau, des sols humides ou proches de la saturation pour identifier des zones à comportements hydrauliques homogènes (*e.g.* Franks *et al.*, 1998 ; Gineste *et al.*, 1998) pour segmenter la plaine alluviale,
- enfin, inter-calibration des deux méthodes de détermination de l'extension du champ d'inondation : l'imagerie radar et la modélisation hydraulique (cf. §3.2.2).

L'étude de ces axes est réalisée sur un bassin fortement équipé, où une large base de données est constituée. Elle intègre un vaste arrière plan scientifique de collecte et d'analyse d'informations, de compréhension et de modélisation du fonctionnement du bassin. L'intégration de la donnée d'observation de la Terre a pour objectif d'évaluer sur une zone favorable les possibilités de conception d'une solution "tout spatial" pour l'hydrologie.

4.2 Constitution de la base de données

La base de données constituée sur le bassin de l'Alzette combine données d'observation de la Terre radar, mesures et simulations de grandeurs hydrologiques et hydrauliques, et couches cartographiques élaborées. Ce jeu de données varié décrit de plusieurs points de vue les phénomènes qui se manifestent dans le bassin versant (fig. 4.1).

4.2.1 Le bassin de l'Alzette

Formant un sous-bassin de la Moselle, le bassin de l'Alzette est régulièrement sujet aux inondations, provoquées par résurgence de nappes et/ou par débordement. Certaines parties de ce bassin sont fortement urbanisées et industrialisées, comme la ville de Luxembourg ou l'amont du bassin à proximité de la frontière française.

4.2.1.1 Caractéristiques du bassin

Le bassin de l'Alzette couvre près de la moitié de la surface du Grand Duché de Luxembourg (1175 km^2, avec les parties belge et française du bassin) et regroupe près des 2/3 de sa population (Pfister *et al.*, 2002a). Depuis les fortes inondations de 1993 et 1995, les autorités publiques et le Centre de Recherche Public - Gabriel Lippmann (CRP-GL) ont mis en place sur le bassin des réseaux complémentaires de mesure des précipitations et des débits. Dans la plaine alluviale

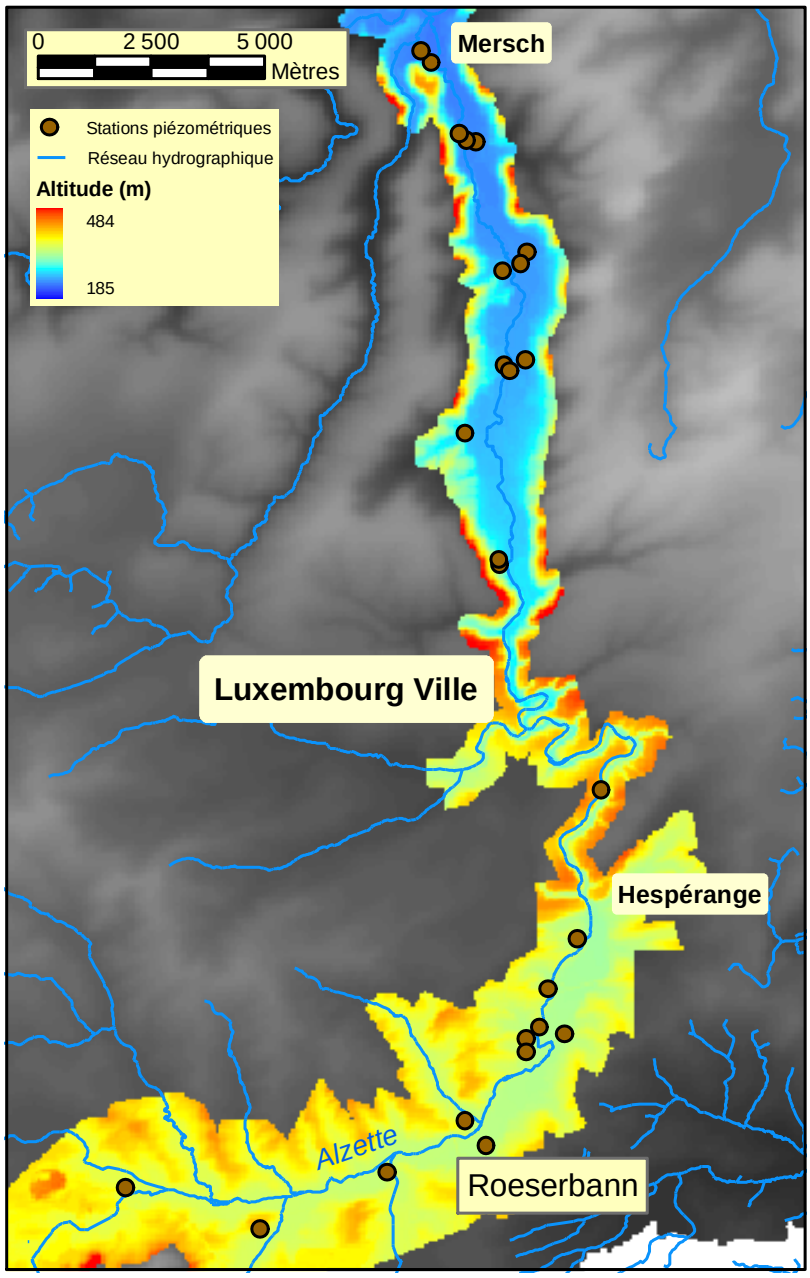


FIG. 4.1 – Configuration de la plaine alluviale de l'Alzette (Luxembourg) et localisation des stations piézométriques

de l'Alzette, ces réseaux sont complétés par des piézographes surveillant la hauteur du toit de la nappe depuis 1996.

L'amont du bassin est constitué d'une plaine alluviale assez large (environ 2.5 km), essentiellement composée de substrats marneux. Puis, en amont de Luxembourg-Ville à la hauteur de la ville d'Hespérange, on observe un brusque rétrécissement de la vallée dû à un goulet grèseux. Cette formation conduit le cours de l'Alzette à des gorges encaissées, jusqu'à l'aval de Luxembourg-Ville, où la plaine alluviale reprend alors des dimensions plus importantes. Avec des profondeurs variant de 4 à 8 m, les dépôts alluviaux sont composés de sables, de graviers et de marnes (Marx, 1987). Cette barrière naturelle de grès est d'un grand intérêt hydrologique et

hydraulique. En effet, elle constitue un goulet d'étranglement pour les eaux de surface comme pour les eaux souterraines, délimitant parfaitement le sous-bassin versant amont. Le comportement de ce sous-bassin peut-être aisément comparé à celui d'une baignoire : toute l'eau précipitée dans cette partie du bassin doit nécessairement transiter par les gorges en aval d'Hespérange, s'y accumulant et remplissant la plaine. Plus au nord, un deuxième goulet d'étranglement gréseux moins important est présent en amont de la localité de Mersch. Ces éléments en font un "cas d'école" hydrologique particulièrement intéressant. Du fait de ces caractéristiques morphologiques, les zones d'études sont restreintes à la plaine alluviale en aval de Luxembourg-Ville, et à la plaine du Roeserbann (fig. 4.1).

4.2.1.2 Hydrologie du bassin

Les observations de la pluie, des débits et de la nappe souterraine ont confirmé le régime pluvio-évaporal du bassin de l'Alzette avec les écoulements les plus importants enregistrés en hiver et les écoulements les plus faibles en été (Pfister *et al.*, 2000b). Les inondations sont principalement générées par des précipitations à intensités modérées, s'étalant sur plusieurs jours. Au cours de l'automne, les pluies abondantes et les évapotranspirations relativement faibles causent une élévation progressive du niveau de la nappe souterraine et des débits. Au début de l'hiver, la résurgence de la nappe apparaît d'abord près du goulet d'étranglement d'Hespérange et s'étend progressivement vers l'amont. Dans la plaine de l'Alzette, les niveaux de nappe enregistrés tendent à se stabiliser à une valeur maximale à partir du moment où la résurgence apparaît dans le fond de la vallée. L'étranglement de la vallée au niveau des deux verrous freine la progression des écoulements souterrains et provoque une hausse rapide des niveaux piézométriques. Lorsque la plaine se sature ainsi progressivement, l'alimentation du cours d'eau par la nappe augmente (fig. 4.2) et la capacité résiduelle d'infiltration et de stockage dans la plaine est réduite. L'élargissement progressif des zones saturées entraîne une augmentation des surfaces contributives à l'écoulement. Ceci a comme conséquence que les coefficients d'écoulement augmentent et génèrent des écoulements importants dans la rivière à la suite d'épisodes pluviométriques hivernaux de longue durée (Pfister *et al.*, 2002b).

Le bilan hydrologique est calculé pour analyser l'évolution du stock d'eau emmagasiné dans le bassin de l'Alzette au courant de l'année. La dynamique du bilan d'eau suit de près celle du niveau moyen de la nappe souterraine enregistrée dans la plaine (fig. 4.3). Il se stabilise aux alentours d'une valeur seuil comprise entre 230 et 250 mm qui coïncide avec les niveaux de résurgence de la nappe dans la plaine alluviale. Lorsque les conditions de saturation sont atteintes, tout événement pluviométrique de forte intensité ou de durée exceptionnelle (fig. 4.3a) est susceptible d'entraîner en quelques heures une montée importante des débits des cours d'eau, voire même des inondations dans la plaine alluviale (Pfister, 2000).

L'impact d'une saturation progressive du réseau hydrographique est illustré par la relation presque linéaire entre le bilan d'eau du bassin et les coefficients d'écoulement enregistrés pour les épisodes pluviométriques ayant eu lieu entre octobre 1997 et mars 2001 (fig. 4.3b). Plus le bassin est saturé, plus les coefficients d'écoulement sont importants. Avec des coefficients d'écoulement dépassant 70% de la pluie incidente, le risque de crue et d'inondation est augmenté considérablement au moment de la saturation hivernale. En cas de neige, les coefficients de ruissellement sont sensiblement diminués à cause d'une contribution retardée au ruissellement.

Ces observations ont permis de développer une méthodologie empirique pour la prévision des coefficients d'écoulement à partir du suivi en continu du niveau du bilan et du niveau du toit de la nappe (Pfister *et al.*, 2003). Ces deux variables hydrologiques permettent de faire

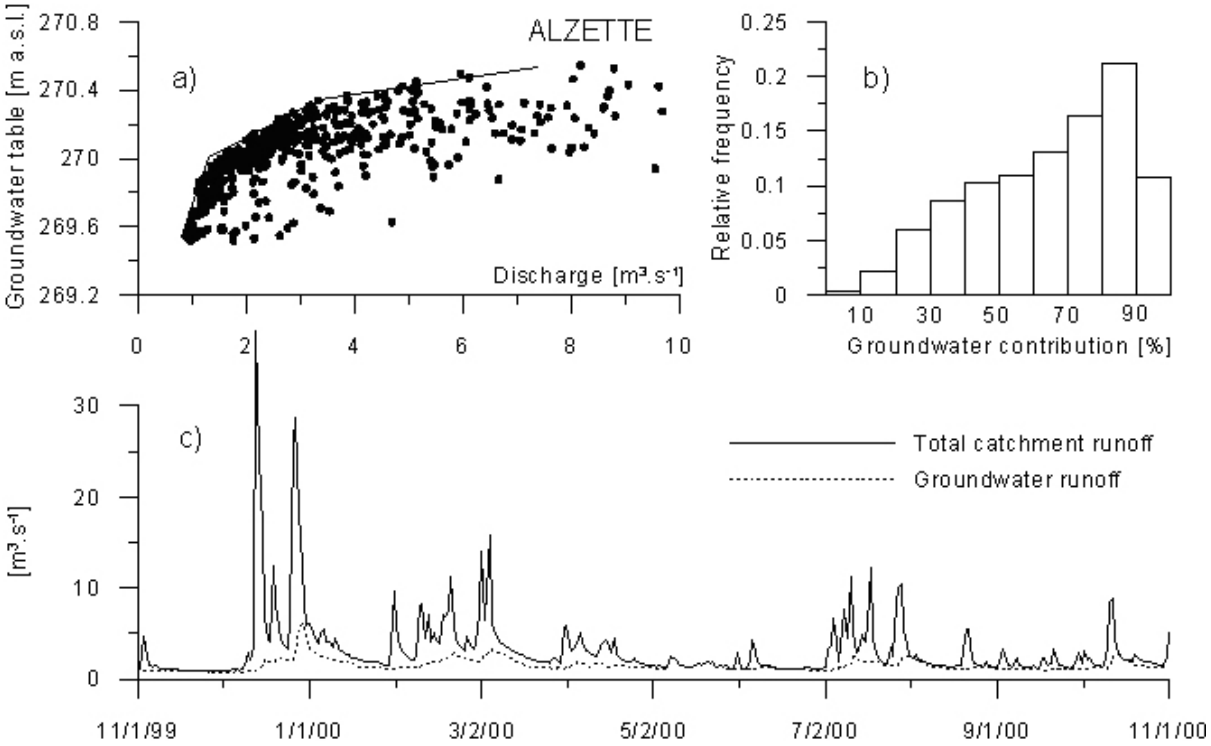
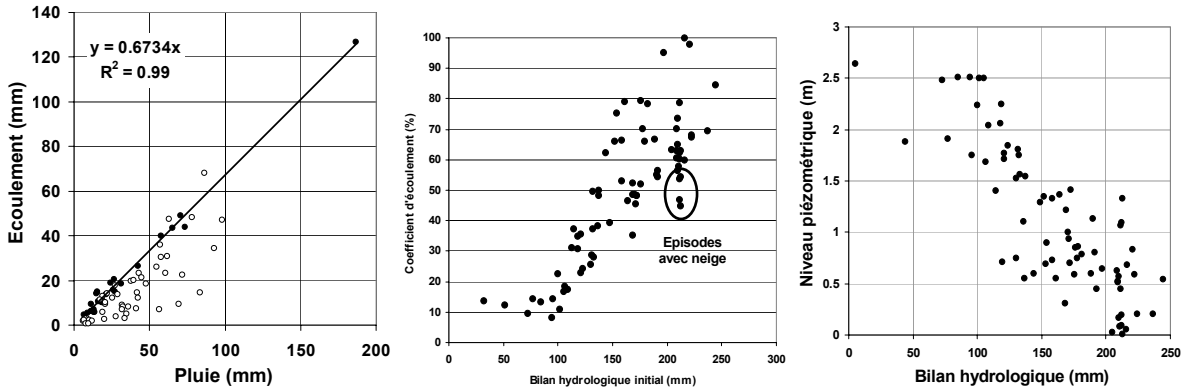


FIG. 4.2 – Relations entre la hauteur de la nappe et les débits (a), contribution des eaux souterraines au débit (b), séparation des écoulements sur une année hydrologique (c) (Holko *et al.*, 2002)



(a) Pluie et écoulement

(b) Bilan hydrologique initial et le coefficient d'écoulement

(c) Bilan hydrologique et le niveau piézométrique

FIG. 4.3 – Relations entre grandeurs hydrologiques et hydrauliques caractéristiques du bassin de l'Alzette (Pfister *et al.*, 2003)

le suivi de la capacité de stockage résiduelle du bassin versant. Ce sont des indicateurs de la capacité d'infiltration de la pluie pour une situation d'humidité donnée. La fraction de la pluie participant au ruissellement étant ainsi anticipée, on peut en déduire l'ampleur de la pluie critique susceptible de créer des inondations importantes à l'exutoire du bassin. Le suivi de ces variables permet d'évaluer en continu le danger d'inondation aux différents endroits du réseau hydrographique caractérisés par des capacités d'écoulement différentes.

4.2.2 Données ERS

La composante données radar ERS (cf. §A.2.1.2) de la base de données comprend essentiellement une série temporelle de 9 images acquises du 20/11/93 au 27/02/94, à raison d'une image tous les 6-9 jours entre le 25/12/93 et le 27/02/94. Cette série d'images, acquise pendant le mode 3 jours d'ERS-1, présente une emprise géographique quasi constante. Enfin, 3 images acquises pendant l'hiver 1999/2000 et 1 en Janvier 2003 s'y ajoutent.

Date	Mission	Pass	Orbit	Frame
20/11/1993	ERS-1	D	12277	2599
25/12/1993	ERS-1	D	12778	2601
06/01/1994	ERS-1	D	12950	2601
12/01/1994	ERS-1	D	13036	2601
18/01/1994	ERS-1	D	13122	2601
02/02/1994	ERS-1	D	13337	2601
08/02/1994	ERS-1	D	13423	2601
17/02/1994	ERS-1	D	13552	2601
23/02/1994	ERS-1	D	13638	2601
09/12/1999	ERS-2	D	24239	2601
27/12/1999	ERS-1	D	44164	2601
13/01/2000	ERS-2	D	24740	2601
02/01/2003	ERS-2	D	40271	2601

Tab. 4.1 – Base de données ERS sur l'Alzette

La base de données ERS-1 et 2 est finalement enrichie par une acquisition de l'ASAR d'ENVISAT, en mode polarisation alternée (polarisations VV et VH) à haute et moyenne résolution (pixels de 12.5 m et 75 m respectivement). Acquise le 02/01/03, en orbite ascendante (le soir, vers 22h), elle complète l'image ERS-2 du matin et offre une vision dynamique de la crue de janvier 2003, quelques heures avant la pointe.

Cette base de données fournie au niveau PRI (géométrie distance-sol, traitement multi-vues, correction du diagramme d'antenne...) nécessite une part importante de traitements radiométriques et géométriques avant d'être pleinement exploitable. Les traitements s'intéressent tout d'abord à la radiométrie, puis à la géométrie.

4.2.2.1 Calibration radiométrique

Ce premier aspect du traitement des données ERS est réalisé avec le SAR Tool Box, outil développé par l'ESA. L'utilisation de ce logiciel se justifie par la présence de deux données traitées différemment dans la série. Les images du 18/01/94 et du 08/02/94 n'ont pu faire l'objet d'une correction complète par le centre de traitement, à cause de l'extraction erronée d'un paramètre lié à la compression d'impulsion lors de l'acquisition. De fait, il est nécessaire de prendre en compte d'autres variables présentes dans le fichier d'en-tête.

Ces deux images nécessitant un traitement particulier afin de pouvoir être calibrées, la totalité de la série est traitée radiométriquement de cette façon, afin d'éviter des imprécisions ultérieures dans l'exploitation quantitative des données. La chaîne de traitement se décline selon les étapes suivantes :

- Analyse du fichier d'en-tête : cette première étape permet d'extraire toutes les informations concernant l'image et notamment ses dimensions, ses coordonnées géographiques approchées, la position du satellite, les paramètres de calibration de l'instrument...
- Extraction de l'image : chaque pixel est interprété à partir des informations recueillies dans l'en-tête,
- Calibration σ_0 : grâce aux paramètres de calibration de l'instrument, le calcul du coefficient de rétrodiffusion est effectué selon les recommandations de Laur *et al.* (1998), uniformémement sur l'ensemble de l'image sans prise en compte de l'incidence,
- Calibration γ : à partir du calcul précédent, la calibration γ applique la variation d'angle de dépression α du faisceau radar le long de la fauchée, ce qui revient à ajouter à chaque pixel une quantité variable $\log_{10}(\sin\alpha/\sin\alpha_{ref})$.

Les images calibrées peuvent être calculées sur une échelle linéaire ou logarithmique, mais la première est préférée pour faciliter les opérations d'export, puis d'import dans le logiciel de traitement d'images. Les images sont alors prêtes à être corrigées géométriquement.

Lorsque cette dernière correction est réalisée, il est envisageable de procéder à une dernière calibration radiométrique : la prise en compte de l'incidence locale, dont le calcul est exposé au chapitre 3. Ainsi, en chaque pixel, on ajoute la quantité $\log_{10}(\sin\alpha_i/\sin\alpha)$. Cette opération ne se justifie que dans les zones où le relief est assez prononcé.

4.2.2.2 Orthorectification

La collaboration avec le Centre de Recherches Public - Gabriel Lippmann permet de disposer d'une base de données cartographiques importante et notamment d'un modèle numérique de terrain, à 75 m de résolution planimétrique, sur l'ensemble du territoire luxembourgeois, ainsi que d'un modèle obtenu par photogrammétrie, à 2 m de résolution, sur la plaine alluviale de l'Alzette. Pour la réalisation de l'orthorectification, seul le MNT à 75 m est utilisé.

Le processus d'orthorectification de la donnée RSO utilise des paramètres extraits du fichier d'en-tête de chaque image et notamment :
- la position du satellite dans un repère géocentrique,
- l'attitude et la vélocité du satellite, par l'intermédiaire de trois vecteurs vitesse exprimés dans ce même repère,
- les valeurs approchées de la position de la scène (coins et centre),
- les dimensions de l'image et le temps d'acquisition.

Les données de position contenues dans l'en-tête sont assez approximatives : la précision des coordonnées de la scène est de l'ordre de 200 à 300 m. En combinant les informations de l'en-tête, on peut arriver à générer une image orthorectifiée sans prise de points de calage, localisée à une centaine de mètres près. Sur la série de 12 images acquises sur le Luxembourg, une telle performance n'a pu être réalisée, nécessitant la saisie manuelle de points de calage pour corriger les imprécisions des données d'éphémérides. Cette nécessité est d'autant plus forte pour assurer la cohérence géométrique entre les données ERS-1 de 1993/94 et les autres de 1999, 2000 et 2003. En 1993/94, ERS-1 fonctionne en mode 3 jours (*Ice Phase*) et le décalage géographique des scènes, provoqué par le défilement de l'orbite, est minime. Par contre, il fonctionne en mode standard (35 jours) pour les autres dates, fournissant des images sur des emprises différentes (fig. 4.4). La zone d'intérêt du Roeserbann se trouve alors en bout de fauchée sur une majorité d'images et en milieu de fauchée sur quelques autres, impliquant des déformations différentes.

D'importantes déformations dues au relief (essentiellement du repliement) sont constatées au Nord de Luxembourg-Ville. Mais elles restent limitées au Sud, dans la partie amont du bassin

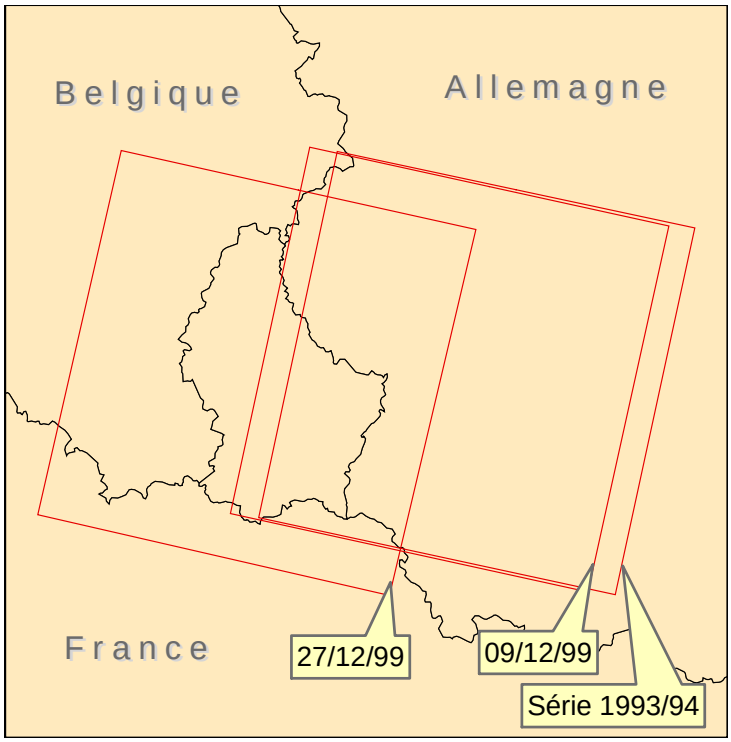


FIG. 4.4 – Couverture ERS-1 et 2 de l'Alzette

de l'Alzette, où le relief demeure modéré. Malgré tout, l'orthorectification est indispensable afin de garantir une cohérence géométrique interne de la série temporelle et externe avec les autres données cartographiques et hydro-météorologiques.

4.2.3 Données hydro-météorologiques mesurées et simulées

Ce volet de la base de données mise en place sur le Luxembourg est composé de différents types d'information :
- la pluviométrie : elle est mesurée par des stations ponctuelles, spatialisée et cumulée sur des périodes de 2, 4, 7 et 10 jours avant les acquisitions ERS,
- la piézométrie : elle mesure ponctuellement les hauteurs de nappe, qui posent de nombreux problèmes d'interpolation (l'Alzette étant une rivière phréatique, engendrant une élévation du toit de la nappe jusqu'à la cote de la rivière).

Les réseaux de mesure fournissant ces données sont exploités conjointement par le CRP-GL et le Service de l'Eau du Ministère de l'Intérieur.

4.2.4 Données cartographiques complémentaires

Enfin, pour compléter la description du bassin amont de l'Alzette, la base de données comporte un jeu de couches cartographiques de référence. Ces données complémentaires décrivent différents aspects de l'environnement et notamment :
- le modelé du terrain : MNT à 75 m sur le territoire luxembourgeois, à 2 m sur la plaine alluviale,
- l'occupation du sol : base de données CORINE Landcover, établie en 1997, sur la base d'un élément minimal de 25 ha,
- la base de données cartographiques nationale au 1/20 000, extrêmement détaillée. Pour faire un parallèle avec les produits de l'IGN, elle combine des informations cadastrales telles que

les parcelles ou le bâti avec des informations similaires à la BD Carto,
- la pédologie : carte des types de sols et de la profondeur d'enracinement dont est dérivée une carte de la capacité de stockage dans les premières couches de sol
- la zone de fonctionnement du modèle hydraulique.

Ces données exogènes sont utilisées pour préparer les images radar en géométrie, fournir des clefs d'interprétation préliminaire et des éléments de localisation géographique. Ces informations sont indispensables à une analyse appronfondie des images spatiales, en fournissant un renseignement fonctionnel ou en permettant d'isoler et d'identifier des signatures particulières.

4.3 Approche empirique

Dans la mesure où, sur la série d'images radar acquises en 1993-94, nous ne disposons que de la pluviométrie, des pronfondeurs de nappe, de simulations de débits et de bilan hydrologique, l'accès à l'humidité est indirect. Cependant à l'échelle de la zone d'étude du Roeserbann, des liens forts se dessinent entre le coefficient de rétrodiffusion radar et divers paramètres environnementaux. Après une première analyse globale de la série d'images, les relations de la mesure radar avec la pluviométrie, la profondeur de la nappe et enfin un indice de saturation construit à partir des mesures piézométriques, sont étudiées de façon empirique.

4.3.1 Analyse préliminaire des images

Une première analyse du coefficient de rétrodiffusion est d'abord réalisée à une échelle très large. La valeur moyenne de la rétrodiffusion radar est calculée sur différents découpages géographiques : la scène entière, la zone d'étude en amont de Luxembourg-Ville, les surfaces forestières (d'après la base de données CORINE) et non-forestières. Elle est problématique et anormalement basse pour trois images de la série (fig. 4.5). Hormis les basses valeurs, le fait marquant mis en évidence par cette analyse est la similitude des variations sur les différentes emprises. Les variations du thème forêt sont particulièrement significatives, alors que la rétrodiffusion sur ce type d'occupation du sol est normalement stable dans le temps (entre -7 et -8 dB), surtout sur une période aussi courte (Zribi *et al.*, 2003).

Pour les acquisitions des 20/11/93, 18/01/94 et 17/02/94, les observations météorologiques montrent des températures négatives. En particulier le 18/01, la température a atteint -10 °C avec une couverture de neige (Ulaby *et al.*, 1982). Les très fortes baisses de rétrodiffusion sont exclusivement dues au gel des horizons supérieurs du sol, qui a pour conséquence de modifier considérablement la constante diélectrique en augmentant la profondeur de pénétration du signal. Ces trois images doivent par conséquent être extraites de la série, au moins pour la mesure du coefficient de rétrodiffusion.

Deux événements de crue se sont déroulés en 1993-1994. Les observations d'ERS-1 n'ont malheureusement pas porté sur les niveaux maxima. L'inondation observée le 6 janvier 1994, qui combine débordements et résurgences, est de plus grande ampleur que celle du 25 décembre. Les courbes d'évolution de la rétrodiffusion radar montrent une augmentation du 25/12/93 au 06/01/94 due à l'augmentation générale de l'humidité sur la zone. Après le 06/01/94, une baisse s'amorce et se stabilise, témoignant de la tendance générale au ressuyage des sols. La persistence de zones inondées dues aux résurgences dans la plaine alluviale ne semble pas affecter la rétrodiffusion moyenne sur ces larges échelles géographiques.

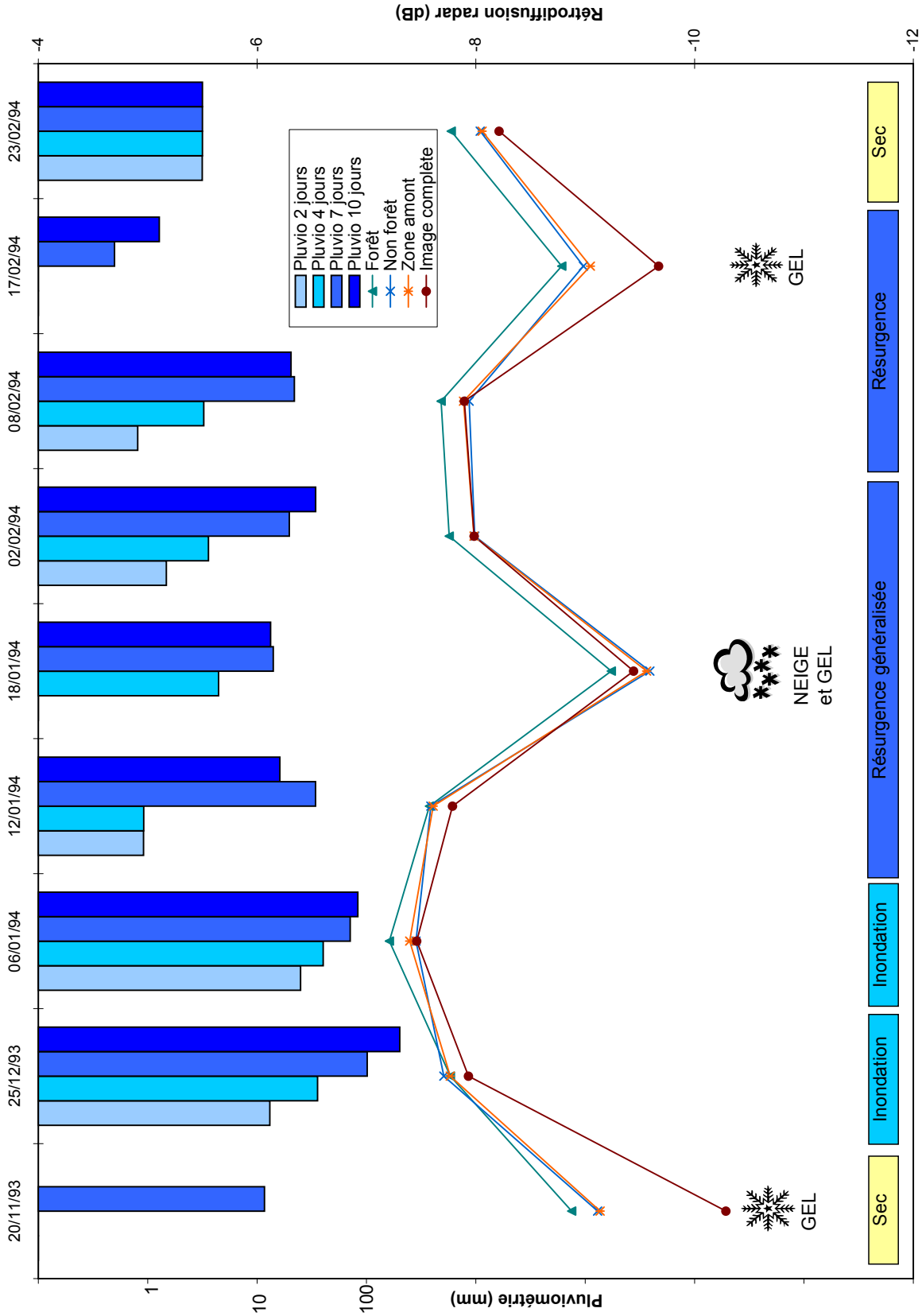


FIG. 4.5 – Comportement du coefficient de rétrodiffusion sur différentes emprises

Différentes situations hydrauliques sont identifiées sur chacune des acquisitions à partir des mesures ou des simulations de débits (tab. 4.2). Les surfaces inondées les plus importantes sont observées au cours des débordements et du ressuyage pendant les jours suivants. Cependant, certaines zones particulièrement soumises aux résurgences de nappes sont systématiquement inondées pendant les mois d'hiver, provoquant des faibles valeurs de rétrodiffusion radar (σ_0), indépendantes des variations spatio-temporelles d'élévation du toit de la nappe.

Date	Type d'inondation
25/12/93	Débordement
06/01/94	Débordement
12/01/94	Résurgence faible
02/02/94	Résurgence
08/02/94	Résurgence faible
23/02/94	Sec

Tab. 4.2 – Situations hydrauliques lors de l'acquisition des images radar de 93-94

L'analyse numérique des images radar, doublée d'une vérification par photo-interprétation, fournit l'extension de la zone inondée pour chacune de ces situations. La cartographie des fréquences de submersion est présentée en figure C.2 et la méthode d'extraction est explicitée au cours du chapitre suivant.

4.3.2 Relation avec la pluviométrie

Le lien entre pluviométrie et coefficient de rétrodiffusion radar a été mis en évidence à plusieurs reprises avec différents types de données radar, notamment Seasat (Ulaby *et al.*, 1983), Radarsat (Brown *et al.*, 1997) et ERS (Fellah *et al.*, 1994). L'étude de la corrélation entre rétrodiffusion radar et pluviométrie est réalisée à l'échelle de la zone du Roeserbann, en amont de Luxembourg-Ville, puis à l'échelle de parcelles de différents types.

4.3.2.1 Analyse à l'échelle de la zone amont

Sur les 6 images de la série, on peut s'intéresser aux évolutions de la pluviométrie cumulée sur plusieurs jours et du coefficient de rétrodiffusion. L'analyse conjointe de ces deux variables montre une bonne corrélation sur différents pas de temps. Lors d'événements pluvieux importants, l'augmentation du σ_0 est concomitante à celle de l'humidité de surface et se fait sur une période plus courte que lorsque la pluviométrie est plus répartie au cours du temps (fig. 4.6). Les 25/12/93 et 06/01/94, les hauteurs d'eau cumulées sur 4 jours apparaissent corrélées avec l'augmentation du coefficient de rétrodiffusion. Cette corrélation est également observée avec le cumul pluviométrique sur 2 jours. Les cumuls sur 7 jours correspondants illustrent quant à eux le niveau de saturation élevé dans lequel se trouve le bassin. Par contre, sur les trois dernières dates d'acquisition, la variation du σ_0 apparaît liée aux cumuls sur 7 jours.

Un comportement du bassin sur deux échelles temporelles est identifiable en fonction du volume et de l'intensité des apports pluviométriques :
- réaction de grande amplitude et rapide du coefficient de rétrodiffusion lors d'apports pluvieux importants sur de courtes périodes (2 à 4 jours) dans des conditions déjà humides,
- réaction de moindre amplitude lors d'apports pluvieux plus répartis dans le temps (7 à 10 jours).

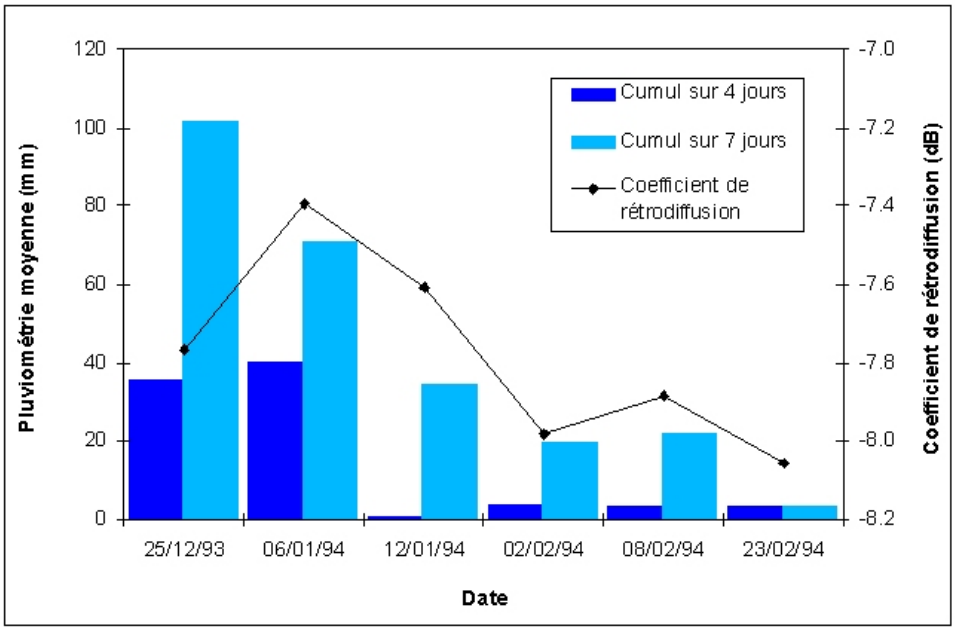
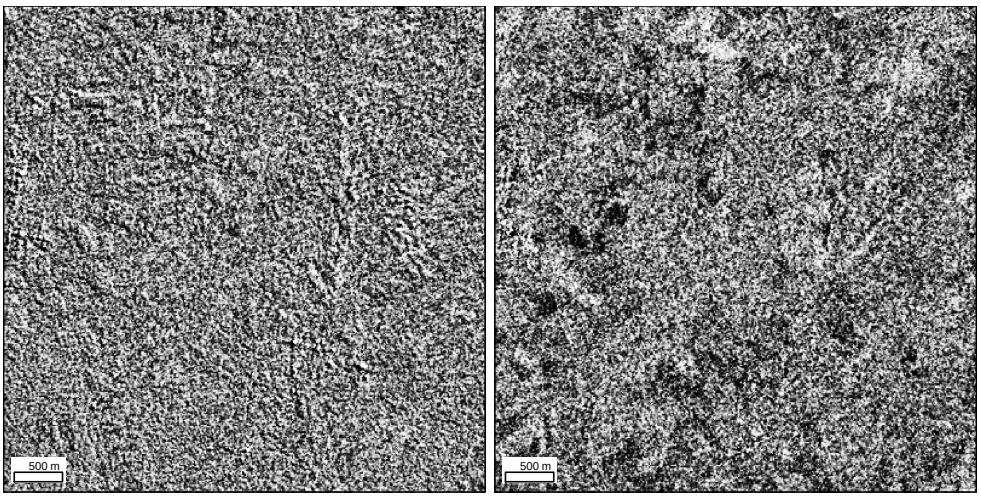


FIG. 4.6 – Variation du σ_0 en fonction des cumuls pluviométriques

La relation à l'échelle de la zone d'étude entre la pluviométrie moyenne et la rétrodiffusion radar, sans distinction des types de surfaces, montre l'importance de la pluviométrie des semaines précédentes sur l'amplitude de la réponse radar. La période d'analyse étant courte (à peine deux mois), les variations observées du σ_0 sont attribuables quasi exclusivement aux variations de la teneur en eau dans les premières épaisseurs des sols. En effet, le calcul des différences image à image de la série 93/94 ne met en évidence que la contribution aléatoire du chatoiement (fig. 4.7a). Par contre, les différences entre les images de 93/94 et 99/00 (fig. 4.7b) font apparaître nettement des éléments parcellaires, du fait de changement d'occupation du sol ou de rugosité de surface.



(a) Entre deux images de 1994 (b) Entre deux images de 1994 et 1999

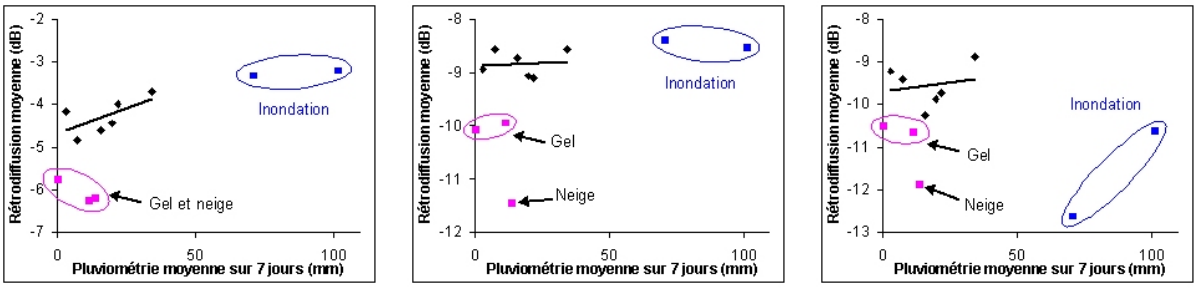
FIG. 4.7 – Différences image à image

L'absence de mesures sur le terrain de la teneur en eau volumique des sols fait ici défaut. Elles auraient permis de relier directement les variations de rétrodiffusion radar à des variations d'humidité. Cependant, l'impact de la pluviométrie sur les hauteurs piézométriques, *i.e.* sur le niveau de saturation du bassin, est très important sur certaines stations. Certaines d'entre elles, lorsqu'elles sont proches de la rivière, réagissent presqu'aussi vite que les limnimètres (Pfister *et al.*, 2000a et 2003). L'exploitation de ces différentes mesures fournit un accès indirect à l'humidité.

4.3.2.2 Analyse à l'échelle de la parcelle

Les mesures de σ_0 sont effectuées sur des parcelles inondées par débordement ou par résurgence. Elles sont identifiées manuellement, à partir des images radar et de la connaissance du fonctionnement de la plaine, et complétées par des parcelles hors de la zone inondable mais assez proches du fond de vallée. Leur surface, qui s'étend de 4 à 25 ha, crée des conditions favorables à la mesure de rétrodiffusion radar compte tenu des recommandations énoncées par Fellah *et al.* (1995) et illustrées par le tableau 2.2.

L'occupation du sol de ces parcelles est interprétée *a priori* avec les images radar (cf. fig. 4.11) et les bases de données exogènes, faute d'information synchrone pertinente. Les acquisitions sont réalisées pendant deux mois d'hiver, ce qui autorise l'hypothèse de stabilité de la rugosité et de la couverture des surfaces. Des relations nettes sont observées (fig. 4.8) entre la pluviométrie des 7 jours précédents et le σ_0 mesuré sur toutes les images de la base de données (tab. 4.1).



(a) Parcelles en sols nus (b) Parcelles végétalisées (c) Parcelles en zone inondée

FIG. 4.8 – Relation entre le coefficient de rétrodiffusion et le cumul pluviométrique sur 7 jours

Sur les parcelles identifiées en sols nus, les variations de la mesure radar sont essentiellement influencées par les variations d'humidité provoquées par les précipitations. Hormis pour les dates soumises au gel et à la neige, la relation entre l'antécédent pluviométrique et le coefficient de rétrodiffusion est linéaire. On peut noter un aplatissement du nuage témoignant de la saturation des sols, lorsque l'inondation est observée dans la plaine alluviale : quel que soit l'apport pluviométrique, le coefficient de rétrodiffusion, donc l'humidité, se stabilise.

Des observations similaires peuvent être formulées pour les parcelles végétalisées. L'atténuation du signal par la végétation, due à la diffusion en volume, se concrétise par des valeurs plus basses (Fellah, 1997), une pente de la droite de régression beaucoup plus faible et par l'absence de palier de saturation.

Pour les parcelles situées dans la zone inondable, la relation linéaire n'est plus véritablement observée et c'est seulement une tendance assez vague qui se distingue, avec une grande variabilité des mesures. Cette dispersion semble attribuable à la présence de petites surfaces inondées

persistentes (cf. fig. C.2) sur plusieurs images (Mérot et Chanzy, 1991). Si la neige provoque un point nettement à l'écart du nuage, il n'en est pas de même pour le gel. Enfin, l'inondation de la plaine alluviale génère des points nettement distincts, du fait des valeurs basses de rétrodiffusion dues à la réflexion spéculaire du signal radar sur les surfaces en eau. Le point le plus extrême correspond à la date du 25/12/93 où la plaine n'est pas complètement inondée. On observe donc une réponse mixte entre l'eau et les surfaces émergées. Par contre, pour le second point (le 06/01/94) toutes les parcelles sélectionnées sont inondées.

L'analyse de la relation entre la mesure du coefficient de rétrodiffusion radar et l'antécédent pluviométrique montre une dépendance forte entre ces deux paramètres, en particulier lorsque la saturation n'est pas atteinte (*i.e.* parcelles hors de la zone inondable). L'imagerie radar apparaît comme adéquate pour fournir un indicateur général de saturation du bassin.

4.3.3 Relation avec les profondeurs de nappe

Le coefficient de rétrodiffusion radar et ses variations apparaissent fortement conditionnés par l'antécédent pluviométrique. Par rapport à l'interface constituée par les premiers centimètres de sols, cet antécédent caractérise une relation par le "haut". Mais cette pluviométrie vient alimenter la nappe alluviale, très proche de la surface dans le fond de vallée (fig. 4.9). Il semble donc légitime de s'intéresser à sa relation (par le "bas") avec la teneur en eau des sols (Beldring *et al.*, 1999), d'autant que la profondeur de la nappe joue un rôle prépondérant dans la génération des crues (Pfister *et al.*, 2003).

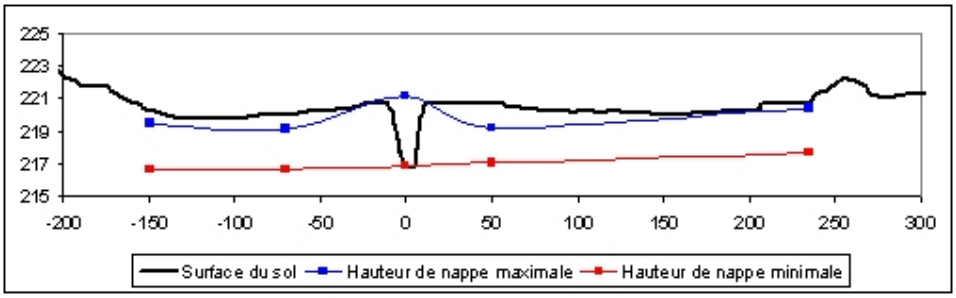


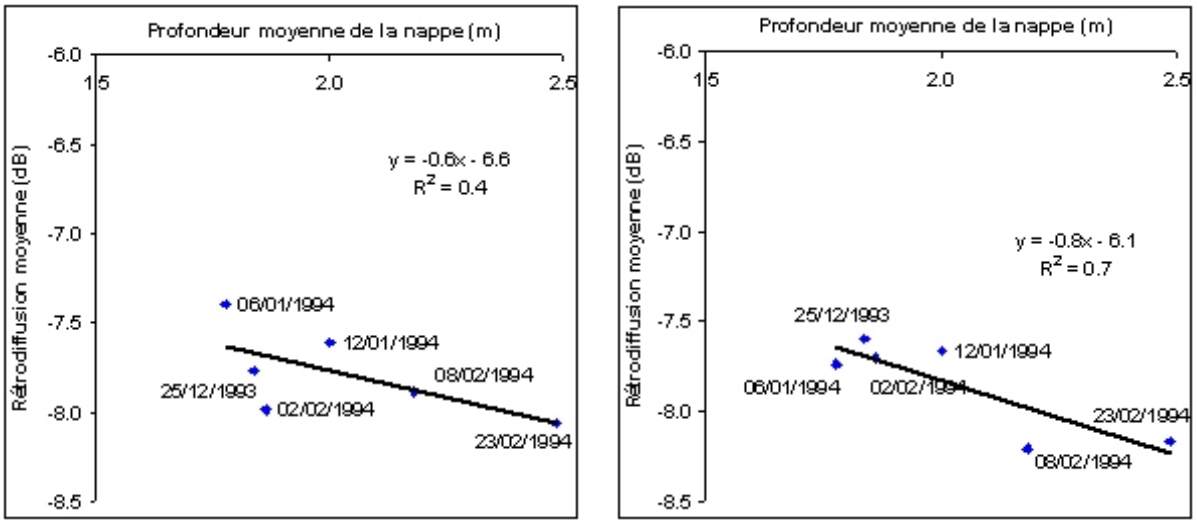
FIG. 4.9 – Amplitude annuelle des battements de la nappe sur un profil en travers de la rivière

Comme précédemment, l'analyse de la relation entre rétrodiffusion radar et profondeur de nappe est réalisée à l'échelle de la zone amont puis sur des parcelles sélectionnées.

4.3.3.1 Analyse à l'échelle de la zone amont

La spatialisation de la profondeur de la nappe n'est pas réalisable à partir des seules mesures piézométriques ponctuelles. De multiples paramètres doivent être pris en compte comme le niveau de la rivière ou la structure verticale des sols pour ne citer que les principaux. Cependant, l'analyse à grande échelle de la relation temporelle entre la profondeur moyenne du toit de la nappe et de la rétrodiffusion moyenne montre une forte tendance linéaire (fig. 4.10).

Calculé sur l'ensemble de la zone (fig. 4.10a), le σ_0 présente une corrélation peu élevée avec la profondeur moyenne de la nappe (R=0.6), ou du moins avec les effets de surface liés à sa présence. La variabilité des mesures est d'autant plus forte que la nappe remonte vers la surface. Ceci est dû à la combinaison de deux effets concurrents sur la plaine alluviale : augmentation du σ_0 dans les zones non inondées par augmentation de la teneur en eau en surface ; et forte baisse dans les zones inondées, provoquées par la réflexion spéculaire de l'onde radar sur l'eau.



(a) Sans distinction d'occupation du sol

(b) Surfaces agricoles non inondées

FIG. 4.10 – Relation entre profondeur moyenne de la nappe et rétrodiffusion radar sur la zone d'étude amont

Sur les surfaces naturelles non inondées (hors forêts), qui présentent une plus faible variété de types d'occupation du sol, une meilleure corrélation est obtenue (R=0.84) et les mesures sont moins dispersées autour de la droite de régression (fig. 4.10b). Sur cette emprise d'analyse, les variations observées du σ_0 sont attribuables exclusivement à une variation de la teneur en eau des premières couches de sol. Cette analyse montre que le σ_0 augmente avec l'élévation du toit moyen de la nappe de 0.8±0.2 dB.m^{-1} en moyenne, soit une augmentation d'humidité de 1 à 6%.m^{-1} d'après les différentes relations empiriques du tableau 2.3.

Les coefficients des droites de régression obtenues montrent que lorsque le niveau moyen de la nappe atteint la surface, *i.e.* lorsque les sols sont complètement saturés, la rétrodiffusion moyenne atteint environ -6 dB. La valeur légèrement plus basse obtenue sur l'ensemble de la zone s'explique essentiellement par l'action combinée des zones forestières, où la diffusion en volume atténue l'intensité du signal rétrodiffusé, et des zones urbaines, où le signal rétrodiffusé est élevé et stable. La position des stations piézométriques (surélevées par rapport au fond alluvial) rend cette valeur inatteignable. Par contre, les points situés à l'extrême gauche des nuages correspondent aux acquisitions des 25/12/93 et 06/01/94, dates auxquelles la plaine alluviale est inondée. Il semble donc plus raisonnable de localiser le seuil de saturation pour l'ensemble de la zone aux environs de -7.5 dB. Cette valeur est à mettre directement en relation avec les observations précédentes sur la pluviométrie (fig. 4.8b et c) et souligne l'importante proportion de surfaces végétalisées sur la zone d'étude.

Par rapport à la valeur de -5.5 dB (cf. §2.2.8.2, fig. 2.11) établie sur des sols nus par Fellah (1997), la valeur inférieure obtenue sur les zones agricoles peut avoir deux origines. Tout d'abord, ne disposant pas d'informations précises sur l'occupation du sol au moment des acquisitions, la zone considérée englobe des parcelles en sols nus et des parcelles végétalisées (en prairie pour l'essentiel). Par conséquent, une atténuation par la végétation est fort probable. Mais la source d'imprécision principale demeure le calcul de la valeur moyenne de la profondeur de nappe. En effet, ce calcul assimile le toit de la nappe à un plan moyen dont la profondeur est donnée par les stations piézométriques, ce qui gomme complétement les variations locales (fig. 4.9). Le nombre et la localisation des stations influent considérablement sur la profondeur moyenne.

L'approche globale, à l'échelle de la zone d'étude, est considérablement limitée par différentes sources d'erreurs combinées, en particulier les effets de l'occupation du sol et du moyennage des hauteurs piézométriques. Elles sont d'ailleurs mises en évidence par le test de Student sur les coefficients directeurs des droites de régression, pour lesquels les intervalles de confiance à 95% incluent la valeur nulle. Ainsi, l'hypothèse de croissance nulle, donc d'indépendance des deux variables, ne peut être rejetée aux vues des observations disponibles et de l'échelle d'analyse. Afin de limiter les effets perturbateurs, une analyse à l'échelle de la parcelle est envisageable. Pour un seul type d'occupation du sol, la mesure radar est mise en relation avec la piézométrie mesurée à la ou les stations les plus proches.

4.3.3.2 Analyse à l'échelle de la parcelle

Les mêmes parcelles que précédemment sont utilisées. Pour les parcelles inondées par résurgence comme pour celles hors de la zone inondable, une relation forte apparaît entre le σ_0 et la profondeur de nappe mesurée au piézomètre le plus proche (fig. 4.11), permettant d'approcher autrement le comportement de la perte de signal due à la réflexion spéculaire.

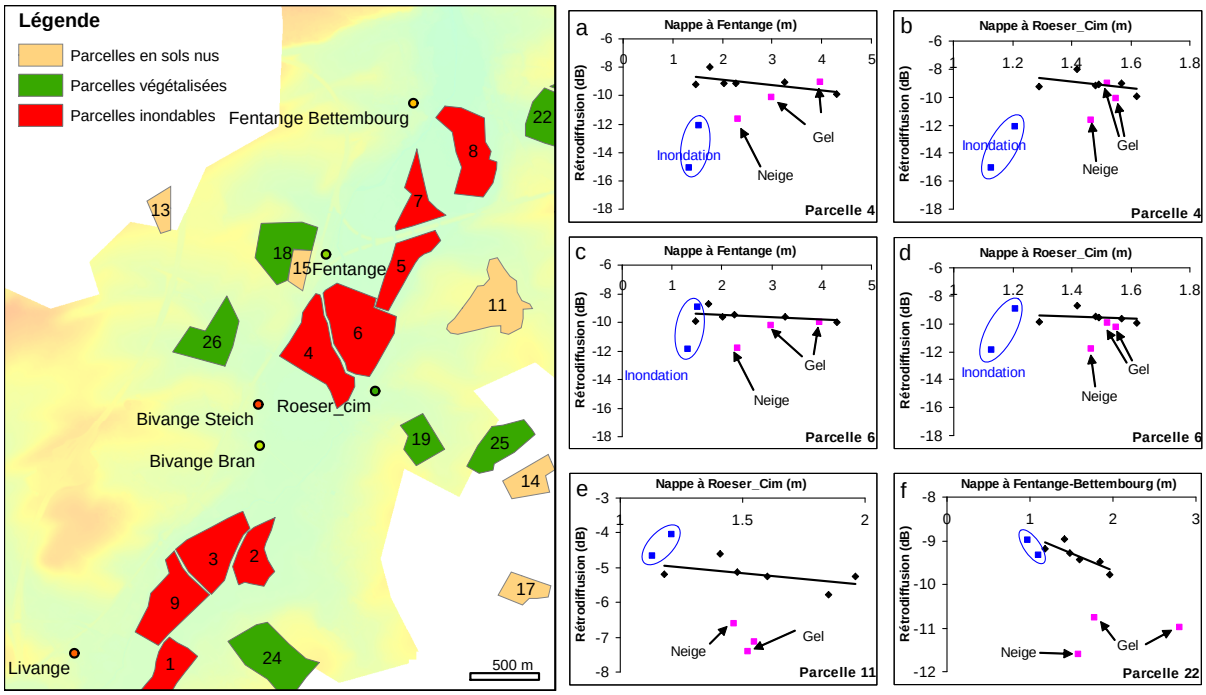


FIG. 4.11 – Localisation des parcelles d'étude et relations avec les profondeurs de nappe mesurées aux piézomètres les plus proches

La partie supérieure du nuage de points décrit la phase de montée du niveau de la nappe, correspondant à une augmentation du coefficient de rétrodiffusion. L'équation de régression obtenue est linéaire, mais cette linéarité est perdue dès l'apparition d'eau en surface. L'amplitude des battements de nappe observés aux différentes stations piézométriques influe considérablement sur l'étalement du nuage de points. Cette constatation, aussi triviale soit elle, met en évidence la difficulté à relier de façon simple la profondeur de nappe à un paramètre spatialisé.

Des points particuliers sont identifiés en dehors de l'évolution linéaire. Au contraire de la neige qui diminue fortement l'intensité rétrodiffusée, le gel ne génère pas de point particulièrement discordant à l'échelle des parcelles de la zone inondable. Il est fort probable que la nappe, à proximité de la surface du sol dans ces zones, joue un rôle de "réservoir thermique" qui limite les effets du gel.

Sur ces parcelles, les points correspondants aux deux événements de crues se détachent nettement de l'évolution générale. La chute brutale de rétrodiffusion due à l'apparition d'eau libre en surface est nettement mise en évidence sur les parcelles fortement inondées à ces deux dates (fig. 4.11a et b). Par contre, pour les parcelles où le premier événement (25/12/93) ne provoque pas de submersion, le point correspondant témoigne de la saturation de la parcelle en s'alignant avec le reste du nuage (fig. 4.11c et d).

Sur les parcelles hors de la zone inondable (fig. 4.11e et f), les dates soumises au gel et à la neige se détachent plus nettement, renforçant l'interprétation quant au rôle de la nappe dans le gel des premières couches de sols. Les points correspondants aux deux inondations s'inscrivent dans la continuité du reste du nuage. Ils témoignent de l'augmentation générale du niveau de saturation de la zone. Cette linéarité de la relation entre le coefficient de rétrodiffusion moyen et la profondeur de nappe est constatée sur les différentes parcelles, qu'elles soient *a priori* végétalisées ou non. La différence se situe essentiellement dans la position verticale du nuage de points sur la représentation : l'atténuation du signal par la végétation provoque une rétrodiffusion moyenne plus basse que celle des sols nus.

Même si les tendances constatées correspondent aux comportements déjà observés du signal radar dans la littérature, les tests statistiques font encore ressortir la faiblesse des régressions. La croissance de la relation entre la profondeur de nappe mesurée par une station et la réponse radar intégrée sur une parcelle proche ne peut être garantie pour l'ensemble de la zone d'étude. Une des causes principales semble être la très forte variabilité des battements de nappe observés aux différentes stations. Une tentative de normalisation est proposée dans la section suivante.

4.3.4 Relation avec un indice de saturation

Afin d'atténuer les importantes disparités entre les mesures de profondeur de nappe aux différentes stations, une méthode de normalisation est développée et en cours de tests. Elle vise à s'affranchir des valeurs absolues de profondeur (fig. 4.12a) en les transformant en un indice de saturation (fig. 4.12b). Elle utilise les minima et maxima observés sur n stations sur la période octobre 1993 – avril 1994. A chaque jour j, il s'exprime sous la forme :

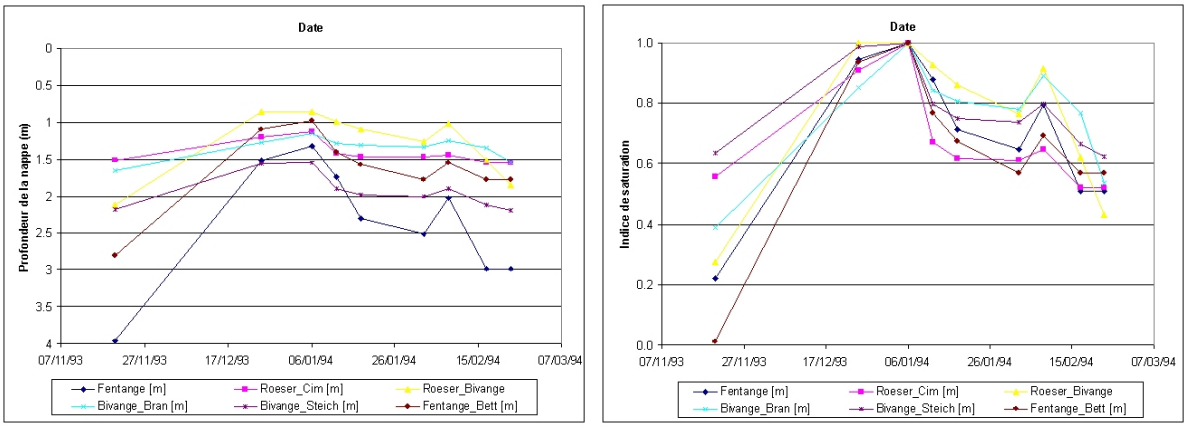
$$SSI_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{d^i_{max} - d^i_j}{d^i_{max} - d^i_{min}} \tag{4.1}$$

La démarche précédente est reprise aux échelles de la zone amont et de la parcelle avec cet indice plus synthétique et plus homogène sur l'ensemble de la plaine.

4.3.4.1 Analyse à l'échelle de la zone amont

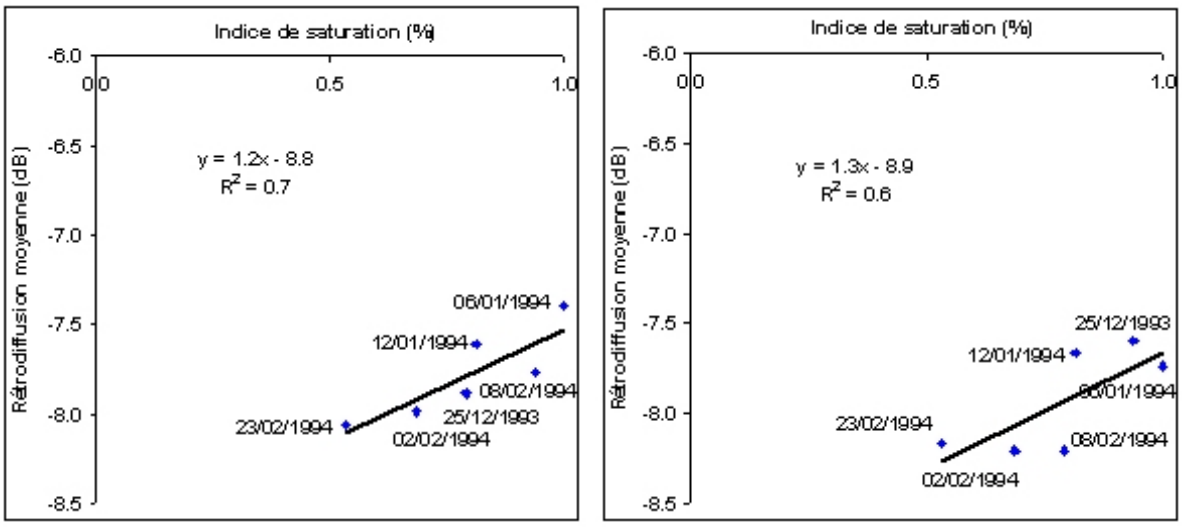
L'utilisation de l'indice de saturation moyen à l'échelle de la zone amont améliore considérablement les résultats précédents, tant sur la valeur de corrélation avec la mesure radar que sur la représentativité de la pente calculée (fig. 4.13). Par rapport aux résultats précédents (cf. §4.3.3.1), les deux relations obtenues sont beaucoup plus proches l'une de l'autre, laissant envisager une estimation globale de l'indice de saturation grâce à la mesure radar. Sur l'ensemble de la zone (fig. 4.13a), le σ_0 et l'indice de saturation présentent une corrélation élevée (R=0.86), meilleure que précédemment (fig. 4.10a). De plus, le test de Student fournit un intervalle de confiance à 95% aux bornes strictement positives, confirmant la vraisemblance de la tendance observée.

De la même façon, sur les surfaces naturelles non inondées (fig. 4.13b), la tendance est confirmée. Par contre, la corrélation relevée entre l'indice et le σ_0 est moins élevée que précédemment (fig.



(a) Hauteurs piézométriques (b) Indice de saturation

FIG. 4.12 – Variations des profondeurs de nappe et de l'indice de saturation sur la période d'étude 1993-1994



(a) Sans distinction d'occupation du sol (b) Surfaces agicoles non inondées

FIG. 4.13 – Relation entre indice de saturation et rétrodiffusion radar sur la zone détude amont

4.10b). Cette dernière observation tend à illustrer le problème de l'échelle de mesure de ces deux paramètres (Fellah *et al.*, 1995). La sélection d'un thème d'occupation du sol particulier réduit l'effet d'intégration, et de lissage, de la mesure radar.

4.3.4.2 Analyse à l'échelle de la parcelle

Le même jeu de parcelles que dans la section précédente est utilisé. La mise en relation de la mesure radar avec l'indice de saturation calculé par station (fig. 4.14), ou l'indice moyen sur la zone, confirme les tendances observées avec les mesures piézométriques brutes (cf. §4.3.3.2 et fig. 4.11).

A cette échelle d'analyse, les intervalles de confiance à 95% obtenus par le test de Student sont globalement positifs. Malgré tout, la valeur nulle est toujours incluse, même si elle se situe ici plutôt dans la limite basse de l'intervalle. Ces évaluations statistiques par le test de Student mettent toutes en évidence qu'il est nécessaire de disposer d'un plus grand nombre de mesures (*i.e.* d'images) pour confirmer complètement les tendances observées.

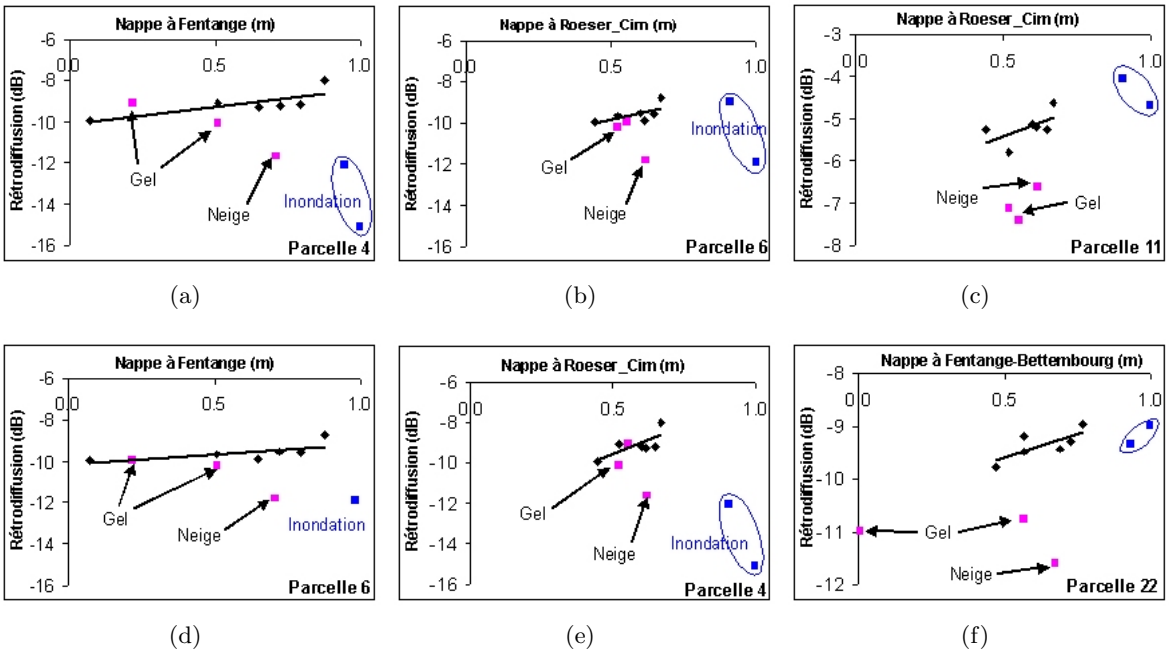


FIG. 4.14 – Relations entre mesure radar et indice de saturation sur les parcelles d'étude

4.3.5 Enseignements de l'approche empirique

L'analyse conjointe du coefficient de rétrodiffusion radar et des variables hydro-météorologiques met en évidence des relations fortes dans le temps et dans l'espace. Les conditions météorologiques, telles que le gel ou la neige, influent considérablement sur l'interaction entre les horizons supérieurs du sol et le signal radar. Les perturbations qu'elles occasionnent nécessitent de porter une attention particulière à ces variables lors de l'exploitation quantitative des images.

Considérée sur une période courte (moins de deux mois d'hiver), les variations de rétrodiffusion radar peuvent être assimilées à des variations de la teneur en eau ou à un changement de son état. L'influence d'autres paramètres, tels que l'occupation du sol ou la rugosité, est pratiquement constante et donc négligeable lorsque l'on s'intéresse aux variations du σ_0. L'antécédent pluviométrique sur 7 jours conditionne en partie le niveau de saturation du bassin, influant sur l'ampleur de la réponse à un apport pluviométrique sur une plus courte durée. Lorsque les sols sont saturés, les apports supplémentaires n'induisent plus de variations de la teneur en eau des sols, formant un palier de la réponse radar. La part du volume d'eau évacuée par ruissellement devient alors prépondérante, provoquant le débordement de la rivière.

La pluviométrie alimentant la nappe alluviale, une relation forte entre sa profondeur et la mesure radar est mise en évidence. L'élévation du toit de la nappe concorde linéairement avec l'augmentation de la rétrodiffusion du signal sur différentes surfaces. Les débordements et les résurgences provoquent une perte de cette linéarité. Si la variable pluviométrique est spatialisable, par le biais de diverses techniques telles que le krigeage ou l'IDW (*Inverse Distance Weighting*), la profondeur du toit de la nappe est beaucoup plus difficile à modéliser à partir de mesures ponctuelles. Pourtant le niveau de la nappe est un des facteurs clefs du déclenchement des inondations dans la plaine de l'Alzette (Pfister *et al.*, 2002b et 2003). L'imagerie radar apparaît capable de donner une vision spatialisée de sa profondeur dans la plaine inondable et ses alentours, en donnant notamment une indication de débordement potentiel.

Les variations temporelles de la réponse radar des surfaces naturelles apparaissent largement contrôlées par la pluviométrie. Sur une courte période d'étude, ces variations sont attribuables aux variations d'humidité dans les premiers centimètres de sol ou, de façon plus générale, au niveau de saturation du bassin. Cette interprétation est renforcée par la prise en compte de l'évolution de la profondeur du toit de la nappe alluviale. Il est cependant important de noter qu'un événement pluvieux isolé peut fortement influencer la réponse radar (Fellah, 1997), sans pour autant modifier le niveau de la nappe ou de saturation du bassin. Ces observations sont par conséquent à rattacher à une pluviométrie bien répartie dans le temps et l'espace, plutôt qu'à des apports intenses et localisés.

Les relations, dont les gammes de paramétrage dépendent du couvert végétal et de la localisation de la parcelle dans la plaine, doivent encore faire l'objet d'une inversion et d'une validation par des mesures de terrain complémentaires. Les tests statistiques illustrent le besoin en données d'imagerie supplémentaires pour couvrir l'évolution de l'état hydrique du bassin sur une année hydrologique.

4.4 Segmentation de la plaine alluviale

Les relations mises en évidence sur plusieurs parcelles de la plaine alluviale, à partir des mesures radar, pluviométriques et piézométriques, suggèrent que différents comportements hydrauliques sont identifiables par l'analyse de l'évolution de la signature radar dans le temps. La série temporelle est ainsi mise à profit pour caractériser et localiser des zones hydrauliques homogènes, et ainsi segmenter la plaine alluviale. La série d'images de 1993-1994, sauf les trois images identifiées comme inexploitables (cf. §4.3.1), est étudiée par le biais d'analyses statistiques.

La méthode de segmentation est fondée sur une analyse en composantes principales, couplée à un algorithme de classification. Elle est appliquée à la série temporelle d'images radar, sur la zone du Roeserbann, selon deux échelles d'étude : la plaine alluviale, puis le champ d'inondation maximal observé pour les crues de 1993 et 1994. Enfin, une analyse de sensibilité est proposée pour évaluer la stabilité et la pertinence des comportements identifiés.

4.4.1 Méthode de segmentation

Verhoest *et al.* (1997, 1998) présentent une méthode fondée sur une analyse en composantes principales (ACP) de séries temporelles, où la première et la troisième composantes sont principalement influencées par les effets topographiques de l'acquisition radar et l'occupation du sol. La seconde composante est dominée par la distribution de l'humidité du sol, résultante des capacités de drainage du bassin. Cette approche est menée sur l'ensemble du bassin du Zwalmbeek (Belgique), impliquant de fait une variabilité importante du relief et du paysage.

Richards (1984) montre plus généralement avec des données optiques multispectrales que les éléments stationnaires des images se retrouvent dans les premières composantes alors que les changements sont relégués aux dernières composantes. Dans une analyse similaire menée sur des données radar, Henebry (1997) montre que la première composante est dominée par les éléments stables du paysage (la moyenne temporelle de la série en quelque sorte) alors que la troisième composante fait ressortir les différences d'angles d'incidence. Gong (1993) met en évidence les limitations de la combinaison par ACP d'images radar calibrées, et notamment que le rapport de surface entre les zones de changements et les zones stables doit être faible. Il souligne aussi la difficulté de distinguer ces changements du bruit dans les dernières composantes et suggère d'utiliser des images illustrant le changement (ratio, différence). Cette approche a été testée avec succès par Moisan *et al.* (1999) sur des données PRI d'ERS-1.

L'intérêt principal de l'ACP est de synthétiser l'information contenue dans différentes images en un nombre réduit de facteurs, en maximisant leur variance (Lebart *et al.*, 1997). Compte tenu des recommandations de Gong (1993), des résultats de Henebry (1997) et de Verhoest *et al.* (1998), il est apparu nécessaire de restreindre l'échelle d'analyse en réalisant le calcul des composantes principales sur des reliefs modérés et homogènes, et des occupations du sol stables du fait de la fréquence élevée d'acquisition des images au cours de la période 1993-94.

L'analyse en composantes principales est menée sur deux échelles d'étude différentes : l'ensemble de la plaine alluviale du Roeserbann, puis l'extension maximale des inondations observées sur la période. Pour chacune de ces deux échelles d'étude, les résultats de l'ACP sont interprétés par rapport aux coordonnées des différents vecteurs propres, de leurs gammes de variations et de la connaissance du fonctionnement de la zone. Appliqué aux premiers facteurs, l'algorithme de classification par nuées dynamiques (Lebart *et al.*, 1997) permet de dégager des classes homogènes, qui sont validées à partir des résultats obtenus par l'approche empirique précédente.

4.4.2 Echelle de la plaine alluviale

Cette première analyse traite l'ensemble de la plaine alluviale, incorporant différents types de surfaces : agricoles, prairies, urbaines. L'interprétation des composantes permet d'identifier des classes de comportements, validées par l'exploitation des variables hydro-météorologiques de la base de données.

4.4.2.1 Interprétation des composantes principales

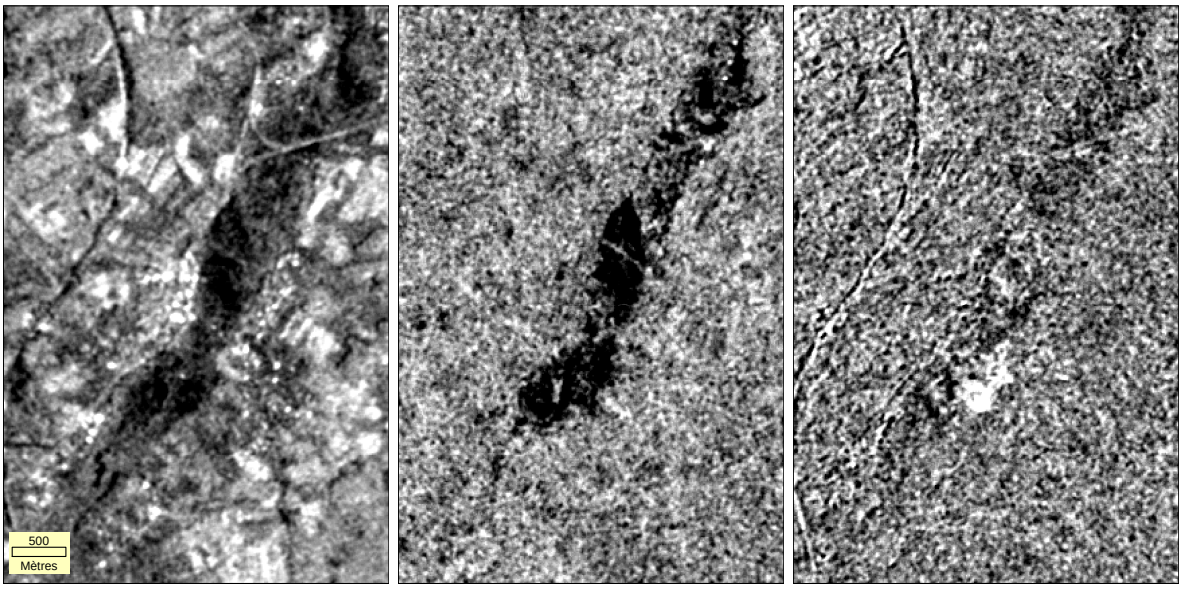
L'analyse menée sur les données de 1993-1994, sur la partie amont du bassin de l'Alzette, permet des interprétations sensiblement différentes de celles proposées par Verhoest *et al.* (1998). Trois composantes sont extraites, et elles apparaissent plus influencées par les conditions de submersion. Les calculs d'inertie de ces trois composantes montrent que la première représente 70% de la variance, la seconde 12% et la troisième 7%. Ainsi, près de 90% de l'information contenue dans la série des 6 images utilisables est résumée dans ces trois composantes.

Date	CP1	CP2	CP3
25/12/93	0.440	0.110	0.869
06/01/94	0.604	0.698	-0.377
12/01/94	0.334	-0.352	-0.018
02/02/94	0.357	-0.376	-0.022
08/02/94	0.332	-0.361	-0.273
23/02/94	0.304	-0.324	-0.167

Tab. 4.3 – Coordonnées des trois premières composantes principales sur la plaine alluviale

La représentation graphique de ces trois composantes, séparément (fig. 4.15) ou en composition colorée, permet d'en proposer une interprétation. L'expérience de terrain est alors largement exploitée pour différencier les zones soumises aux résurgences tout au long de l'hiver des zones inondées par débordement et les localiser précisément.

Les surfaces en eau induisent une réponse radar très basse. Ainsi, la première composante résultant de l'ACP sur ces 6 images apparaît majoritairement influencée par la présence d'eau libre en surface. Les contributions des dates où ne sont observées que des résurgences sont très équivalentes, alors qu'elles sont plus élevées lors des débordements les 25/12 et 06/01. Ainsi, une



(a) CP1 (b) CP2 (c) CP3

FIG. 4.15 – Composantes principales extraites de la série temporelle 1993-94

cartographie précise du contour maximal des inondations observées est possible. Ce comportement particulier de la première composante est d'ailleurs confirmé dans les zones de résurgences par les mesures de terrain.

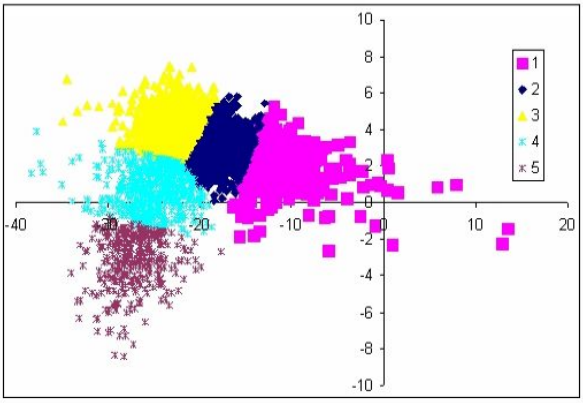
La deuxième composante traduit la variabilité temporelle des zones inondées. Ainsi, elle permet de discriminer les zones inondées par débordement, dont l'extension varie rapidement d'une image à l'autre, des zones sujettes aux résurgences de nappes. Cela se traduit notamment par une forte opposition entre le 06/01 et les dates suivantes. Ces résurgences sont persistantes sur une majorité d'images de la série, et leur extension varie relativement peu. L'identification de ces surfaces constitue un moyen simple d'évaluer l'état de saturation du bassin.

Finalement, la troisième composante semble être essentiellement influencée par la capacité de drainage du sol. Elle est liée autant à la présence d'eau en surface qu'à la nature de l'inondation, débordement ou résurgence. Même si elle apparaît plus ou moins redondante aux deux autres composantes, elle offre une vision différente du comportement de la plaine alluviale.

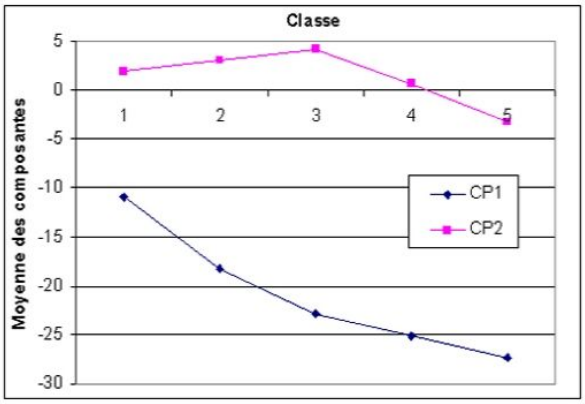
4.4.2.2 Identification de classes de comportements

L'identification de classes de comportements hydrauliques dans la plaine alluviale est réalisée à partir des interprétations des composantes principales, complétées par l'analyse des valeurs de rétrodiffusion. Si la première composante indique la présence d'eau sur la zone durant la période d'étude, la seconde composante apparaît comme la plus discriminante pour en déterminer l'origine. La classification est effectuée à deux échelles spatiales, à partir d'un maillage régulier de 50×50 m : la plaine alluviale et l'extension maximale du champ d'inondation.

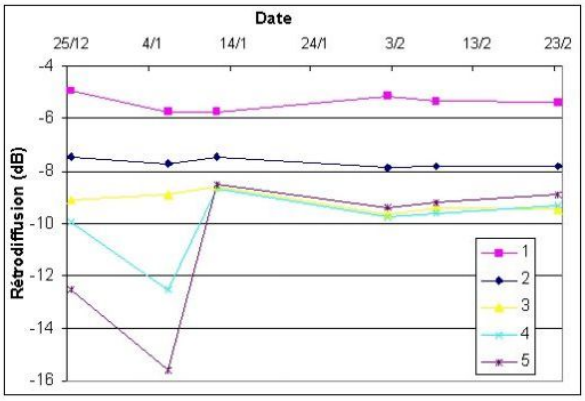
Le processus de classification est effectué à partir des moyennes des composantes par l'algorithme des nuées dynamiques, ou *k-means*. Appliqué aux première et deuxième composantes, il permet de dégager 5 classes aux comportements suffisamment distincts(fig. 4.16), indexées *al* par la suite.



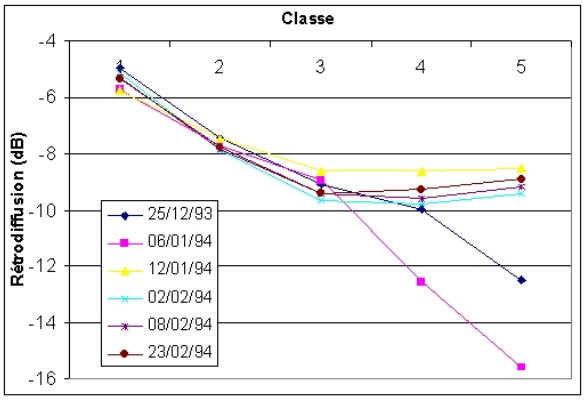
(a) Identification des classes dans le nuage de points des composantes 1 et 2



(b) Dynamique des deux premières composantes dans les cinq classes



(c) Evolution temporelle des signatures moyennes des classes



(d) Signatures moyennes des classes pour chaque acquisition

FIG. 4.16 – Classes de comportements identifiées dans la plaine alluviale à partir des deux premières composantes

Le nuage de points formé par les première et deuxième composantes principales (fig. 4.16a) présente une forme dissymétrique. Une majorité des points sont situés dans la région où CP2 est positive, pour des valeurs décroissantes de CP1 (fig. 4.16b). L'analyse des signatures moyennes par classe et par date montre que les classes 4_{al} et 5_{al} caractérisent des parcelles inondées le 25/12/93 et/ou 06/01/94 (fig. 4.16c). Les trois autres classes sont situées à l'extérieur du champ d'inondation, sur divers thèmes d'occupation du sol stables dans le temps (fig. 4.16d).

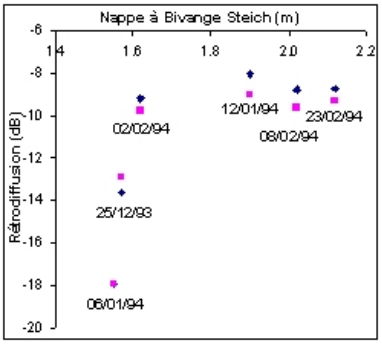
Du point de vue géographique, les classes 4_{al} et 5_{al} donnent une extension très comparable au champ d'inondation maximal observé (fig. C.2). Par contre, les classes 1_{al} et 2_{al} sont situées exclusivement hors de la zone inondée pendant la période d'étude. Elles intègrent des surfaces naturelles et bâties. La classe 3_{al} semble d'une définition plus confuse. Elle englobe des surfaces dans et hors de la zone inondable, notamment la zone proche de la voie ferrée qui est connue pour être régulièrement inondée pendant l'hiver. Il est fort probable que les dimensions spatiales réduites de ce phénomène ne permettent pas de l'isoler à l'échelle d'analyse retenue.

Le nuage de points des CP1 et 2 (fig. 4.16a) combine les réponses de différentes surfaces, dont certaines sont soumises à une submersion pendant la durée d'observation. Les classes dégagées à l'extérieur de la zone inondée viennent en quelque sorte parasiter la classification des comportements. Cela suggère l'utilité de changer la définition géographique de la zone à caractériser. La zone est alors réduite au champ d'inondation maximal observé sur la série

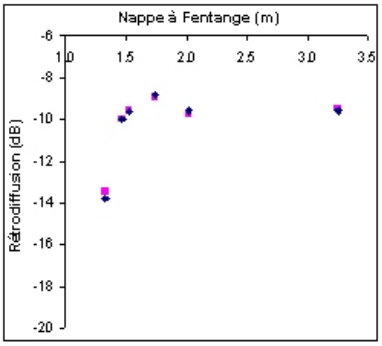
d'images ERS afin d'identifier des zones directement soumises aux comportements hydrauliques de la rivière et de la nappe alluviale.

4.4.2.3 Validation des classes de comportement

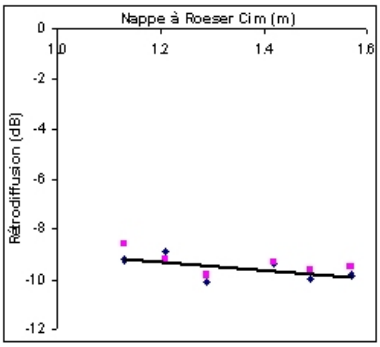
La corrélation entre les hauteurs de nappe mesurées aux stations piézométriques et le coefficient de rétrodiffusion varie sensiblement selon les classes obtenues par combinaison des première et deuxième composantes. La pertinence de la segmentation opérée est évaluée par une analyse de l'évolution conjointe de la signature radar sur des parcelles classées et de la profondeur de nappe au piézomètre le plus proche (fig. 4.17). Les dates d'acquisition ne sont indiquées que sur le premier graphique, mais l'ordre est inchangé quelle que soit la classe et la station piézométrique.



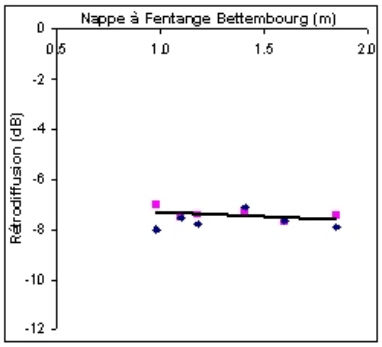
(a) Classe 5_{al}



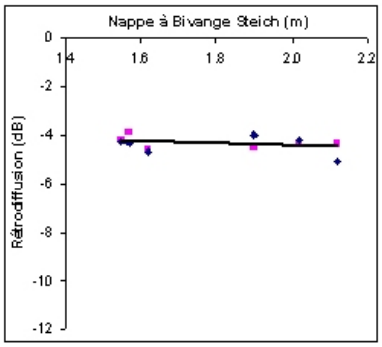
(b) Classe 4_{al}



(c) Classe 3_{al}



(d) Classe 2_{al}



(e) Classe 1_{al}

FIG. 4.17 – Signatures radar de parcelles classées dans la plaine alluviale (2 par classe) et réponses piézométriques correspondantes

Cette analyse met en évidence cinq comportements bien distincts, qui peuvent être interprétés à partir des résultats de la section 4.3.3 et qui confirment les interprétations précédentes :
- dans la classe 5_{al}, les deux débordements et les résurgences provoquent une rupture de la relation linéaire entre l'élévation du toit de la nappe et l'augmentation du σ_0,
- comme pour la classe 4_{al}, où la rupture est moins prononcée et met seulement en évidence l'inondation la plus forte du 06/01/94,
- et les classes 3_{al}, 2_{al} et 1_{al} qui ne sont pas touchées par les débordements et présentent des relations linéaires, dont la position verticale est déterminée par le niveau de saturation des parcelles et par la proportion de sols, de surfaces artificielles et de végétation qui s'y trouvent.

Le comportement des classes 3_{al}, 2_{al} et 1_{al} confirment l'utilité du changement d'échelle d'analyse et le passage à l'extension maximale de l'inondation plutôt que l'ensemble de la plaine alluviale. La même vérification est reproduite sur les trois classes obtenues à cette échelle.

4.4.3 Echelle du champ d'inondation

La même analyse que précédemment est réalisée en ne considérant que les zones soumises à une submersion pendant la durée de l'étude. L'algorithme des nuées dynamiques permet finalement d'identifier trois classes, indexées *in*, affinant le résulat précédent.

4.4.3.1 Interprétation des composantes principales

Les trois premières composantes extraites à l'échelle du champ d'inondation maximal regroupent 80% de la variance totale dont 38% pour la première, 22% pour la seconde et 20% pour la troisième (tab. 4.4). Dans la précédente analyse, le premier facteur fournit l'essentiel de l'information et le second discrimine deux comportements caratéristiques. Ici, si le premier facteur contient également une grande part de l'information de la série temporelle, les deux facteurs suivants ont des contributions équivalentes et doivent être pris en compte dans la définition des classes.

Date	CP1	CP2	CP3
25/12/93	0.740	0.658	0.018
06/01/94	0.596	-0.642	-0.476
08/01/94	0.201	-0.144	0.458
02/02/94	0.175	-0.187	0.527
08/02/94	0.160	-0.211	0.488
23/02/94	0.040	-0.232	0.215

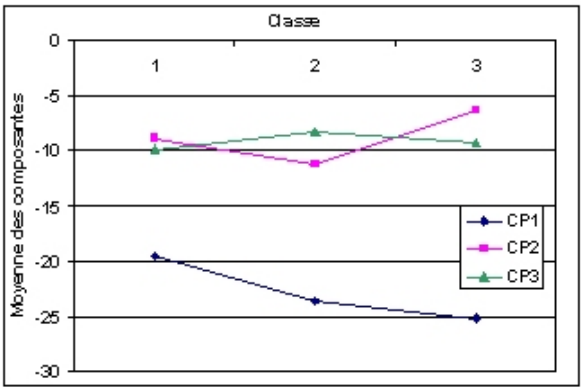
Tab. 4.4 – Coordonnées des trois premières composantes principales sur le champ d'inondation

Les contributions des différentes acquisitions au premier facteur sont homologues à celles obtenues précédemment (tab. 4.3). Les deux dates soumises aux inondations par débordement se détachent des autres contributions. De même qu'elles se détachent encore plus nettement sur les deuxième et troisième facteurs. La CP2 oppose le 25/12/93 aux autres dates, et la CP3 isole complètement l'acquisition du 06/01/94.

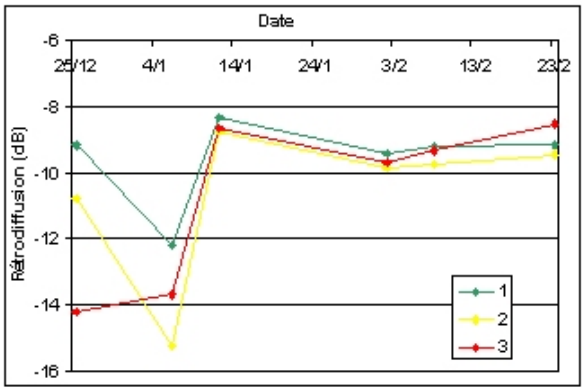
4.4.3.2 Identification des classes de comportement

L'analyse des signatures moyennes des deux premières composantes permet de donner une indication quantitative aux clefs d'interprétation élaborées précédemment (cf. §4.4.2.1). Chacune des trois classes caractérise une combinaison des valeurs discriminantes des trois CP (fig. 4.18). Ainsi, la classe 1_{in} regroupe des zones inondées une seule fois (le 06/01/94) essentiellement par débordement. La classe 2_{in} est plutôt mixte. La classe 3_{in} identifie les zones inondées plus d'une fois, intégrant les débordements observés. Entre ces classes, les seconde et troisième composantes ressortent comme discriminantes.

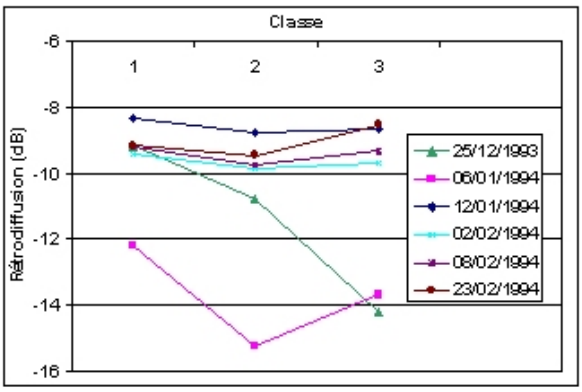
Du point de vue géographique, ces trois classes fournissent un découpage un peu différent de celui proposé par les classes 4_{al} et 5_{al} de la segmentation précédente (fig. C.2). La classe 1_{in} présente une forte dynamique : inondée seulement le 06/01/94, lors de l'inondation la plus importante, elle revient rapidement à son état de saturation initial. Elle est peu affectée par les résurgences observées le 02/02/94. Par contre, la classe 2_{in} présente un comportement moins tranché : elle est partiellement inondée le 25/12/93 et semble se ressuyer moins vite que les deux autres classes. Elle intègre plutôt des zones soumises aux résurgences, *i.e.* des submersions persistentes dans le temps. On notera d'ailleurs que l'effet des résurgences, notamment le 02/02/94, est très peu marqué sur le comportement dynamique des classes extraites de l'analyse à l'échelle de la plaine alluviale.



(a) Dynamique des deux premières composantes dans les trois classes



(b) Evolution temporelle des signatures moyennes des classes

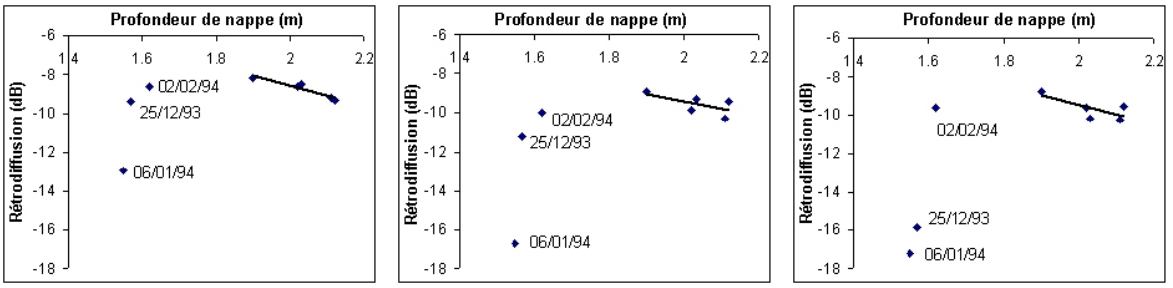


(c) Signatures moyennes des classes pour chaque acquisition

FIG. 4.18 – Classes de comportements identifiées dans le champ d'inondation à partir des deux premières composantes

4.4.3.3 Validation des classes de comportements

La réalité des classes dégagées est évaluée comme dans la section précédente, en s'intéressant aux variations de rétrodiffusion et de hauteur piézométrique. Chacune des classes présente un comportement bien spécifique par rapport aux différents piézomètres de la zone (fig. 4.19).



(a) Classe 1_{in} (b) Classe 2_{in} (c) Classe 3_{in}

FIG. 4.19 – Signatures radar de parcelles classées dans l'extension maximale du champ d'inondation et réponses piézométriques correspondantes à la station de Bivange-Steich

La même allure de courbe est obtenue pour chacune de ces trois classes, comme pour les classes précédentes 4_{al} et 5_{al}. Le palier provoqué par la saturation (fig. 2.11), avant la chute de rétrodiffusion, apparaît implicitement dans l'allure générale de la courbe mais sa position n'est pas clairement observée. La montée en saturation est sensiblement équivalente d'une classe à l'autre. Elles ne se distinguent finalement que par les réponses engendrées par les différents niveaux de submersion :

- les zones complètement inondées par les débordements des 25/12 et 06/01 sont regroupées dans la classe 3_{in},
- la submersion est partielle le 25/12 dans la classe 2_{in} et le 06/01 dans la classe 1_{in}.

Deux éléments supplémentaires méritent enfin d'être soulignés. Tout d'abord, sur les trois représentations de la figure 4.19, les mesures du 02/02 positionnent le début de la décroissance du signal suite à l'apparition de l'eau en surface. La zone d'étude étant ici plus restreinte géographiquement que précédemment, avec une présence généralisée de prairies, le palier de saturation peut être localisée à environ -8.5 dB.

Ensuite, l'évolution des moyennes de chaque classe (fig. 4.18b) apparaît très représentative des évolutions individuelles des différentes parcelles (fig. 4.19). Le raisonnement utilisé pour l'étude de la relation entre le coefficient de rétrodiffusion et la profondeur moyenne de la nappe (cf. §4.3.3.1) semble donc reproductible pour chacune des trois classes. En ne considérant pas les dates où l'eau est observée en surface, *i.e.* lorsque le comportement du σ_0 demeure linéaire, on obtient une augmentation moyenne de la rétrodiffusion radar de 1.5±0.3 dB.m^{-1}, jusqu'au seuil de -8.5 dB où la linéarité est perdue.

4.4.4 Sensibilité de l'analyse

Les composantes principales extraites des 6 images de la série montrent de bonnes aptitudes à identifier des comportements hydrauliques homogènes. Cependant, la nature statistique de cette méthode d'analyse implique une forte dépendance du résultat aux données d'entrée. Le propos de cette analyse de sensibilité est de vérifier la stabilité des composantes extraites, et des interprétations qui en découlent, afin de définir précisément le cadre d'application de cette méthode. L'indicateur principal recherché est l'effet de l'ajout ou de la suppression d'une image dans la série analysée sur les valeurs propres obtenues, les valeurs de corrélation... L'analyse est réalisée à l'échelle du champ d'inondation par augmentation progressive du nombre d'images soumises à l'ACP, en commençant dans un premier temps par la première image (ACP incrémentale) puis dans un second temps, par la dernière image (ACP décrémentale).

L'ACP incrémentale (tab. 4.5 et fig. 4.20) illustre la très forte influence des deux dates soumises aux débordements. Quel que soit le nombre d'images prises en compte dans le calcul, les composantes des vecteurs propres affichent des contributions très stables pour le 25/12/93 et le 06/01/94. Plus précisément, on peut noter dès le second calcul (tab. 4.5b) que la première composante isole ces deux premières dates des suivantes. La seconde composante les différencie de la même façon, malgré une inversion des corrélations entre les variables et les facteurs lors du dernier calcul (tab. 4.5e).

Réalisée en sens inverse (tab. 4.6 et fig. 4.21), à partir de la dernière image, l'influence des deux dates soumises aux débordements est à nouveau mise clairement en évidence. Les trois premiers calculs (tab. 4.6a, b, c) fournissent des valeurs stables pour CP1 et CP2, qui opposent alors le 23/02/94 (situation sèche) aux autres dates. Cette différence est drastiquement réduite dès l'intégration de l'image du 06/01/94. Les deux derniers calculs (tab. 4.6d, e) rétablissent la discrimination entre les deux premières acquisitions et les suivantes.

(a) 2 images

	25/12/1993	06/01/1994
CP1	0.854	0.712
CP2	-0.521	0.702

(b) 3 images

	25/12/1993	06/01/1994	12/01/1994
CP1	0.852	0.709	0.279
CP2	-0.519	0.703	-0.015
CP3	-0.074	-0.053	0.960

(c) 4 images

	25/12/1993	06/01/1994	12/01/1994	02/02/1994
CP1	0.845	0.704	0.322	0.257
CP2	-0.519	0.703	-0.014	0.005
CP3	-0.125	-0.100	0.776	0.825

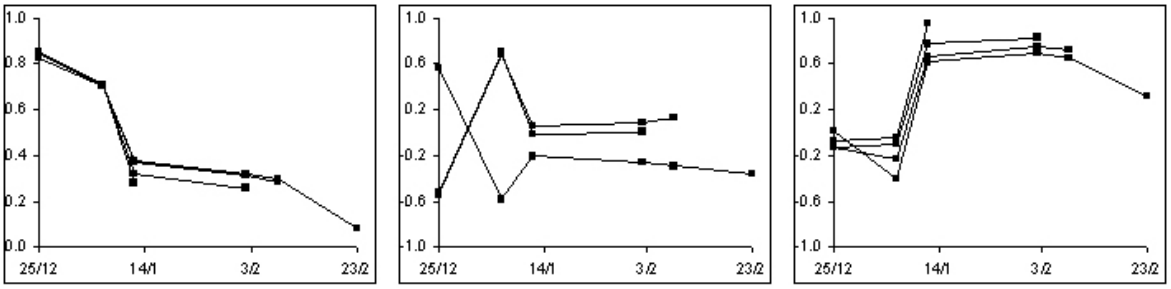
(d) 5 images

	25/12/1993	06/01/1994	12/01/1994	02/02/1994	08/02/1994
CP1	0.829	0.700	0.366	0.312	0.286
CP2	-0.544	0.674	0.057	0.087	0.134
CP3	-0.125	-0.235	0.666	0.754	0.717

(e) 6 images

	25/12/1993	06/01/1994	12/01/1994	02/02/1994	08/02/1994	23/02/1994
CP1	0.824	0.703	0.373	0.320	0.293	0.080
CP2	0.563	-0.582	-0.206	-0.264	-0.297	-0.362
CP3	0.014	-0.406	0.615	0.698	0.648	0.314

TAB. 4.5 – Corrélation entre les facteurs et les variables pour l'ACP incrémentale



(a) CP1 (b) CP2 (c) CP3

FIG. 4.20 – Premières composantes de l'ACP incrémentale

Cette analyse montre que les premiers facteurs sont fortement influencés lorsque les zones de grandes variations occupent une large proportion dans les images soumises à l'ACP (≈20% à l'échelle de la plaine alluviale). Cette observation permet de compléter les recommandations de Gong (1993) ou de Fung et Ledrew (1987). Elle met aussi en évidence une stabilité des identifications de comportements : les différentes situations sont caractérisées par des valeurs et des oppositions nettes sur les deux premières composantes. Ainsi, à incidence constante et paramètres de surface (rugosité, occupation du sol) stables, l'analyse en composantes principales fait très clairement ressortir l'évolution de l'état hydrique de la zone d'étude et permet d'identifier des comportements hydrauliques précis.

(a) 2 images

	08/02/1994	23/02/1994
CP1	0.894	0.629
CP2	-0.449	0.778

(b) 3 images

	02/02/1994	08/02/1994	23/02/1994
CP1	0.831	0.823	0.488
CP2	-0.183	-0.239	0.872
CP3	0.526	-0.515	-0.037

(c) 4 images

	12/01/1994	02/02/1994	08/02/1994	23/02/1994
CP1	0.747	0.810	0.769	0.423
CP2	-0.262	-0.094	-0.055	0.893
CP3	-0.523	-0.008	0.568	-0.141

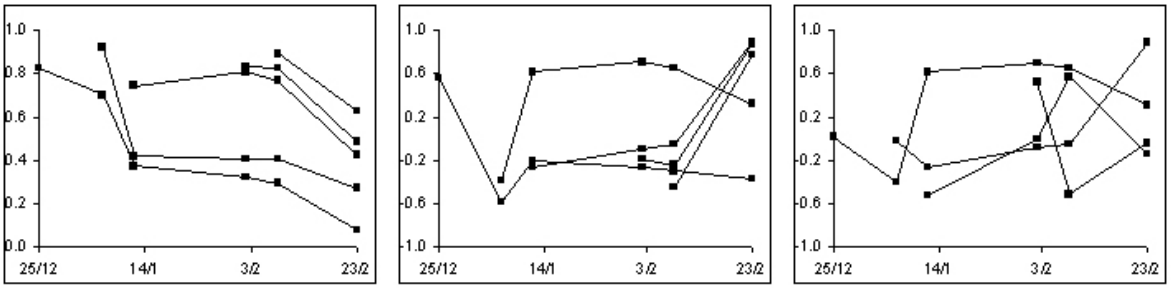
(d) 5 images

	06/01/1994	12/01/1994	02/02/1994	08/02/1994	23/02/1994
CP1	0.918	0.419	0.408	0.407	0.271
CP2	-0.395	0.618	0.702	0.654	0.323
CP3	-0.016	-0.264	-0.086	-0.049	0.893

(e) 6 images

	25/12/1993	06/01/1994	12/01/1994	02/02/1994	08/02/1994	23/02/1994
CP1	0.824	0.703	0.373	0.320	0.293	0.080
CP2	0.563	-0.582	-0.206	-0.264	-0.297	-0.362
CP3	0.014	-0.406	0.615	0.698	0.648	0.314

TAB. 4.6 – Corrélation entre les facteurs et les variables pour l'ACP décrémentale



(a) CP1 (b) CP2 (c) CP3

FIG. 4.21 – Premières composantes de l'ACP décrémentale

4.4.5 Enseignements de la segmentation statistique

La section précédente a montré que des relations partiellement linéaires existaient entre les variables hydro-météorologiques et la mesure de rétrodiffusion radar sur des parcelles identifées manuellement et possédant différentes caractéristiques, géographiques et/ou thématiques. Ces résultats illustrent l'évolution temporelle du signal radar liée à l'état hydrique des surfaces, qu'elles soient inondées ou pas pendant la période d'étude. Cette évolution est accessible par le biais d'analyses statistiques classiques. En simplifiant l'exploitation de séries d'images, les méthodes de réduction des données (ACP) et de classement (*k-means*) mettent en évidence des comportements à l'échelle du pixel ou de la cellule d'analyse.

Les classes identifiées à partir des premiers facteurs de l'ACP présentent des réponses caractéristiques lorsqu'elles sont inondées par débordement et/ou par résurgence. De même, la proportion de surfaces végétales (impliquant une diffusion en volume et un abaissement de la valeur moyenne de rétrodiffusion), de sols et de surfaces urbanisées (impliquant des réflexions multiples soit une amplification du signal et une augmentation de la valeur moyenne de la rétrodiffusion) influe directement sur la position verticale de la relation linéaire. Les relations établies dans les parcelles du champ d'inondation fournissent une bonne description de la saturation puis de la chute progressive de rétrodiffusion avec l'augmentation de surface en eau. La validation des interprétations proposées pour chaque classe consiste à confronter la mesure radar, l'information source, aux variables hydro-météorologiques. Cette étape montre que la combinaison ACP/Classification permet d'identifier de façon généralisée les zones à comportement hydraulique homogène.

Cette identification est néanmoins conditionnée par les images prises en compte dans le calcul. Cette méthode est contrôlée par les statistiques des images. Le nombre d'images et l'emprise d'étude revêt une grande importance lorsqu'il s'agit de faire ressortir les variations temporelles du coefficient de rétrodiffusion. L'analyse de sensibilité de la méthode montre qu'il est absolument nécessaire de disposer d'images couvrant l'ensemble des processus recherchés. L'extraction de classes par ACP/Classification ne fait que synthétiser et mettre en évidence une information contenue dans le signal et son évolution spatio-temporelle.

4.5 Validation croisée des méthodes de cartographie

Cette dernière section expose les principes méthodologiques généraux de validation et de calage des modèles de propagation de crues. Les travaux de développement et d'exploitation de la méthode sont actuellement en cours de réalisation. La démarche consiste à utiliser le maximum d'informations disponibles sur un ou plusieurs événements pour améliorer la qualité des prédictions des modèles.

La confrontation de l'extension observée de l'inondation à l'extension modélisée permet d'évaluer d'une part la qualité du calage du modèle, et d'autre part la vraisemblance de l'observation. Menés par le CRP-GL, les travaux en cours sont limités aux deux événements de 1999 et 2003, pour lesquels les observations de débits sont disponibles. Lors de ces deux événements, et contrairement à la période 1993-1994, la totalité du réseau de mesure limnimétrique est opérationnel. De plus, une campagne de levés de terrain par GPS, réalisée en 2003, valide le champ d'inondation modélisé et le champ extrait de l'image ASAR d'ENVISAT, acquise pendant le maximum de la crue.

Deux familles de modèles hydrauliques sont utilisées, selon la zone étudiée. A l'amont, dans la zone du Roeserbann, la configuration de la plaine alluviale impose l'emploi d'un modèle 2-D à casiers (FLDPLN décrit par Metzger *et al.*, 1999). En effet, suite au débordement, l'eau s'écoule dans des directions quelconques et plus selon une direction parallèle à l'axe principal de la rivière. Plus proche de la réalité, ce type de modèle est également beaucoup plus lourd à mettre en œuvre, notamment en temps de calcul. Par contre, en aval de Luxembourg Ville, un modèle 1-D (HEC-RAS décrit par USACE, 2002a et b) plus simple est utlisé. Fondé sur des hypothèses plus fortes quant à la nature des écoulements, ce type de modèle dispose d'une grande rapidité d'exécution, facilite la réalisation de nombreuses simulations et autorise une étude statistique pertinente des incertitudes.

La méthodologie de validation, en cours d'élaboration et d'exploitation, tire profit de l'ensemble des outils et données disponibles pour améliorer le calage des modèles. Elle est divisée en quatre étapes principales :

- calage “traditionnel” fondé sur des observations de variables hydrauliques ou du champ d’inondation,
- évaluation des incertitudes du modèle en testant un très grand nombre de jeux de paramètres,
- prise en compte de l’incertitude sur la délimitation du champ d’inondation avec l’imagerie radar,
- réduction des incertitudes en utilisant toutes les sources de données disponibles sur un ou plusieurs événements.

Au moyen de fonctions objectif (Xiong et O’Connor, 2000), visant à minimiser l’écart entre les grandeurs observées et les grandeurs simulées (hauteurs d’eau, débits, extension de l’inondation...), le paramétrage des modèles est ajusté. Compte tenu des éléments précédents, seul le modèle 1-D est étudié et le calage n’est effectué que sur les coefficients de rugosité (de Manning) de la plaine et du canal (Aronica *et al.*, 1998). Cette première approche suppose que les données de contrôle (mesures *in situ* ou images radar) sont tout à fait fiables et que les autres paramètres du modèle ont une influence négligeable. Ainsi, ses résultats pourront être généralisés.

L’estimation des incertitudes internes du modèle est fondée sur la méthode GLUE (*Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*) proposée par Beven et Binley (1992). Grâce à un très grand nombre de simulations (méthode de Monte Carlo), l’interdépendance des paramètres est évaluée pour un niveau de performance donné. Ainsi, à l’issue de la procédure, le modèle dispose d’un ensemble de solutions satisfaisantes, dont la vraisemblance avec les données de contrôle doit être mesurée (Beven, 1993 ; Beven et Freer, 2001). Sur ce sujet, Franks *et al.* (1998) présentent différents opérateurs fondés sur l’équation de Bayes. Si l’étape précédente visait à définir un jeu de paramètres optimal du modèle en fonction des données de contrôle, cette approche fournit plutôt des intervalles de confiance dans lesquels se trouvent les paramètres (Freer *et al.*, 2004).

La question de la délimitation de l’extension des inondations avec l’imagerie radar fait l’objet du chapitre suivant selon une problématique plutôt orientée vers la cartographie rapide. Du fait de la résolution spatiale, la transition radiométrique entre les zones inondées et non inondées se fait de façon continue. La surface extraite par seuillage est donc fortement conditionnée par la valeur de ce seuil. L’information obtenue de l’imagerie radar ne peut, dans une optique de calage d’un modèle, être limitée à une information binaire (présence/absence d’eau). Trois classes de probabilité de submersion sont définies pour être intégrées dans un système à logique floue (Ross, 1995 ; Blazkova et Beven, 2002) fournissant pour chaque paramètre des intervalles de confiance, fonctions de la classe et de la taille du pixel. Par rapport à l’étape précédente, l’incertitude des données de terrain est explicitement prise en compte.

La dernière étape de réduction des incertitudes revient à combiner les deux approches précédentes au sein de la méthode GLUE. Elle consiste à exploiter toutes les sources d’information disponibles sur le fonctionnement du bassin d’étude comme des images radar, des hauteurs d’eau, des relevés GPS sur un ou plusieurs événements. Plus le nombre d’observations sera important, plus le nombre de jeux de paramètres fournissant un niveau de performance acceptable pour l’ensemble des grandeurs mesurées sera réduit. Ainsi, en réduisant le nombre et la gamme de variation des différents paramètres, on réduit parallèlement les incertitudes du modèle. Un tel résultat permet ensuite d’exploiter le modèle en interpolation, *i.e.* en prévision ou en simulation.

4.6 Conclusions

Les apports de l’imagerie spatiale pour la modélisation sont abordés sur le bassin de l’Alzette, situé dans le Grand-Duché du Luxembourg. La configuration morphologique, les équipements, les modèles, les bases de données et les connaissances disponibles sur ce bassin en font un site

privilégié pour le développement de méthodes d'assimilation des données spatiales. Plusieurs événements hydrologiques importants sont couverts par des données spatiales radar et des mesures de terrain de toutes sortes.

L'analyse de l'évolution du signal radar à différentes échelles montre une bonne corrélation avec les variables hydro-météorologiques. Grâce à une série d'images acquises sur un laps de temps court, les effets d'autres paramètres que la teneur en eau sont stables et peuvent donc être négligés dans une approche dynamique. A l'échelle de la zone d'étude du Roeserbann comme à l'échelle de parcelles homogènes, la réponse radar apparaît fortement contrôlée par la pluviométrie. Cette relation se retrouve, dans une certaine mesure, avec les niveaux piézométriques de la nappe alluviale mais surtout avec l'indice de saturation. L'effet du gel des surfaces est mis en évidence sur trois images de la série temporelle, exclues de ce fait de la mesure quantitative. Finalement, les relations empiriques établies illustrent l'effet de la teneur en eau des sols sur le comportement du signal radar, tendant à confirmer sa capacité à proposer une évaluation spatialisée du niveau de saturation, même si les évaluations statistiques encouragent l'intégration d'images supplémentaires pour conforter les interprétations.

Compte tenu des observations de l'approche empirique, une segmentation de la plaine alluviale est engagée sur la base de l'évolution temporelle de la signature radar. La méthode statistique de l'analyse en composantes principales est choisie pour synthétiser l'information contenue dans la série d'images. A l'échelle de la plaine alluviale, comme à l'échelle du champ d'inondation, les premiers facteurs fournissent une information hydraulique pertinente sur la dynamique temporelle et spatiale des zones inondées. L'algorithme de classification exploite les variations combinées des deux premiers facteurs pour la plaine alluviale, des trois premiers pour le champ d'inondation. Finalement, l'information sur la teneur en eau des sols contenue dans chaque image et synthétisée dans les premiers facteurs de l'ACP permet d'isoler systématiquement et globalement des classes de comportement hydraulique caractéristiques de la plaine alluviale. L'analyse de sensibilité met en avant à la fois les exigences de cette méthode statistique d'extraction d'informations et son appréciable stabilité dans l'identification des comportements.

Une méthode de calage des paramètres des modèles hydrauliques est élaborée et est en cours de test. Elle exploite toutes les données disponibles sur différents événements : mesures *in situ* (hauteurs, débits, extension du champ d'inondation), limitées dans l'espace mais précises, et cartographie issue de l'imagerie radar, moins précise mais à plus large couverture spatiale. Fondée sur la méthode GLUE d'évaluation des incertitudes, elle vise à quantifier l'interdépendance des différents paramètres du modèle tout en prenant en compte la précision des données de contrôle, qu'elles proviennent du terrain ou de l'imagerie. L'information spatialisée de l'extension du champ d'inondation occupe une place majeure dans ce processus, fournissant une vision globale et instantanée de l'événement.

Si l'information cartographique sur l'étendue de l'inondation est capitale en phase de prévision pour le calage des modèles hydrauliques, elle est au moins aussi importante en période de crise pour être utilisée comme outil d'aide à la décision. Le nouveau capteur ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), embarqué sur le satellite ENVISAT, dispose de nouvelles capacités de cartographie notamment avec ses possiblités d'acquisition multi-incidence, multi-polarisation et multi-résolution. Le chapitre suivant est centré sur cette question de l'exploitation de ces capacités pour déterminer l'extension de l'inondation, qu'elle soit utilisée en prévision ou gestion de la crise.

4.7 Bibliographie

Aronica G., Hankin B., Beven K.J., 1998, Uncertainty and equifinality in calibrating distributed roughness coefficients in a flood propagation model with limited data, *Advances in Water Resources*, Vol. 22 (4), 349-365.

Beldring S., Gottschalk L., Seibert J., Tallaksen L.M., 1999, Distribution of soil moisture and groundwater levels at patch and catchment scales, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 98-99, 305-324.

Beven K.J., Freer J., 2001, Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology, *Journal of Hydrology*, Vol. 249 (1-4), 11-29.

Beven K.J., 1993, Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling, *Advances in Water Resources*, Vol. 16 (1), 41-51.

Beven K.J., Binley A.M., 1992, The future of distributed models : model calibration and predictive uncertainty, *Hydrological Processes*, Vol. 6, 279-298.

Blazkova S., Beven K.J., 2002, Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty), *Water Resources Research*, Vol. 38 (8), 14.

Brown R.J., Wood D., Brisco B., 1997, Mapping rainfall distribution using RADARSAT data, *Proceedings of GER'97, Geomatics in the Era of RADARSAT*, Ottawa, 25-30 May.

Fellah K., Besnus Y., Clandillon S., Meyer C., de Fraipont P., 1994, Données multi-temporelles SAR ERS-1 pour une étude environnementale : recherche de la mesure d'un paramètre d'humidité des sols en Alsace, *Bulletin de la SFPT*, No 136, 23-32.

Fellah K., Bally P., Besnus Y., Meyer C., Rast M., de Fraipont P., 1995, Impact of SAR radiometric resolution in hydrological and agro-environmental applications, *Actes du Symposium International, Extraction de paramètres bio-géophysiques à partir des données RSO pour les applications terrestres*, CNES, 337-346.

Fellah K., 1997, *Mesures des paramètres des sols à partir de données des satellites radar pour les applications hydrologiques*, Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, mention Doctorat Européen, No. 2755, 250.

Franks S., Gineste P., Beven K., Merot P., 1998, On constraining the predictions of a distributed model : the incorporation of fuzzy estimates of saturated areas into the calibration process, *Water Resources Research*, Vol. 34, 787-797.

Freer J.E., McMillan H., McDonnell J.J., Beven K.J., 2004, Constraining Dynamic Topmodel for imprecise water table information using fuzzy rule based performance measures, *Journal of Hydrology – Special Issue (2002 EGS session)*, "Catchment modelling : towards an improved representation of the hydrological processes in real-world model applications", in press.

Fung T., Ledrew E., 1987, Application of Principal Components Analysis to change detection, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53 (12), 1649-1658.

Gineste P., Mérot P., 1996, ERS-1 SAR data spatio-temporal analysis for soil moisture and saturated areas assessment over a small agricultural watershed, *Proceedings of second ev5v-ct94-00446 workshop*, Rennes, 28-55.

Gineste P., Puech C., Merot P., 1998, Radar remote sensing of the source areas from the Coët-Dan catchment, *Hydrological Processes*, Vol. 12, 267-284.

Gong P., 1993, Change detection using principal component analysis and fuzzy set theory, *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, 22-29.

Henebry G.M., 1997, Advantages of principal components analysis for land cover segmentation from SAR image series, *Proceedings of the third ERS symposium*, Florence, 21-26 March, ESA SP-414, 175-178.

Holko L., Herrmann A., Uhlenbrook S., Pfister L., Querner E.P., 2002, Groundwater runoff separation - test of applicability of a simple separation method under varying natural conditions, *Proceedings of the FRIEND 2002, Fourth International Conference on FRIEND : Bridging the gap between Research and Practice*, Cape Town, South Africa, IAHS Pub. No. 274, 265-272.

Laur H., Bally P., Meadows P., Sanchez J., Schaettler B., Lopinto E., Esteban D., 1998, ERS SAR Calibration, Derivation of the backscattering coefficient σ_0 in ESA ERS SAR PRI products, Issue 2, Rev. 5b, ES-TN-RS-PM-HL09, ESA/ESRIN, 47.

Lebart L., Morineau A., Piron M., 1997, *Statistique exploratoire multidimensionnelle*, Dunod, Paris.

Marx M., 1987, Verhalten des Grundwasserspiegels im Alluvium des Alzettetals für den Raum Livingen-Berchem, Travail de Fin d'Etudes, Institut Supérieur de Technologie, Luxembourg, 43.

Merot P., Chanzy A., 1991, Mesure de l'humidité d'un sol par radar dans des conditions d'excès d'eau, *Proceedings of the 5th International Colloquium, Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Courchevel, France, 14-18 January, ESA SP-319, 293-296.

Metzger R., Consuega D., Musy A., 1999, 2D flood mapping hydraulic models : towards a simplified topographic approach, *Proceedings of the '99 Symposium on Flood Control*, Beijing, China.

Moisan Y., Bernier M., Dubois J.M., 1999, Détection des changements dans une série d'images ERS-1 multidates à l'aide de l'analyse en composantes principales, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20 (6),1149-1167.

Pfister L., 2000, *Analyse spatio-temporelle du fonctionnement hydro-climatique du bassin versant de l'Alzette (Grand-Duché de Luxembourg). Détection des facteurs climatiques, anthropiques et physiogéographiques générateurs de crues et d'inondations*, Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg.

Pfister L., Humbert J., Hoffmann L., 2000a, Recent trends in rainfall-runoff characterisation in the Alzette river basin, Luxembourg, *Climatic Change*, Vol. 45, 323-337.

Pfister L., Iffly J.F., El Idrissi A., Hoffmann L., 2000b, Vérification de l'homogénéité physiogéographique, hydrologique et climatique du bassin de l'Alzette (Grand-Duché de Luxem-

bourg) en vue d'opérations de régionalisation, *Arch. Inst. g.-d. Luxemb. Sect. Sci. Nat. Phys. Math.*, NS 43, 239-253.

Pfister L., Iffly J.F., Hoffmann L., Humbert J., 2002a, Use of regionalized stormflow coefficients with a view to hydroclimatological hazard mapping, *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 47 (3), 479-491.

Pfister L., Iffly J.F., Humbert J., Hoffmann L., 2002b, The role of groundwater resurgence on runoff coefficients of the Alzette river (Grand Duchy of Luxembourg), *Proceedings of ERB and Northern European FRIEND Project 5 Conference*, Demänovská Dolina, Slovakia, 30-32.

Pfister L., Drogue G., El Idrissi A., Humbert J., Iffly J.F., Matgen P., Hoffmann L., 2003, Predicting peak discharge through empirical relationships between rainfall, groundwater level and basin humidity in the Alzette river basin (Grand-Duchy of Luxembourg), *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, Vol. 51 (3), 12.

Richards J.A., 1984, Thematic mapping from multitemporal image data using the Principal Components transformation, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 16 (1), 35-46.

Ross T.J., 1995, *Fuzzy logic with engineering applications*, Mc Graw-Hill, New York.

Ulaby F.T., Moore R.K., Fung A.K., 1982, *Microwave remote sensing, Active and passive, Vol. II : Radar remote sensing and surface scattering and emission theory*, Addison-Wesley.

Ulaby F.T., Brisco B., Dobson C., 1983, Improved spatial mapping of rainfall events with spaceborne SAR imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. GE-21 (1), 118-121.

U.S. Army Corps of Engineers, 2002a, *HEC-RAS River Analysis System - Hydraulic reference manual*, Hydrologic Engineering Center, CPD69, Version 3.1.

U.S. Army Corps of Engineers, 2002b, *HEC-RAS River Analysis System - User's manual*, Hydrologic Engineering Center, CPD68, Version 3.1.

Verhoest N., Deckmyn J., Paniconi C., Troch P.A., 1997, Spatial soil moisture mapping through multi-temporal analysis of tandem ERS images over the winter period of 1995-1996, *Spatial and temporal soil moisture mapping from ERS-1/2 and JERS-1 SAR data and macroscale hydrologic modelling for regional climate models (RCM)*, ESA project A02-B106, 234-297.

Verhoest N., Troch P., Paniconi C., de Troch F., 1998, On the retrieval of bio-physical parameters from a multi-temporal series of ERS-SAR PRI images, *Water Resources Research*, Vol. 34, 3235-3244.

Xiong L., O'Connor K.M., 2000, Analysis of the response surface of the objective function by the optimum parameter curve : how good can the optimum parameter values be ?, *Journal of Hydrology*, Vol. 234 (3-4), 187-207.

Zribi M., Le Hégarat-Mascle S., Ottlé C., Kammoun B., Guerin C., 2003, Surface soil moisture estimation from the synergistic use of the (multi-incidence and multi-resolution) active microwave ERS Wind Scatterometer and SAR data, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 86 (1), 30-41.

Chapitre 5

Cartographie des inondations avec l'ASAR

Ce chapitre s'intéresse à la cartographie des inondations et à un instrument : le radar à synthèse d'ouverture du satellite ENVISAT. Cette partie de l'étude évalue les nouvelles capacités offertes par cet instrument pour la cartographie d'inondation en termes de polarisation du signal et de résolutions, radiométrique et géométrique. Cette cartographie fournit une information utile au paramétrage des modèles hydrauliques, et produite en temps rapide, elle devient un outil des services de gestion de crise pour positionner des moyens d'actions et intervenir le plus efficacement possible.

5.1 Problématique et objectifs

L'information géographique de l'extension des inondations est une donnée de base pour tout le processus de gestion de ce risque, que l'on se place avant, pendant ou après l'événement. Le chapitre précédent a montré combien l'utilisation des données d'imagerie radar, et notamment ENVISAT, permettait d'améliorer la définition des outils de modélisation. Ces données se substituent efficacement aux difficiles campagnes de terrain pendant la durée de l'événement, qui n'en offrent qu'une vision partielle.

Si le point de vue du satellite, à 800 km d'altitude, est privilégié pour observer les crues de plaine, il n'est pas pour autant exempt de contraintes. La problématique considérée est limitée à l'exploitation des données radar, plus à même de fournir une information par tous temps, de jour comme de nuit.

Les systèmes radar en bande C, tels qu'ERS ou Radarsat, ont déjà prouvé leurs capacités pour la cartographie des inondations, mais la configuration en émission/réception de l'onde radar polarisée peut limiter les performances (*e.g.* lorsque les surfaces inondées sont soumises au vent). Disposant de plusieurs polarisations et combinaisons de polarisations, l'ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*, cf. §A.2.3.2) d'ENVISAT propose de nouvelles solutions de cartographie des inondations, entrevues au chapitre précédent. La question centrale de ce chapitre est d'établir une première évaluation des produits d'imagerie radar fournis par cet instrument, en particulier ses possibilités dans différentes configurations de polarisations et de résolutions.

Cette partie de l'étude est réalisée sur l'inondation de l'Elbe du mois d'août 2002, sur laquelle une vaste base de données a pu être alimentée. Elle comporte notamment les premières images de l'ASAR sur ce type d'événement, créant une opportunité d'analyse de grande ampleur. S'intégrant aux travaux entamés dans le cadre du programme EOMD (*Earth Observation Market Development*, décrit en annexe B.3), cette étude exploite les données de différents satellites

optique et radar pour préparer l'intégration opérationnelle de l'instrument ASAR dans un service de cartographie rapide des inondations (Fellah *et al.*, 2003). Ses objectifs sont d'évaluer :
– la résolution radiométrique des différentes images ASAR (mono- et bi-polarisation),
– la séparabilité de différents thèmes d'occupation du sol en fonction de la polarisation,
– les possibilités de cartographie des inondations selon la polarisation et la résolution spatiale.

La constitution de la base de données est abordée dans ce chapitre avant de s'intéresser à la mesure et l'influence de la résolution radiométrique, à l'analyse thématique des données polarisées et à l'influence de la résolution spatiale.

5.2 Constitution de la base de données

Pendant la dernière crue de l'Elbe, les systèmes ENVISAT, ERS-2, SPOT et Landsat ont acquis des images. On s'intéresse ici plus particulièrement aux données radar, mais les images optiques constituent un apport indispensable à l'analyse.

Les données ASAR sont acquises sur différentes orbites (ascendante et descendante), plusieurs polarisations (HH, HV) et plusieurs faisceaux d'incidences (IS2, IS4). Les potentialités de la polarisation sont étudiées en exploitant les images acquises quasi simultanément par ENVISAT et ERS, le 19/08/02 (ASAR, polarisé HH et HV ; ERS, polarisé VV).

5.2.1 La crue de l'Elbe d'août 2002

Des conditions météorologiques inhabituelles sont à l'origine de cette crue (EQECAT, 2002). Deux systèmes dépressionnaires d'ampleur exceptionnelle se sont succédés à quelques jours d'intervalles : le premier a donné des pluies torrentielles entre le 6 et le 8 août sur le sud de l'Allemagne et l'Autriche ; le second a généré des pluies très importantes les 10 et 11 août. Le système dépressionnaire s'est maintenu sur l'Europe Centrale jusqu'au 14 août.

La succession de ces deux événements pluvieux importants a provoqué une première charge des rivières, qui n'a pas eu suffisamment de temps pour être évacuée. Lors du passage de la seconde perturbation les sols étaient déjà très humides, voire saturés, et les rivières étaient à des niveaux élevés. Ainsi, les conditions nécessaires à des inondations majeures étaient réunies sur de nombreux bassins tels que ceux de l'Elbe, du Danube ou de la Vltava. On retiendra qu'à Dresde la plus forte crue connue remonte à 1845 où le fleuve avait atteint la cote de 8.77 m, alors qu'en 2002 il atteignait 9.50 m. Ces crues ont fait l'objet d'un grand intérêt international de par leurs ampleurs et les dégâts qu'elles ont causé (fig. 5.1). Les évaluations des dégâts économiques présentées par ABS Consulting (EQECAT, 2002) sont éloquentes (tab. 5.1).

Pays	Estimation (Euros)
Allemagne	10 – 15 milliards
République Tchèque	3 – 3.6 milliards
Slovaquie	35 millions

Tab. 5.1 – Estimation des pertes économiques liées aux inondations d'août 2002

Cette inondation de très grande ampleur a eu des répercussions à tous les niveaux de la vie économique, sociale et politique des régions concernées, notamment en Allemagne. De ce fait, elle constitue une illustration particulièrement représentative des besoins en information spatiale pour permettre une évaluation de ses conséquences.

FIG. 5.1 – Vues sur la crue de l'Elbe en août 2002.

De gauche à droite, et de haut en bas : (a) la ville de Dresde, (b) zones affectées par l'inondation en Allemagne, (c) champs d'inondation de l'Elbe, (d) la gare de Dresde sous les eaux de l'Elbe, (e) stade de Dresde, (f) dommages sur les infrastructures (Dresdner@).

5.2.2 Les données ERS

Le point fort de cette base de données est l'acquisition le 19/08/02 à une demi heure d'intervalle d'une image ERS et d'une image ASAR, en mode polarisation alternée, mettant ainsi à disposition un jeu de trois polarisations sur la même zone (HH, HV et VV). D'autres images, antérieures et postérieures à cette date, sont également intégrées (fig. 5.2 et tab. 5.2).

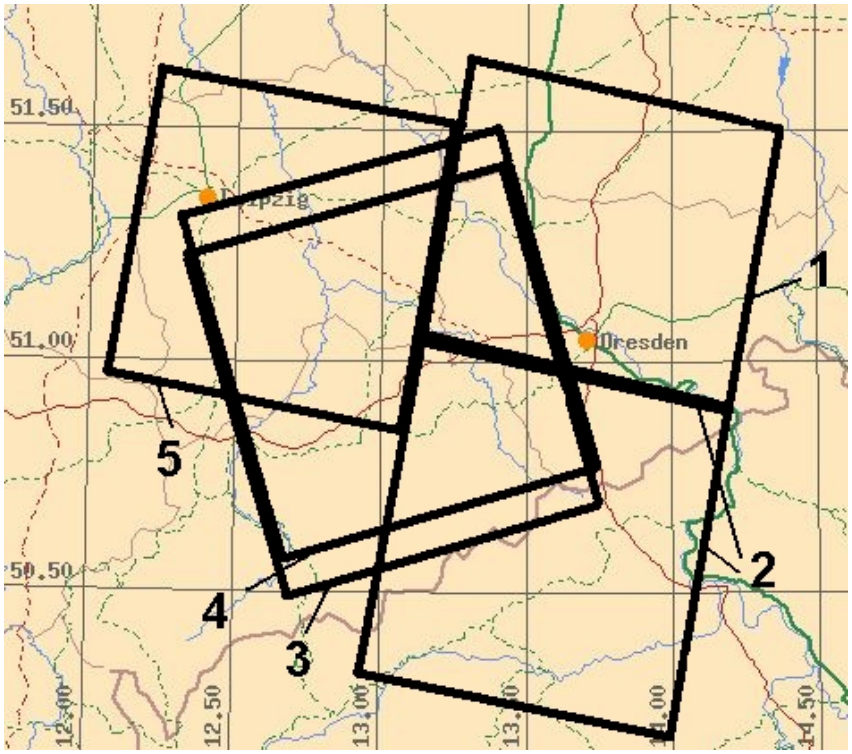


Fig. 5.2 – Localisation géographique des données ERS

Id.	Type	Date	Orbite
1	PRI	19/08/02	Desc.
2	GEC	10/08/98	Desc.
3	PRI	09/07/02	Asc.
4	PRI	13/08/02	Asc.
5	PRI	22/08/02	Desc.

Tab. 5.2 – Données ERS disponibles sur l'Elbe

5.2.3 Les données ENVISAT

Au cours de la crue de l'Elbe, l'ASAR d'ENVISAT a acquis des images selon deux modes de fonctionnement : mono- et bi-polarisation (Desnos *et al.*, 1999). Ces données sont générées dans deux formats de produits différents : haute et moyenne résolution (pixels de 12.5 m et 75 m respectivement). Toutes ces acquisitions sont réalisées le 19/08/02, le matin pour l'image en polarisation alternée et le soir pour l'image en mono-polarisation (fig. 5.3 et tab. 5.3).

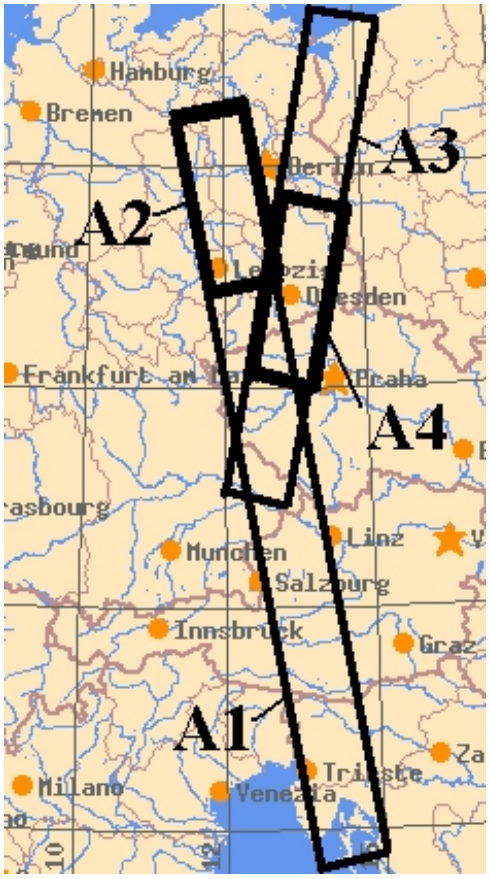


Fig. 5.3 – Localisation géographique des données ENVISAT

Id.	Type	Rés. (m)	Pixel (m)	Faisceau	Orbite	ENL	Polar.
A2	IMP	30	12.5	IS4 (30–36 °)	Asc.	3.9	HH
A1	IMM	150	75	IS4 (30–36 °)	Asc.	40	HH
A4	APP	30	12.5	IS2 (18–26 °)	Desc.	1.9	HH/HV
A3	APM	150	75	IS2 (18–26 °)	Desc.	50	HH/HV
-	PRI	30	12.5	(19–26 °)	Desc.	3	VV

Tab. 5.3 – Principales spécifications et caractéristiques des images radar acquises le 19/08/02 sur l'Elbe

5.2.4 Les données optiques

La base de données radar est complétée par des données acquises par SPOT et Landsat 7 (fig. 5.4). Seule l'image Landsat est utilisée dans la suite de l'étude.

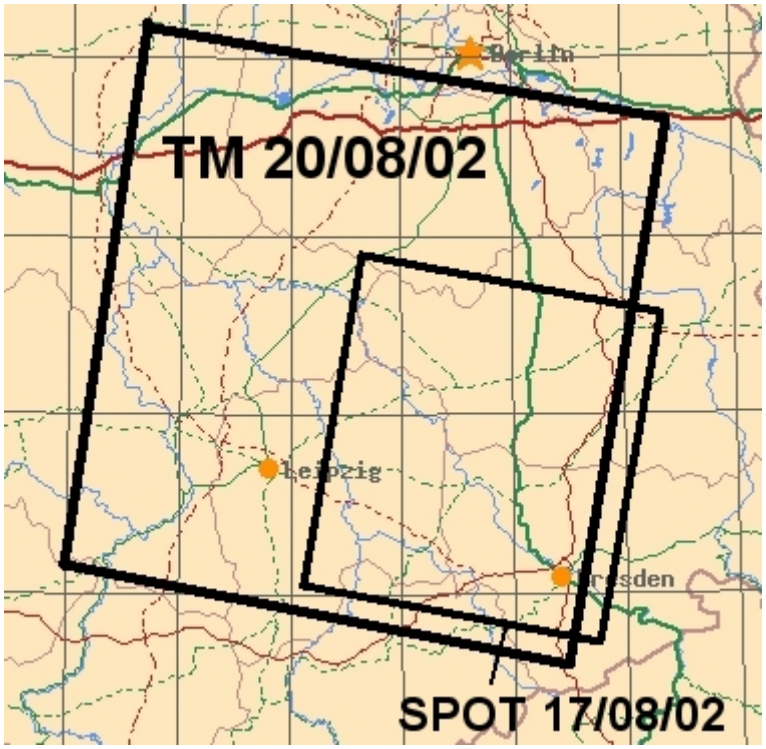


FIG. 5.4 – Localisation géographique des données optiques

5.2.5 Pré-traitements géométriques

La base de données a fait l'objet de traitements géométriques pour permettre une intégration aisée au sein d'une interface SIG de traitement d'images et une comparaison des différentes spécificités de chacune de ses composantes.

Dans le cas précis de l'Elbe, le géoréférencement simple par transformation polynomiale est préféré à une orthorectification pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'image radar de référence fournie au format GEC est directement intégrable. Ce format n'est pas obtenu par orthorectification mais seulement par géocodage à partir des données d'éphéméride du satellite. Ensuite, les données ASAR étant nouvelles, leurs formats sont encore difficilement pris en charge par les outils de traitement d'images. Ainsi, leur orthorectification nécessite une analyse manuelle des fichiers d'en-tête pour extraire les paramètres d'acquisition. Par conséquent, cette difficulté est ignorée pour cette partie de l'étude. Toutes les images sont ajustées sur la référence ERS du 10/08/98, imposant de travailler uniquement dans la plaine de l'Elbe, où les déformations géométriques sont réduites.

5.3 Mesure et influence de la résolution radiométrique

L'instrument ASAR propose de multiples modes d'acquisition, à différentes résolutions spatiale et radiométrique. Ces deux grandeurs caractéristiques sont intimement liées, et le gain sur l'une se fait nécessairement au détriment de l'autre (tab. A.7), nécessitant un compromis en fonction du type d'application. De plus, selon la résolution spatiale, chaque mode d'imagerie dispose d'une fauchée et d'une fréquence de revisite propres. Pour la gestion des inondations, ces derniers facteurs figurent parmi les plus importants. A l'heure actuelle, il n'est pas encore possible de définir précisément une période de revisite pour le RSO d'ENVISAT du fait de cette multiplicité des modes.

Afin d'évaluer la résolution radiométrique des données de l'ASAR, les signatures radar sont étudiées sur des thèmes d'occupation du sol spécifiques. Cette évaluation radiométrique se décompose en deux temps : une mesure de la résolution des différents produits, avec une vérification de la loi de comportement des intensités mesurées, puis une évaluation thématique par pseudo-calibration.

5.3.1 Mesure de la résolution radiométrique

L'ensemble du jeu de données radar acquises le 19/08/02 est utilisé, *i.e.* une bonne variété de résolutions spatiales et de polarisations. Les mesures d'amplitudes sont réalisées sur des surfaces minimales de 6000 à 7000 pixels pour les produits à haute résolution (ASAR IMP, APP et ERS PRI). Les échantillons sont choisis sur cinq classes d'occupation du sol, radiométriquement homogènes : eau "lisse", eau "rugueuse", forêt, sol et végétation. Pour chacun d'entre eux sont évalués le coefficient de variation C_v de l'intensité mesurée I_m et le nombre de vues équivalent ENL correspondant.

$$C_v = \frac{\sqrt{Var(I_m)}}{\bar{I}_m} = \frac{1}{\sqrt{ENL}} \tag{5.1}$$

A partir de ces mesures, les lois de distribution sont validées pour l'intensité du signal. Si les surfaces sont considérées parfaitement homogènes, l'intensité est efficacement modélisée par une loi Gamma, mais si la texture intervient, la K-distribution est souvent plus appropriée (cf. chapitre 2). Les paramètres de la distribution théorique sont évalués grâce à la méthode du maximum de vraisemblance, introduite par R.A. Fisher en 1922. L'écart entre distributions théoriques et mesurées est évalué par le test simple des moindres carrés (*msd*, *mean square difference*), mis en œuvre par Joughin *et al.* (1993) pour estimer les paramètres des distributions statistiques sur des images RSO.

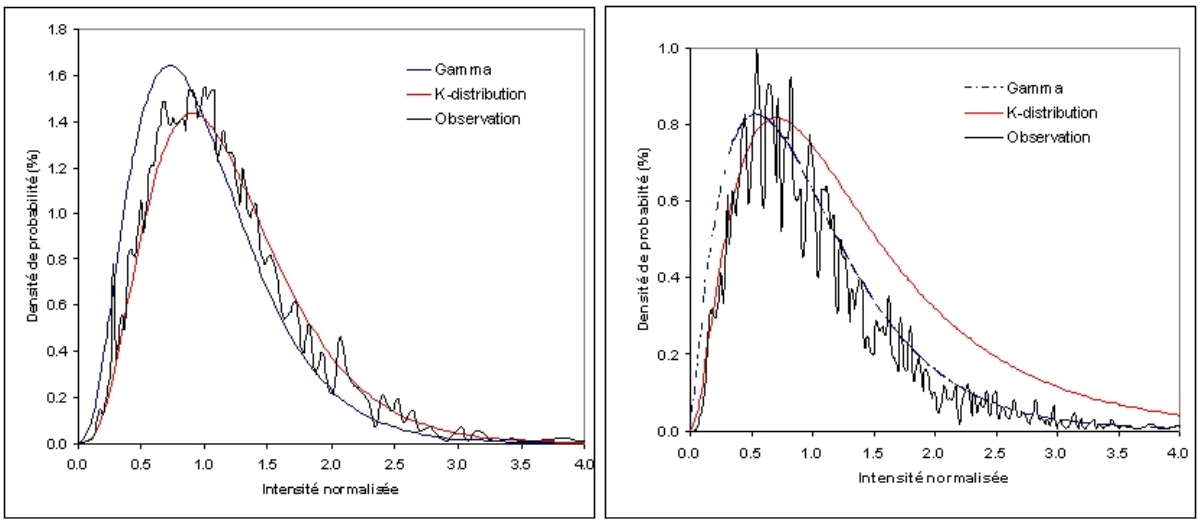
$$msd = \int_0^{+\infty} \left(p(x|\alpha, \bar{I}) - p(x|\hat{\alpha}, \hat{\bar{I}}) \right)^2 \cdot dx \tag{5.2}$$

$$= \int_0^{+\infty} \left(fdp_{th}(I) - fdp_{obs}(I) \right)^2 \cdot dI \tag{5.3}$$

où $p(x|\alpha, \bar{I})$ est la loi de densité de probabilité de paramètre α et de moyenne $\bar{I}$.

Le tableau 5.4 présente les résultats des ajustements des lois de distribution théorique sur les distributions observées. Ils mettent en évidence la concordance des paramètres calculés d'après les mesures et de ceux ajustés graphiquement aux histogrammes. La comparaison des valeurs d'ENL observées et ajustées comme l'écart entre distributions théorique et ajustée (test msd) sont des moyens efficaces pour quantifier la résolution radiométrique d'un produit d'imagerie radar.

L'analyse graphique permet une bonne approche de la distribution des valeurs radiométriques dans les images (fig. 5.5). On peut notamment observer l'allure générale des courbes en fonction de l'ENL : le pic autour de 1 (réflectivité moyenne) est d'autant plus prononcé et étroit que l'ENL est élevé.



(a) Image ASAR IMP (ENL=3.9)

(b) Image ERS PRI (ENL=3)

FIG. 5.5 – Densités de probabilité observées, ajustées sur une loi Gamma et une K-distribution pour un échantillon d'eau

Les deux graphiques de la figure 5.5 présentent les distributions radiométriques observées sur des données ASA-IMP et ERS-PRI pour un échantillon d'eau. A la différence de la courbe 5.5a, la courbe 5.5b présente des fortes variations autours des courbes théoriques. Elles sont principalement dues aux artefacts de calcul de l'histogramme (nombre et largeur des intervalles). Cette seconde courbe est également plus étalée horizontalement avec une densité de probabilité plus faible pour la réfléctivité moyenne, provenant de la plus forte variabilité de l'intensité, *i.e.* de la plus faible résolution radiométrique. Ces différents points de comparaison mettent l'accent sur l'influence de l'ENL sur la distribution des valeurs radiométriques. Ainsi, plus la résolution radiométrique est élevée, plus la mesure radar converge vers la réflectivité moyenne avec une faible incertitude (Fellah, 1995).

Les résultats obtenus sur l'image PRI d'ERS-2 permettent d'évaluer la pertinence de l'analyse similaire conduite sur les données ASAR (tab. 5.4). L'étude menée par Bally et Fellah (1995) présente des observations très comparables, sur les mêmes classes d'occupation du sol. Les coefficients de variation, les paramètres et les degrés d'ajustement des lois Gamma ou K-Distribution obtenus correspondent aux attentes, compte tenu des éléments exposés dans la section 2.2.6.

L'analyse des données ASAR est présentée dans les sections suivantes, en distinguant les images à haute résolution des images à moyenne résolution.

Donnée (spécif.)	**Type de surface**	**Cv**	**ENL calculé**	**ENL ajusté graph.**	**Test msd (%)**		
					Gamma	**K-dist.**	α
IMP HH (ENL=3.9)	Eau lisse	0.54	3.43	3.6	10.6	2.9	130
	Eau rugueuse	0.55	3.27	3.4	29.9	1.2	170
	Sols	0.58	2.99	3.2	4.8	9.0	20
	Cultures	0.55	3.82	3.7	44.4	58.3	170
	Forêt	0.55	3.30	3.5	9.5	10.7	90
APP HH (ENL=1.9)	Eau lisse	0.72	1.93	2.0	2.3	6.2	7
	Eau rugueuse	0.87	1.33	1.5	1.8	5.7	20
	Sols	0.81	1.54	1.7	2.2	5.4	2
	Cultures	0.79	1.60	1.7	1.0	6.0	80
	Forêt	0.78	1.63	1.7	1.2	6.1	3
APP HV (ENL=1.9)	Eau lisse	0.75	1.79	1.9	3.0	7.9	170
	Eau rugueuse	0.72	1.95	1.9	3.6	16.0	170
	Sols	0.81	1.52	1.8	1.7	6.4	170
	Cultures	0.77	1.71	1.8	1.0	7.6	170
	Forêt	0.61	2.72	1.8	1.1	6.6	170
IMM HH (ENL=40)	Mer	0.26	14.25	30	4.0	-	-
	Forêt	0.20	25.58	25	1.1	-	-
APM HH (ENL=50)	Mer	0.16	38.92	35	2.5	-	-
	Forêt	0.17	33.26	33	2.4	-	-
APM HV (ENL=50)	Mer	0.13	40.62	45	11.3	-	-
	Forêt	0.16	39.91	38	4.3	-	-
PRI VV (ENL=3)	Eau lisse	0.58	2.94	2.2	5.7	8.9	20
	Eau rugueuse	0.65	2.35	2.2	3.4	6.9	10
	Sols	0.66	2.33	2.2	2.6	6.3	10
	Cultures	0.61	2.72	2.2	3.5	5.9	10
	Forêt	0.62	2.62	2.4	2.9	7.9	15

TAB. 5.4 – Résolutions radiométriques des images RSO d'ENVISAT et ERS sur l'Elbe, ajustement des distributions

5.3.1.1 Données ASAR haute résolution

Contrairement à la donnée PRI, où les valeurs ajustées graphiquement sont inférieures aux valeurs calculées à partir de la distribution, l'effet inverse est observé pour les données IMP et APP. Les ENL ajustées font apparaître des écarts de 7 à 20% par rapport à la valeur de spécification de 3.9 pour le produit IMP (contre des écarts de 20 à 25% pour le produit ERS PRI). Ces valeurs correspondent au résultat de 3.69 obtenu par Meadows et Wright (2002).

Les échantillons retenus sur l'image IMP font apparaître des résultats relativement déconcertants. Sur les deux échantillons d'eau, une modélisation de qualité moyenne est obtenue avec la loi Gamma alors que la K-Distribution s'avère efficace pour un coefficient α très élevé (cf. §2.2.6). Différents essais d'ajustement montrent que la loi Gamma s'ajuste à 4.4% (test msd) pour un ENL de 3.0, sur l'échantillon "Eau rugueuse". Ces résultats sont confirmés par des mesures réalisées sur d'autres échantillons de même typologie.

La donnée APP présente des résultats beaucoup plus proches des spécifications (ENL=1.9). On peut cependant remarquer que les valeurs ajustées en polarisation HV sont moins variables qu'en HH (1.8 et 1.9 pour HV, de 1.5 à 2.0 pour HH). Pour ces deux polarisations, les dis-

tributions mesurées sont très bien modélisées par la loi Gamma, par contre l'ajustement de la K-Distribution apparaît plus problématique. Il est assez surprenant de constater qu'en polarisation HV le meilleur ajustement de la K-Distribution est obtenu pour une valeur de α très élevée, alors que les observations thématiques laissent plutôt envisager le contraire (cf. §5.4). Les valeurs obtenues en polarisation HH tendent d'ailleurs à confirmer cette hypothèse.

Pour les données haute résolution ERS-PRI (3), ASA-APP (1.9) et ASA-IMP (3.9), les types d'occupation du sol réputées les plus homogènes (eau et forêt), donc les plus adaptées à la mesure de la résolution radiométrique, présentent des valeurs d'ENL très proches de celles attendues d'après les spécifications. Les qualités des ajustements aux lois statistiques sont très variables d'une polarisation, d'un produit et d'un type d'échantillon à un autre.

5.3.1.2 Données ASAR moyenne résolution

L'évaluation radiométrique des données à moyenne résolution est réalisée sur deux classes d'occupation du sol : mer et forêt. L'échantillonnage des images à 75 mètres rend impossible la sélection d'échantillons homogènes comportant suffisamment de pixels pour permettre une analyse statistique significative sur d'autres classes. La résolution radiométrique est annoncée à 40 pour le produit IMM et 50 pour le produit APM.

Sur la donnée APM, les résolutions calculées à partir des distributions sont inférieures aux spécifications de 20 à 30%. Ces écarts sont du même ordre de grandeur que pour les données haute résolution. C'est en effet la même donnée brute et le même algorithme (SPECAN) qui sert à la réalisation des produits à moyenne et haute résolution (ESA, 2002).

Par contre en mode IM, si la même acquisition est utilisée pour produire les moyenne et haute résolutions, l'algorithme utilisé diffère : respectivement SPECAN et Range-Doppler (ESA, 2002). Les résultats obtenus sur la donnée IMM sont inférieurs de moitié aux spécifications. Les ajustements graphiques ne les améliorent que très partiellement. Ces résultats sont expliqués par un usage restreint de la bande passante de l'instrument. Le 17/10/02 des changements ont été implémentés sur le processeur et sur l'instrument, notamment une utilisation complète des 16 MHz de bande passante pour toutes les incidences, augmentant considérablement la résolution radiométrique des produits image (Rosich *et al.*, 2003). Rosich (2002) montre que l'ENL des produits IMM acquis en incidence IS4 (tels que ceux utilisés ici) passe de 31 à 70. Cette modification de l'implémentation du processeur ASAR ne semble pas pour autant modifier les caractéristiques des produits AP.

Sur l'ensemble des données à moyenne résolution, les ajustements graphiques de la loi de probabilité Gamma aux observations aboutissent à des valeurs finales sensiblement inférieures aux spécifications. L'ajustement de la K-Distribution n'est pas réalisé du fait de la moyenne résolution des images qui diminue considérablement la texture de la scène, *i.e.* son hétérogénéité (ESA, 1990). Les importants écarts constatés sont dus au fait que ces données ont été acquises pendant la phase de recette en vol, au cours de laquelle sont calibrés l'instrument, les chaînes de traitement et de production des images.

5.3.2 Pseudo-calibration

Le coefficient de rétrodiffusion est calculé sur un jeu de parcelles test couvrant les thèmes forêt, eau, sols nus, végétation et zones urbaines. Une pseudo-calibration est réalisée en contraignant la parcelle de forêt à une valeur de -7.5 dB. Les valeurs moyennes observes en bande C, polarisée VV, sont le plus souvent comprise entre -6 dB et -8 dB (voir par exemple Hawkins *et al.*,

1999). On calcule ainsi la constante de calibration pour chaque donnée. Ne disposant pas des informations de calibration absolue pour les images ASAR, cette partie de l'étude est donc une analyse pseudo quantitative, visant à comparer les différentes données sur une même base.

L'aire commune aux différentes données acquises sur l'Elbe par ERS-2 et par ENVISAT, en mode AP et IM, est réduite (zone triangulaire d'environ 18×30 km de côtés). Malgré tout, elle permet de s'intéresser aux différences d'intensité du signal rétrodiffusé sur les thèmes majeurs d'occupation du sol. La pseudo-calibration est réalisée sur les données APP, IMP et PRI, et les résultats sont présentés sur les graphes de la figure 5.6, synthétisés sur le graphe 5.7.

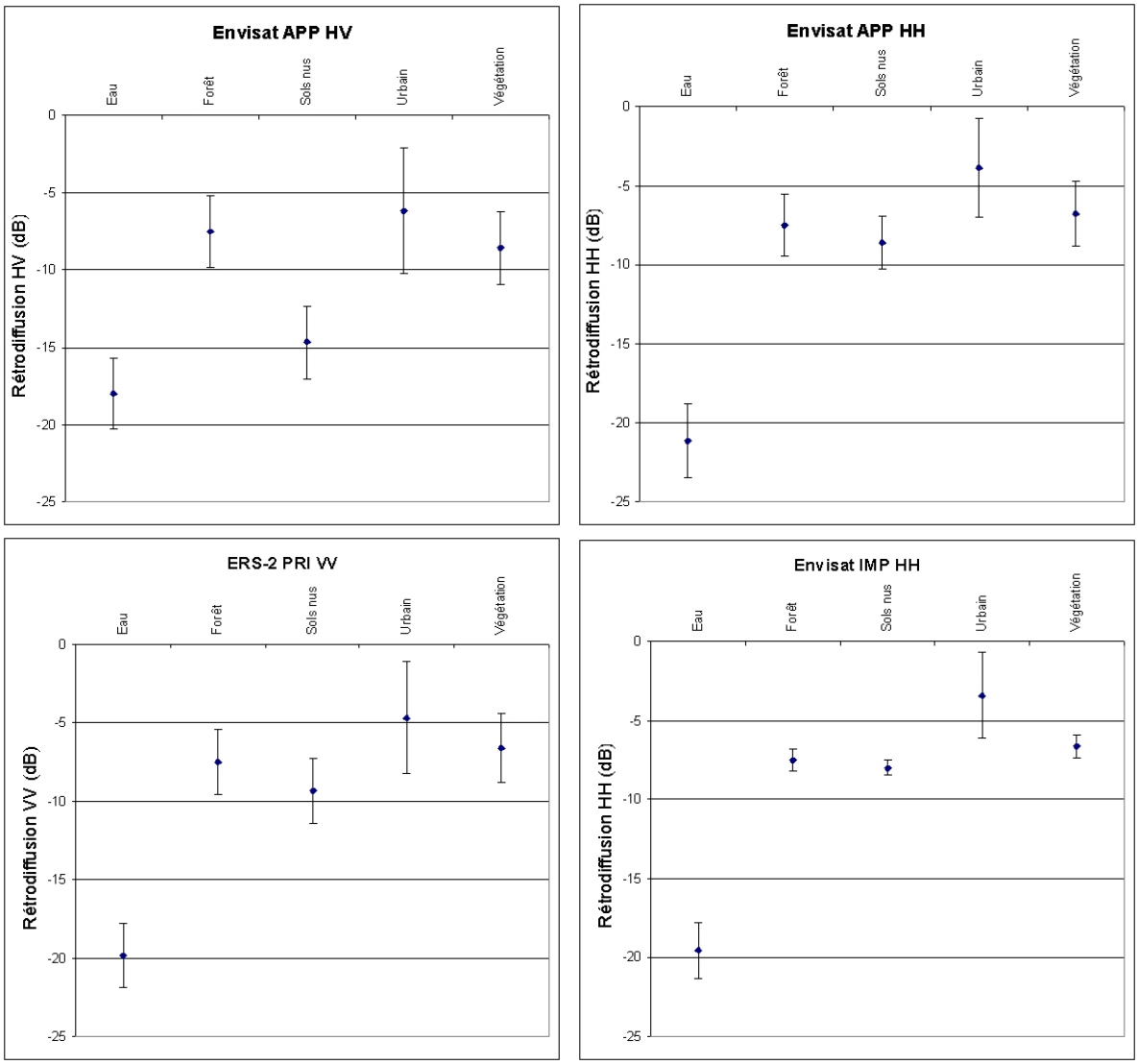


Fig. 5.6 – Coefficient de rétrodiffusion moyen et écart-type sur les données ASA-APP, ASA-IMP et ERS PRI

Les comparaisons des signatures, réalisées deux à deux, montrent ainsi les complémentarités et les différences majeures observables sur un jeu de données réduit. Elles permettent de mieux préciser les apports du capteur ASAR dans ses différents modes de fonctionnement.

5.3.2.1 Comparaison APP HH / APP HV

Le jeu de données en polarisation alternée (APP) permet de s'intéresser aux apports des polarisations parallèles (*like polarization*) et croisées (*cross polarization*) acquises simultanément. En excluant l'eau, la polarisation HH fournit des coefficients de rétrodiffusion dans une plage de valeurs plus restreinte qu'en HV, avec une variabilité plutôt réduite excepté pour les surfaces urbaines. Les surfaces en eau sont bien identifiables en HH, avec des valeurs nettement inférieures aux autres classes, alors qu'en HV cette classe présente un recouvrement avec les sols nus.

Les différences de dynamique radiométrique et d'étalement d'histogrammes (fig. 5.13) sont illustrées par les barres d'incertitude pour chaque classe d'occupation du sol et par les plages de variations du coefficient de rétrodiffusion. Elles suggèrent une forte complémentarité des deux polarisations.

5.3.2.2 Comparaison IMP HH / PRI VV

Ces deux données permettent de s'intéresser aux acquisitions en polarisations parallèles. La différence d'ENL (3 pour le PRI, 4.9 pour l'IMP) est mise en évidence par la taille des barres d'erreur, quelle que soit la classe thématique considérée. Ces différences radiométriques entre IMP et PRI proviennent certainement de l'utilisation de deux polarisations différentes. La rétrodifusion de l'onde polarisée VV par les surfaces en eau est dépendante de leur rugosité, et la distribution statistique des intensités mesurées peut être fortement dispersée (fig. 5.5). Les mesures effectuées révèlent que la donnée IMP est plus stable que la donnée PRI, exception faite des zones urbaines où la variabilité demeure très forte, quelle que soit la polarisation.

Même si la donnée IMP présente une variabilité moins forte que la PRI sur un même jeu de cibles test, la séparabilité des classes n'en est pas pour autant facilitée. Les différences de valeurs de coefficient de rétrodiffusion entre ces classes sont assez faibles. Cette remarque doit être cependant tempérée, du fait que les données utilisées pour cette étude préliminaire ne disposaient pas d'une calibration absolue.

5.3.2.3 Comparaison IMP HH / APP HH

La comparaison des données polarisées HH, acquises en mode IM et AP, souligne à nouveau la différence de résolution radiométrique. Pour des valeurs très comparables de rétrodiffusion, les écarts types observés en mode AP sont bien plus importants qu'en mode IM. Cette comparaison confirme la supériorité du produit IMP pour la mesure quantitative de la rétrodiffusion radar. Les recommandations de Fellah (1995) sur l'échelle d'étude du σ_0 (tab. 2.2) doivent pouvoir être adaptées aux données IMP, en prenant en compte leur résolution radiométrique plus élevée mais aussi les effets du dépointage de l'instrument.

5.3.2.4 Comparaison globale

La réunion des signatures calculées sur l'ensemble du jeu de données permet de mieux considérer les apports de chaque polarisation (Lee *et al.*, 2001) et de chaque produit par classe thématique d'occupation du sol (fig. 5.7). Globalement, l'analyse des valeurs de rétrodiffusion et des écart-types associés illustre efficacement les résultats de la calibration radiométrique (tab. 5.4). Cette étape de pseudo-calibration permet d'apprécier l'adéquation des polarisations pour la cartographie des surfaces inondées. Les valeurs moyennes et les écart-types obtenus sur les différents échantillons témoignent d'une très bonne séparabilité de l'eau des autres thématiques d'occupation du sol.

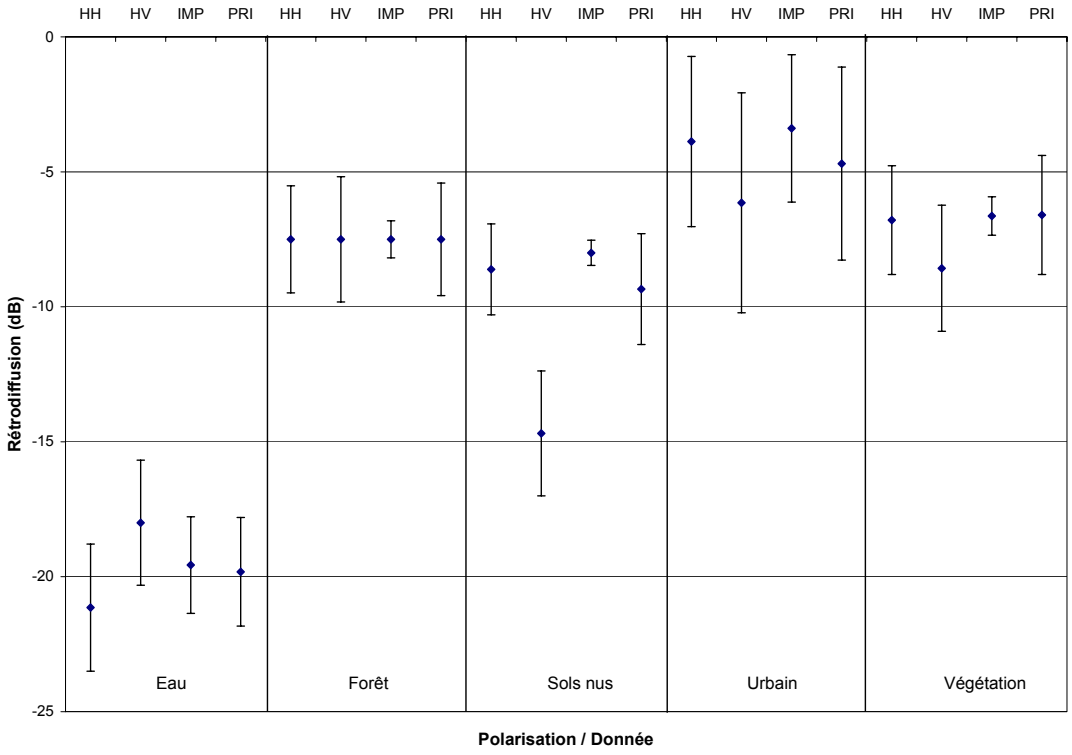


FIG. 5.7 – Résumé des signatures obtenues par pseudo-calibration

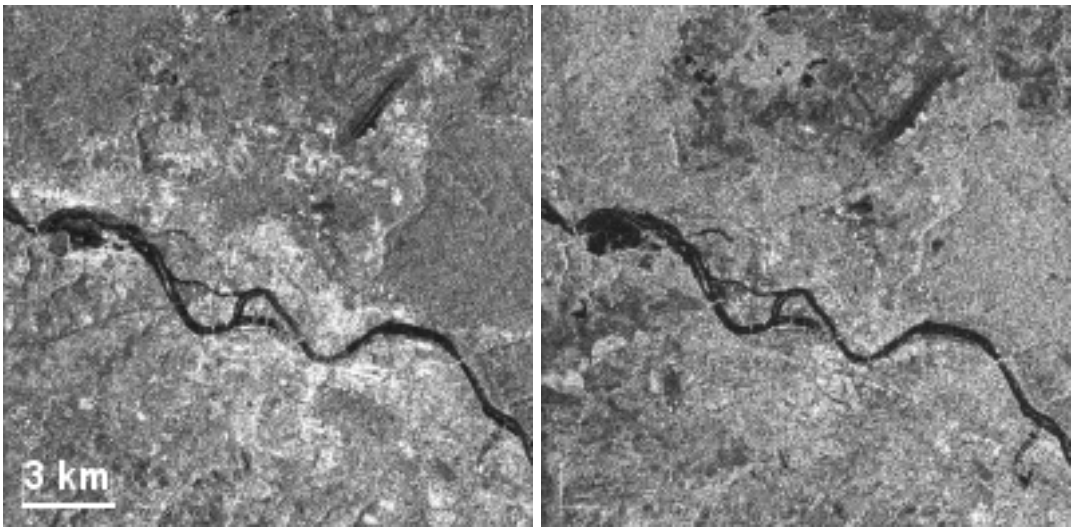
Il est cependant nécessaire de nuancer une telle conclusion. L'analyse par pseudo-calibration a été effectuée à l'échelle d'échantillons regroupant plus de 600 pixels (environ 10 ha), *i.e.* en intégrant la variabilité locale du signal dûe au chatoiement. Une analyse plus large est donc nécessaire pour fournir une évaluation thématique des différentes données polarisées disponibles.

5.4 Analyse thématique des données polarisées

Les apports thématiques des acquisitions APP HH, HV (fig. 5.8) et IMP HH sont comparés au contenu des données ERS classiques. Les produits IMP et PRI ont des caractéristiques assez similaires. Ainsi, la comparaison d'une image IMP acquise en polarisation HH avec une image PRI en polarisation VV permet d'évaluer les améliorations proposées par ENVISAT dans ce mode d'imagerie.

Par simple comparaison visuelle, on constate aisément les différences entre les deux modes d'acquisition HH et HV (fig. 5.8). La polarisation croisée est très sensible aux effets de diffusion de volume de la végétation, et les zones urbaines y sont moins facilement identifiables qu'en polarisation parallèle (Xia, 1996). Ceci est confirmé par Ulaby et Elachi (1990), Hess *et al.* (1995). L'interprétation de ces données, complétées par l'imagerie ERS, permet d'évaluer l'apport thématique de chacune des polarisations (fig. 5.9).

Cette section s'intéresse tout d'abord à la description thématique du paysage, puis plus spécifiquement selon la polarisation employée, aux différentes signatures des surfaces en eau et à l'efficacité de leur extraction.



(a) Polarisation HH (b) Polarisation HV

FIG. 5.8 – Données ASAR APP sur Dresde

5.4.1 Description du paysage

La composition colorée des trois polarisations présente des similitudes avec l'image Landsat TM affichée en combinaison 2/4/1 (fig. 5.10). On remarque notamment la très forte contribution de la polarisation HV dans les zones forestières. Par contre, les deux polarisations parallèles HH et VV présentent des intensités rétrodiffusées beaucoup plus importantes sur les sols nus (parcelles en rose violacé sur l'image Landsat). Enfin, à quelques variations près, la composition colorée fait apparaître les zones urbaines en blanc, ou tout du moins dans des couleurs très claires, ce qui est la caractéristique générale de cette thématique dans les images radar.

Ces analyses comparatives de l'apport thématique de chaque polarisation et l'appréciation visuelle par photo-interprétation permettent de dresser un aperçu qualitatif de l'utilisation de chacune d'entre elles pour la caractérisation du paysage :

	HH	**HV**	**VV**
Forêt	+	+++	++
Surface agricole	++	+++	++
Zones urbaines	+++	-	++
Surfaces en eau	+++	++	+

TAB. 5.5 – Adéquation entre polarisation et thématique d'occupation du sol

L'utilisation du filtrage Gamma-MAP (Lopez *et al.*, 1993) dans une fenêtre 3×3, avant toute combinaison de modes d'acquisition, apparaît très efficace en réduisant considérablement les effets du chatoiement sans pour autant altérer la géométrie des objets présents. L'impact de la méthode de filtrage n'est pas étudié ici.

Des observations similaires peuvent être faites avec les données ASAR IMP, acquises sur le faisceau IS4 en polarisation HH et en orbite ascendante. Malheureusement, la comparaison instantanée avec les données ERS-2 n'est pas possible car aucune d'entres elles n'a été acquise le 19/08/02 en orbite ascendante.

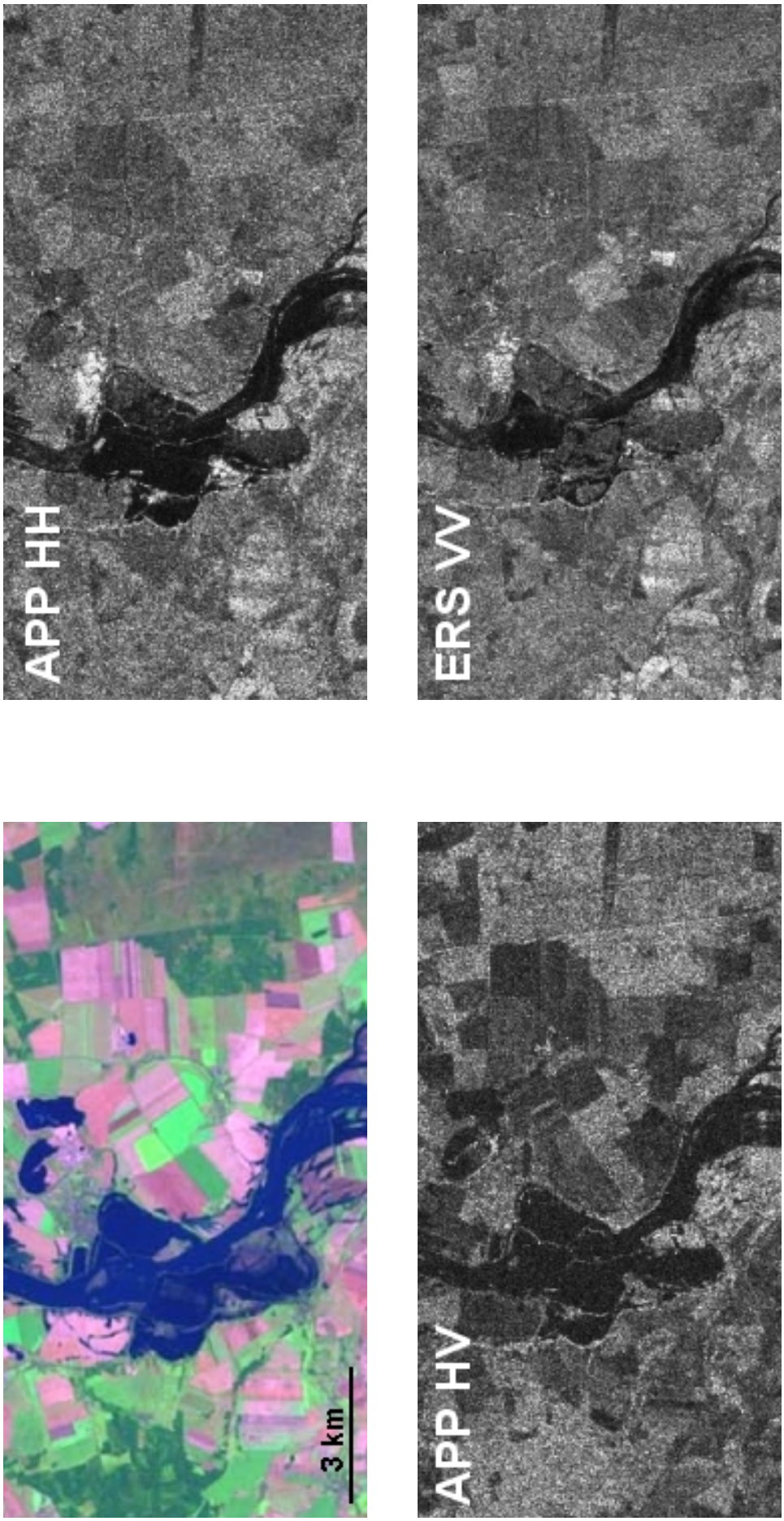
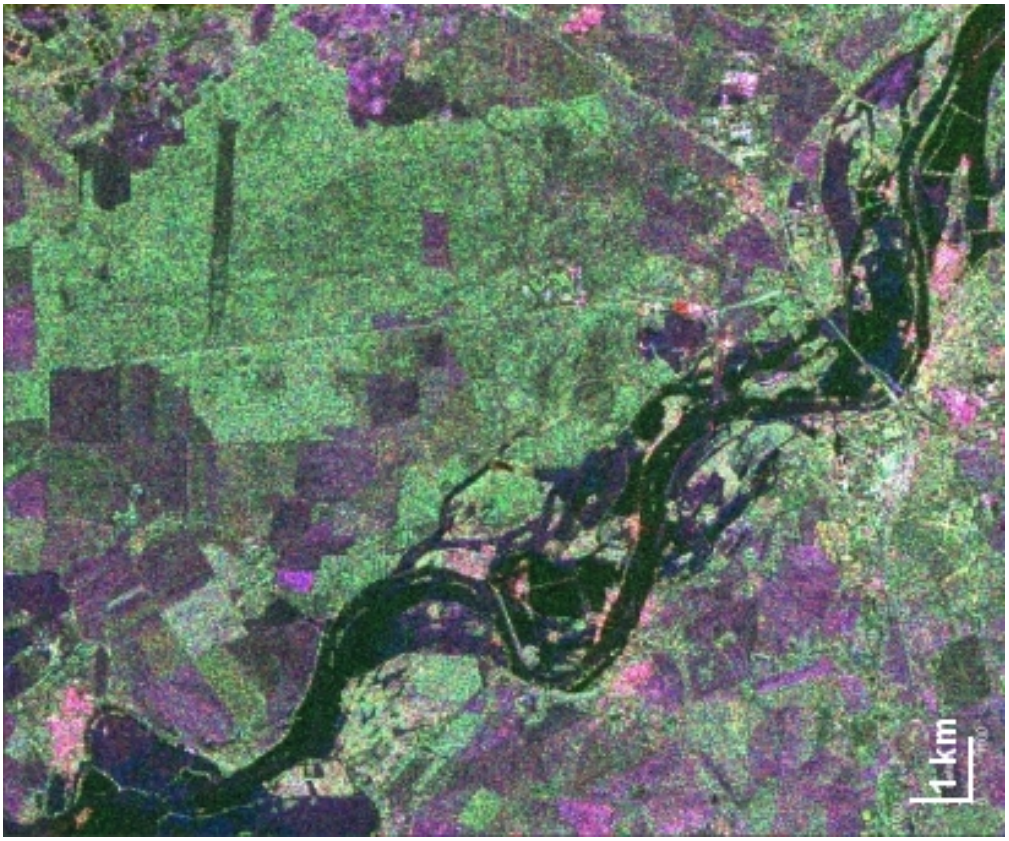


FIG. 5.9 – Caractéristiques thématiques des données RSO en fonction de la polarisation (données radar acquises le 19/08/02)

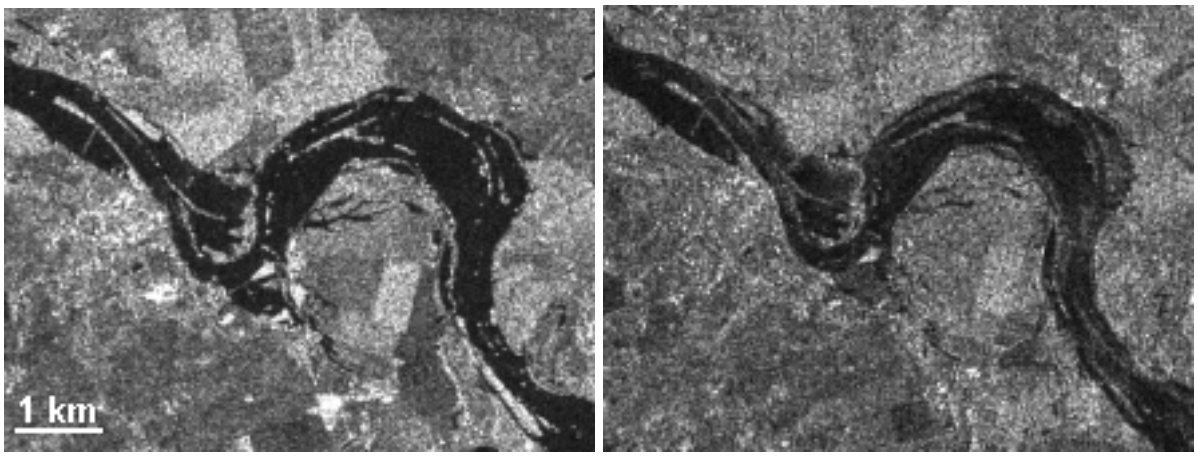
(a) Image Landsat TM (20/08/02)



(b) Composition colorée des données ASAR HH (R), HV (V) et ERS (B) VV (19/08/02)

FIG. 5.10 – Donnée Landsat TM et composition colorée des données ASAR et ERS

Les différences de texture entre les deux images acquises par ENVISAT en mode IMP et ERS le 19/08/02 (fig. 5.11) peuvent provenir de plusieurs facteurs : les heures différentes d'acquisition (matin pour ERS et soir pour ENVISAT) témoignant de deux instants différents dans le déroulement de la crue, les polarisations (VV pour ERS et HH pour ENVISAT), les résolutions radiométriques (3 pour ERS et 3.9 pour ENVISAT) et enfin, les orbites (descendante pour ERS et ascendante pour ENVISAT). Ces différences sont d'ailleurs confirmées par l'analyse des images en polarisation alternée.



(a) Image ASA-IMP (b) Image ERS-PRI

Fig. 5.11 – Données IMP et PRI acquises le 19/08/02

La comparaison de données IMP et PRI sur des surfaces en eau montre que la polarisation HH semble être moins influencée par la rugosité induite par le vent ou les courants (fig. 5.12). Malgré tout, cette figure illustre également les limitations inhérentes à l'usage d'une seule polarisation pour la détection des surfaces en eau.

5.4.2 Signatures des surfaces en eau

A cause de l'effet spéculaire de la réflexion de l'onde radar sur l'eau libre, ce type de surface apparaît très sombre sur les images radar. Cependant, lorsque la surface n'est pas totalement plane mais pertubée par le vent ou des courants, elle peut apparaître en différents niveaux de gris, la rendant alors parfois difficilement dissociable d'autres types d'occupation du sol.

Une première analyse des statistiques générales des images montre des pics secondaires des histogrammes dans les faibles valeurs de rétrodiffusion, en particulier pour HH et VV (fig. 5.13). Ceci suggère que les surfaces en eau sont plus facilement identifiables en polarisation parallèle qu'en polarisation croisée. De plus, on peut noter que l'histogramme de la donnée HH est plus large que les autres, ce qui laisse entrevoir une meilleure discrimination des thématiques d'occupation du sol.

Les zones inondées ont des comportements caractéristiques selon la polarisation de l'onde incidente, illustrés par le profil radiométrique de la figure 5.14. Les différences de niveaux de gris observables sur chacune des images (fig. 5.9) contribuent fortement à la texture du champ d'inondation dans la composition colorée. Plusieurs types de réponse de ces surfaces au signal radar peuvent être isolés.

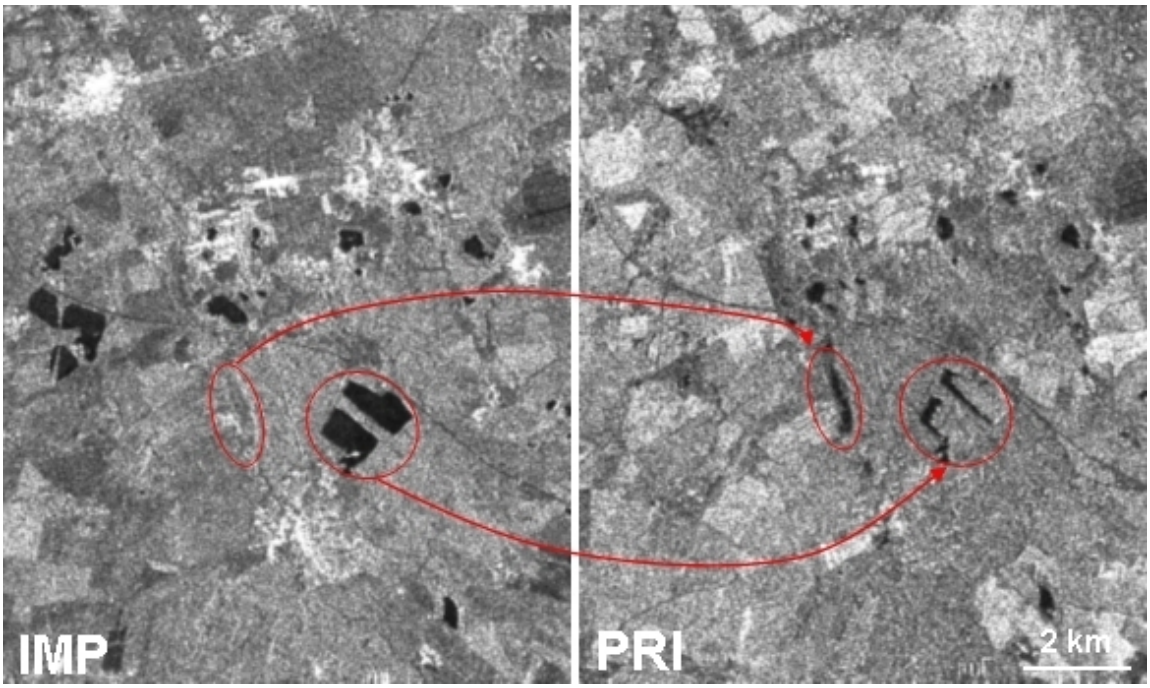


FIG. 5.12 – Effets du vent sur les plans d'eau, images IMP acquise le 19/08/02 et PRI acquise le 13/08/02

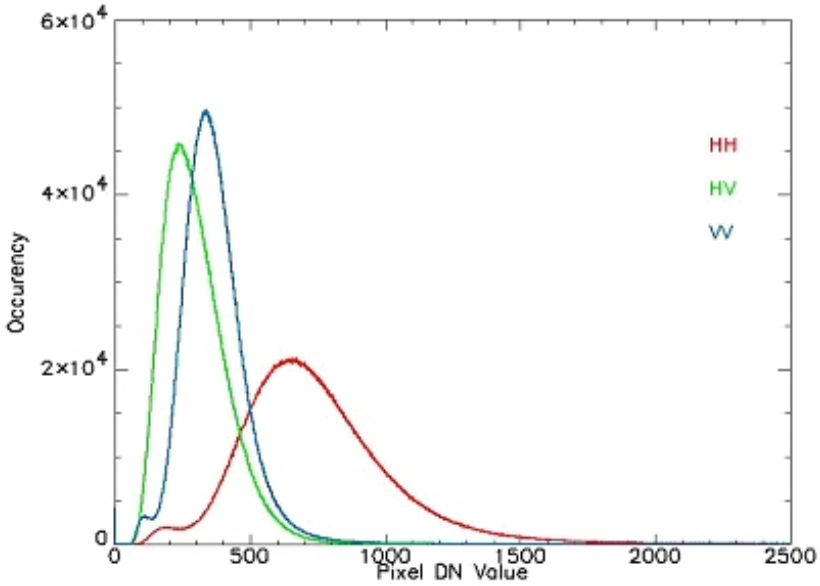


FIG. 5.13 – Histogrammes des données HH, VV et VH

Les profils spatiaux définis sur la composition colorées des images ERS-2 VV, ASA-APP HH et HV, acquises le 19/08/02 à une demi heure d'intervalle, tendent à confirmer les observations formulées par Nghiem *et al.* (2000) sur l'intérêt de combiner les variations de rétrodiffusion dans différentes polarisations. Les données ont été centrées pour rendre comparables leurs dynamiques respectives.

Le signal polarisé HH est moins rétrodiffusé par les surfaces inondées que les signaux polarisés HV et VV (fig. 5.14). On peut également noter une dynamique beaucoup plus importante de la polarisation HH. Ainsi, l'utilisation de ce type de données apparaît très efficace pour la cartographie des surfaces en eau, qu'il s'agisse de plans d'eau permanents ou de champs d'inondation.

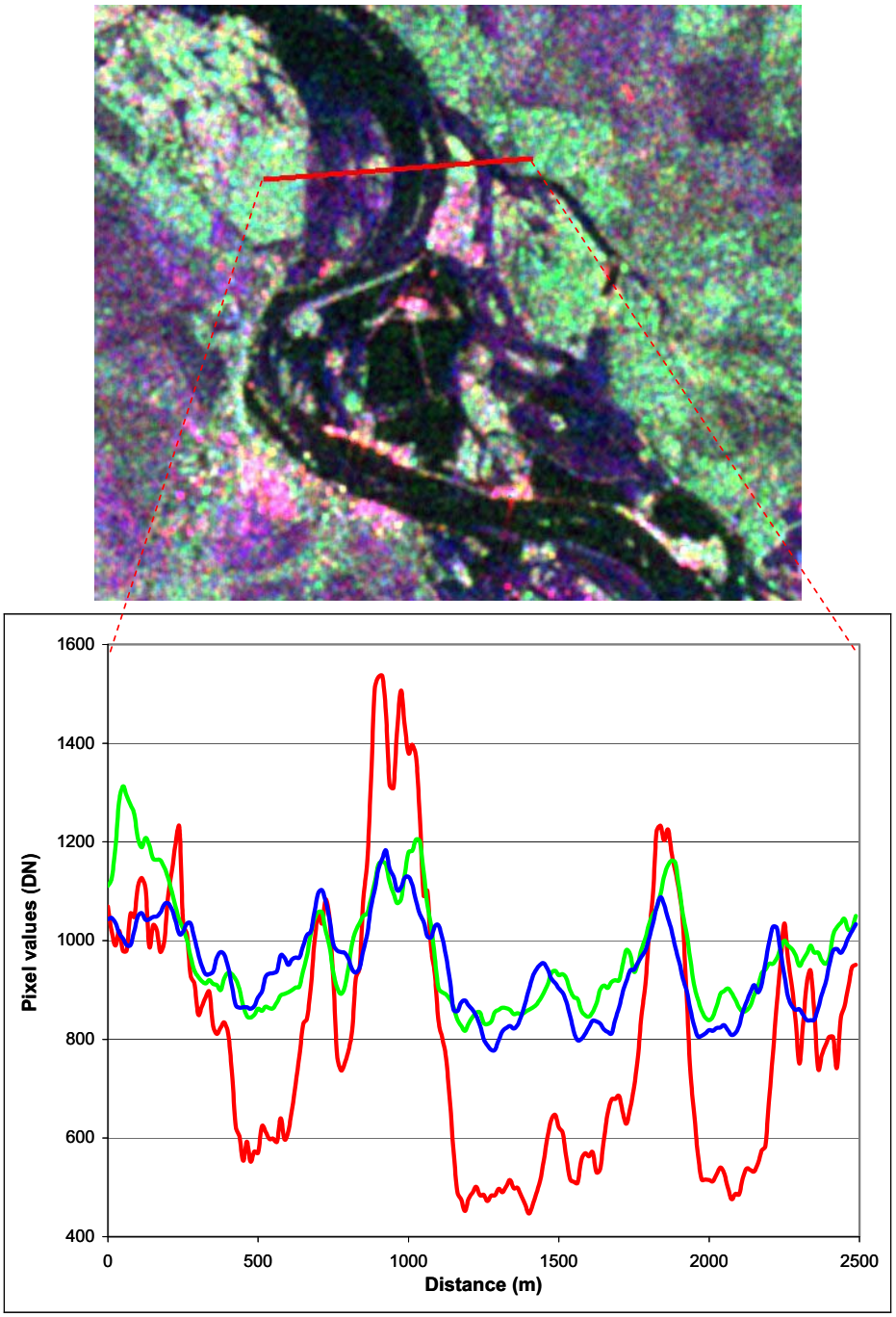


FIG. 5.14 – Localisation du profil spatial sur la composition colorée d'images filtrées Gamma-MAP Rouge : APP HH ; Vert : APP HV ; Bleu : PRI VV

5.4.3 Extraction des surfaces en eau

Une cartographie des surfaces en eau permanente et inondées est réalisée pour chaque image afin d'évaluer les capacités de chacune des polarisations, d'un point de vue surfacique et quantitatif. Les emprises des zones inondées sont dérivées par simple seuillage de l'image filtrée (fig. 5.15), puis comparées entre elles et à l'image Landsat, notamment pour vérifier la pertinence de l'extraction.

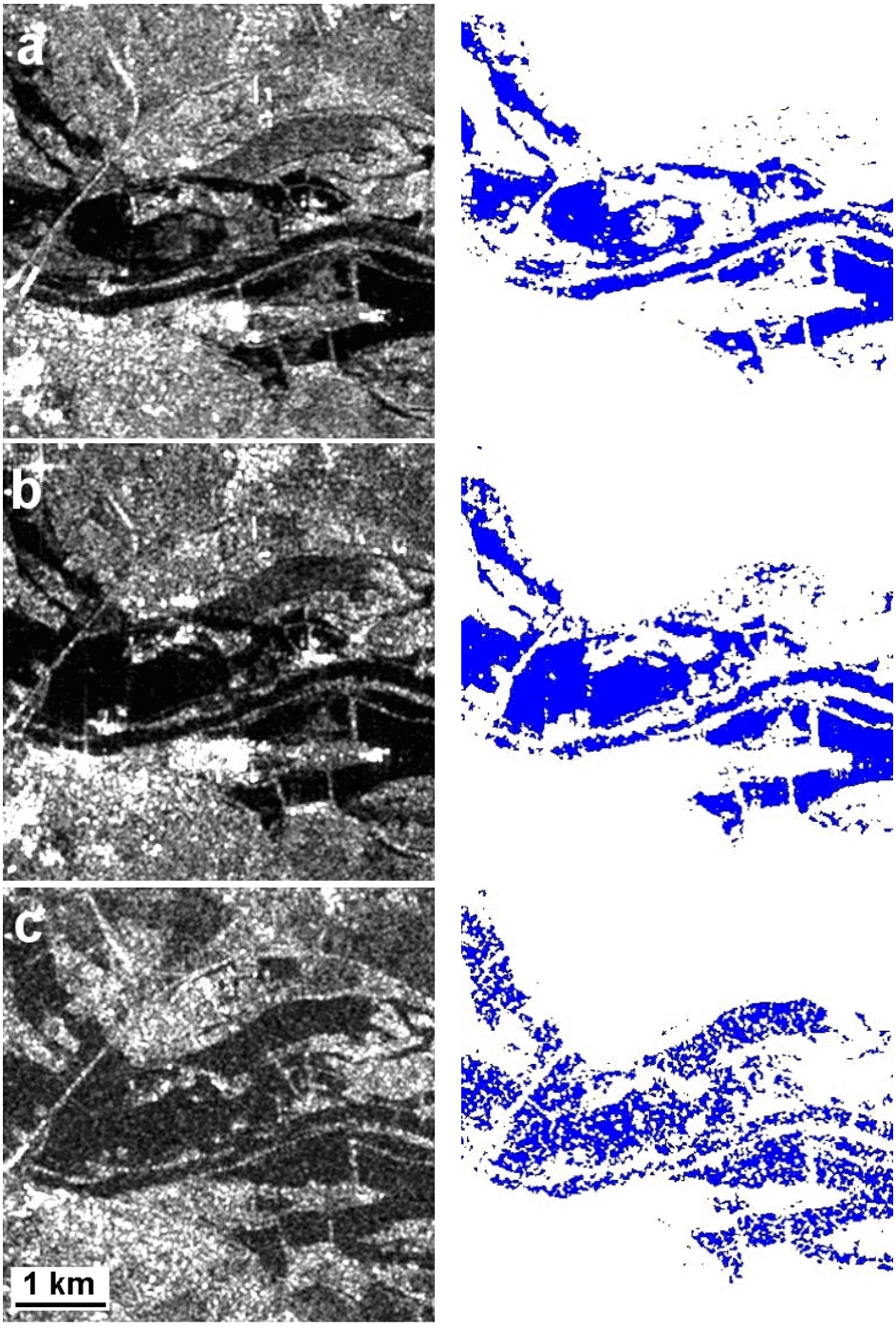


Fig. 5.15 – Inondation observée et extraite en polarisation VV (a), HH (b) et HV (c)

La quantité de pixels inondés dépend de la valeur seuil choisie par l'opérateur, mais aussi de la dynamique de l'image source. En effet, plus elle sera forte (*i.e.* un écart radiométrique important

entre la terre émergée et la surface de l'eau) et moins elle aura d'influence sur la surface extraite (cf. polarisation HH sur la figure 5.14). La photo-interprétation reste le dernier moyen d'assurer la vraisemblance de l'extraction.

Les extractions du champ d'inondation à partir des trois polarisations présentent des différences significatives. En polarisation VV (fig. 5.15a), certaines zones sont omises. Cette absence de détection est liée aux effets de la rugosité de surface, provoquée par le vent et la végétation. Même si la polarisation HH fait apparaître une surface inondée plus importante, un certain nombre de surfaces non-détectées demeurent (fig. 5.15b). On peut d'ailleurs noter qu'elles correspondent à des non-détections en polarisation VV. La polarisation croisée HV fait bien ressortir les surfaces inondées. Par contre, sa faible dynamique radiométrique complique l'extraction numérique. La chute de rétrodiffusion due à la présence d'eau en surface est bien moins nette qu'en polarisation HH par exemple. Finalement, un chatoiement important provoquant une multitude de pixels non-détectés, génère un champ d'inondation discontinu (fig.5.15c).

Ces observations sur l'aspect des images sources et des champs d'inondation, qui en sont extraits, sont complétées par un inventaire du nombre de pixels détectés par chaque polarisation. Le tableau 5.6 présente une analyse en trois rubriques des nombres de pixels détectés par chaque polarisation et par combinaisons de polarisation. Tout d'abord, les surfaces obtenues par seuillage de l'image filtrée (les valeurs de seuil se rapportent aux histogrammes représentés par la figure 5.13) sont très semblables pour les deux polarisations HH et HV. Les non-détections dues à la rugosité sur la première donnée sont globalement compensées par les effets de la faible dynamique de la seconde. La polarisation VV affiche une surface inférieure de près de 20% aux deux autres, illustrant numériquement les effets des non-détections sur l'ensemble du champ cartographié.

Polarisation (seuils)	**Nombre de pixels détectés**	**Superficies (ha)**
HH (300)	264355	4130
HV (150)	262810	4106
VV (200)	211612	3306
Polarisations	**Pixels communs**	**Superficies (ha)**
HH/HV/VV	123923	1936
HH/VV	49912	780
HV/VV	14882	232
HH/HV	61855	966
Polarisations	**Pixels détectés par une seule polarisation**	**Superficies (ha)**
HH	28665	448
HV	62150	971
VV	22895	358

Tab. 5.6 – Complémentarité des polarisations pour l'inventaire des surfaces inondées

Le croisement de ces trois champs d'inondation permet ensuite de s'intéresser aux correspondances entre chaque polarisation. D'une part, la surface détectée commune aux trois images est inférieure à 50% de la surface détectée avec une seule polarisation (1936 ha contre 4100 ha environ pour HH ou HV). Cette observation tend à mettre en évidence les contributions individuelles de chaque polarisation, notamment par la mise en relation des parties inférieures et supérieures du tableau 5.6. On peut noter que les pixels identifiés inondés par une seule

polarisation représentent de 10 à 25% des pixels détectés (360 ha contre 3300 pour VV, 970 contre 4100 pour HV). D'autre part, les combinaisons deux à deux présentent des résultats assez disparates ; elles mettent en évidence une forte divergence entre HV et VV, mais soulignent une bonne complémentarité des polarisations HH et HV, confirmée par les valeurs obtenues dans les deux autres rubriques.

Ces extractions sont finalement comparées à l'image Landsat acquise le jour suivant (20/08/02). Sur une zone de contrôle réduite (environ 20×20 km) et malgré un intervalle de 24 heures, une très bonne concordance est observée entre le champ d'inondation obtenu à partir de l'image optique et le champ obtenu par la combinaison :
- des trois polarisations : plus de 90% de pixels communs,
- des polarisations HH et HV : près de 85%,
- des polarisations HH et VV : près de 75%.

5.4.4 Conclusions de l'analyse thématique

Conformément aux observations formulées sur le profil radiométrique précédent (fig. 5.14), l'ensemble de ces analyses surfaciques démontre l'efficacité des cartographies de champs d'inondation réalisées avec la polarisation HH. Malgré tout, elle est utilement complétée par la polarisation croisée HV, qui constitue un apport non négligeable (Baghdadi *et al.*, 2001). On peut donc conclure que :
- la détection des surfaces inondées en polarisation VV peut être fortement perturbée par la rugosité induite par le vent, et ainsi provoquer des omissions importantes dans la description du champ d'inondation ;
- la polarisation HH apporte une information pertinente quant à la présence d'eau en surface, mais elle n'est pas complètement exempte des effets du vent ;
- enfin, la polarisation croisée constitue un très bon outil de cartographie des surfaces inondées, mais elle est fortement pénalisée par une dynamique radiométrique faible, limitant les traitements numériques.

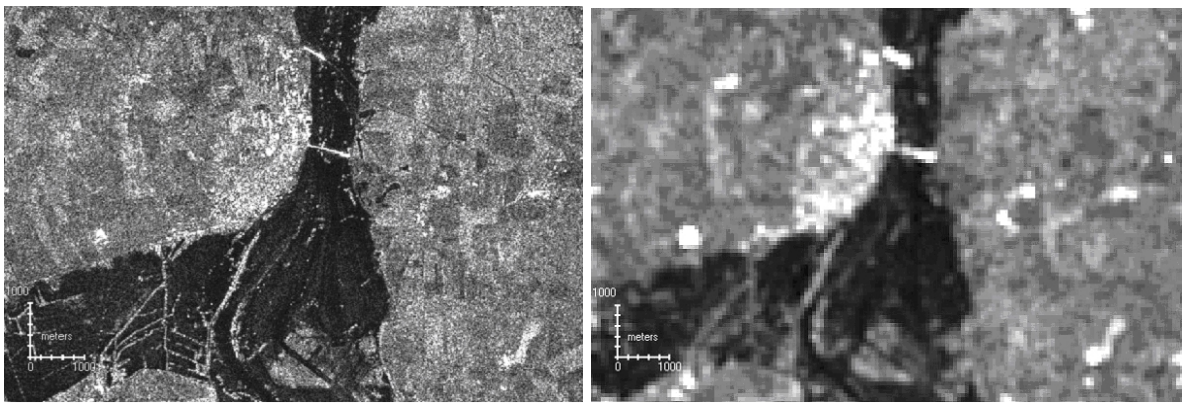
Ces conclusions permettent de formuler un avis motivé sur l'utilisation des différents modes d'acquisition de l'ASAR pour la cartographie d'inondations. La polarisation alternée (AP) est un outil particulièrement bien adapté à ce type d'applications, notamment par la combinaison de polarisations parallèle et croisée. Ainsi, l'analyse complémentaire de ces deux données permet de réduire les risques de non-détection. Pour une cartographie à partir d'une seule polarisation (mode IM), cette étude montre que la configuration horizontale (HH) est plus efficace que la verticale (VV), bien qu'elles soient toutes deux plus ou moins influencées par le vent.

5.5 Influence de la résolution spatiale

Selon le mode de fonctionnement de l'ASAR, les fréquences de revisite peuvent être améliorées, répondant alors mieux aux exigences du suivi des inondations. Les modes Champ Large (WS, *Wide Swath*) ou de surveillance (GM, *Global Monitoring*) mériteraient d'être testés, même si leurs résolutions spatiales semblent ne les destiner qu'à des événements d'ampleur très importante.

De plus, l'aspect temporel n'est pas applicable aux données *Medium Resolution* issues d'un traitement différent des mêmes données brutes que les images à haute résolution (IMP ou APP). De fait, le gain de ces produits se situe uniquement sur la résolution radiométrique et leur faible volume, et non sur leur fréquence de réactualisation (au mieux 3-4 jours) ni sur leur couverture géographique (56-100 km de fauchée).

Les données à moyenne résolution apparaissent parfaitement exploitables pour la cartographie d'extension de crue. Sur la crue de l'Elbe, des images IMM et APM ont été produites à partir des acquisitions du 19/08/02 (fig. 5.16). L'image IMM, à 150 m de résolution, couvre un très vaste territoire, du centre de l'Allemagne aux côtes de l'Adriatique (soit près de 1200 km par 100 km). Ainsi, pour un volume de données réduit, le niveau de traitement *Medium Resolution* permet de réaliser des cartes sur de très vastes territoires, avec des temps de calculs drastiquement réduits.



(a) IMP (b) IMM

Fig. 5.16 – Comparaison des produits IMP et IMM

L'extraction du champ d'inondation s'est révélée être une étape rapide et efficace grâce à la haute résolution radiométrique du produit IMM, ne nécessitant pas de filtrage avant l'interprétation. La comparaison des champs extraits des images IMP et IMM permet d'évaluer l'impact de la résolution spatiale sur le résultat final (fig. 5.17). Les principales zones inondées sont bien identifiées mais la précision de la limite demeure faible (1 à 2 pixels, soit une centaine de mètres). La figure 5.17 illustre l'effet des mixels (pixels de mélange) en bordure de champ d'inondation et l'importance de la valeur de seuil choisie par l'opérateur (Brown *et al.*, 1998). Les données en polarisation (APP et APM) alternée se prêtent aux mêmes observations.

Ainsi, ce type de produits semble adapté à la cartographie d'événements de grande ampleur, affectant une zone très étendue, qui doit cependant avoir une configuration géométrique et une orientation qui se prêtent à une telle acquisition (cf. fig. 5.3 illustrant l'emprise des données IMM et APM). Il peut être suffisant dans les zones naturelles ou agricoles, où les enjeux sont plus faibles, pour fournir une première évaluation d'impact. Par contre, même en première évaluation, il est nettement insuffisant en zone urbaine. Une incertitude d'une centaine de mètres sur la limite de l'extension de l'inondation génère une incertitude considérable sur le nombre de bâtiments et d'habitants touchés. Sur ces zones, il est souhaitable de disposer de l'information la plus fine et résolue possible pour envisager efficacement les moyens à mettre œuvre.

5.6 Conclusions

D'une ampleur sans précédent connu dans la région, les inondations d'août 2002 de l'Elbe et de ses affluents ont très durement touché l'Allemagne, et notamment la région de Dresde. Encore dans sa phase de calibration, le radar ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), embarqué à bord du satellite ENVISAT, fournit ses premières images en période de crue et de crise. Cet événement est l'occasion de tester les nouvelles capacités de l'ASAR grâce aux produits images à haute et moyenne résolution géométrique, en mono- et bi-polarisation. La base de données est complétée par des images ERS, en référence d'une part et en données de crise d'autre part, et

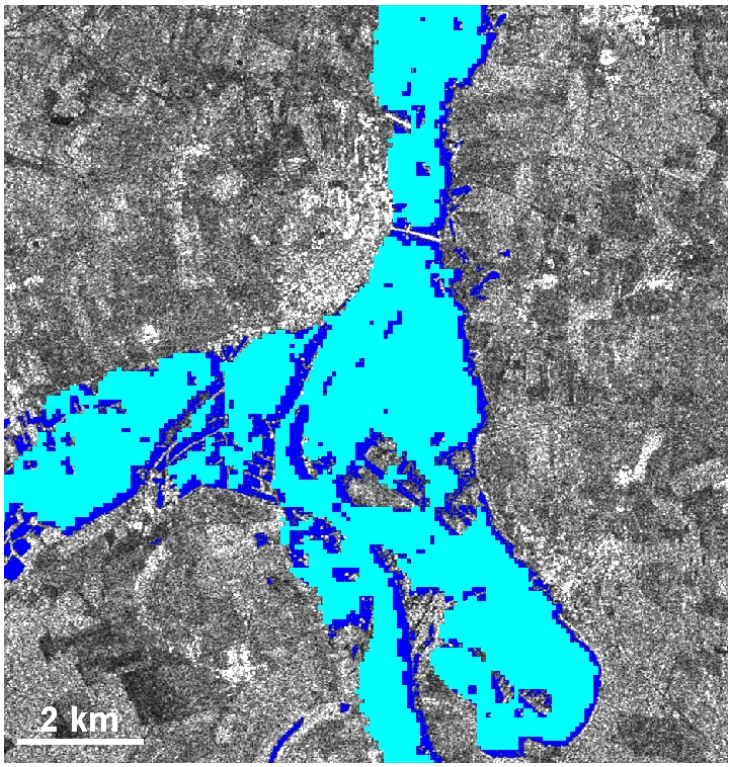


FIG. 5.17 – Comparaison de l'extraction de l'inondation avec en bleu clair les surfaces communes IMP/IMM et en bleu foncé la détection sur l'IMP seule

des données optiques SPOT et Landsat. Un des points particuliers de cet ensemble est la demi heure d'intervalle entre une acquisition ERS-2 et l'image en polarisation alternée de l'ASAR, le 19/08/02.

Une analyse de la résolution radiométrique des différents produits disponibles est d'abord proposée. Elle montre que les spécifications sont atteintes pour les produits à haute résolution, alors qu'en moyenne résolution les valeurs obtenues sont bien inférieures, jusqu'à la moitié des spécifications. Ces résultats sont expliqués par la période d'acquisition, où l'instrument n'était pas encore pleinement opérationnel. Une modification des paramètres d'acquisition et de traitement a considérablement amélioré la qualité radiométrique des images. Ceci a pu être constaté sur des données plus récentes, qui montrent de bien meilleurs résultats.

Puis, une pseudo calibration est réalisée pour évaluer le comportement des données à haute résolution sur des échantillons de différentes classes d'occupation du sol. Cette analyse illustre les différences de résolutions radiométriques entre les différents produits d'imagerie de la base de données. Elle met aussi en évidence la complémentarité des différentes polarisations disponibles (HH et HV pour ENVISAT, VV pour ERS-2).

Du point de vue thématique une appréciation qualitative de l'adéquation des différentes polarisations est proposée pour les grands thèmes d'occupation du sol (eau, forêt, agricole, urbain). Pour l'eau, la démarche est complétée par l'analyse de l'extraction de la surface inondée à partir de chacune des acquisitions ERS et ENVISAT du 19/08/02. La comparaison des différentes surfaces inondées obtenues montre que la polarisation VV est fortement influencée par les effets de rugosité induits par le vent et la végétation partiellement submergée. La polarisation HH fournit de meilleurs résultats mais n'est pas exempte des mêmes effets que la VV. Enfin, la

polarisation HV apparaît comme un contributeur fort à la délimitation de l'extension de l'inondation, mais nécessite une importante part d'interprétation manuelle. L'image Landsat, acquise un jour après les données radar, fournit une base de contrôle validant les résultats. Finalement, il semble que l'usage de deux polarisations (croisée et parallèle) constitue une solution efficace de cartographie d'inondations à partir d'une acquisition pendant l'événement. Cette conclusion est d'ailleurs confirmée avec une acquisition ultérieure sur le Luxembourg (cf. chapitre précédent), en polarisations VV et VH.

Les images à moyenne résolution sont produites à partir des mêmes données sources que les images à haute résolution. Elles n'impliquent donc pas d'augmentation de la fauchée, ni de la fréquence de revisite. Par contre, elles mobilisent un volume de données réduit et présentent une qualité radiométrique élevée. Cependant, la résolution géométrique de ces produits les rend peu adaptés à la problématique de la cartographie des inondations de plaine, du moins pour une large majorité des cours d'eau européens. Leur utilisation semble donc se limiter à l'établissement d'une première évaluation d'impact, localisant approximativement l'extension de l'inondation, et par conséquent peu adaptée aux zones urbaines.

Avec ses différents modes de fonctionnement, le radar du satellite ENVISAT ouvre de vastes perspectives pour la description du territoire. La cartographie rapide des surfaces submergées par une crue ne constitue qu'une application parmi d'autres. Malgré tout, la problématique globale des risques naturels est une préoccupation majeure des autorités nationales et internationales. L'instrument ASAR ressort de cette étude comme un outil capable de proposer des réponses efficaces à cette problématique, et les efforts engagés d'évaluation, d'intégration et d'exploitation doivent être poursuivis et renforcés, notamment avec ses autres modes de fonctionnement.

Ce chapitre a illustré des conditions d'utilisation des images de l'ASAR sur la thématique de la cartographie des inondations. L'information sur l'extension de l'inondation est utile aux gestionnaires de la crise, tout comme aux modélisateurs (cf. chapitre précédent). Mais elle est aussi utile après l'événement pour évaluer les impacts, aussi bien en termes financiers et matériels qu'humains. Cette étape d'évaluation des dommages nécessite de décrire les paysages et leur évolution au cours du temps, ainsi que de disposer d'une information sur la répartition des populations touchées.

5.7 Bibliographie

Baghdadi N., Bernier M., Gauthier R., Neeson I., 2001, Evaluation of C-Band SAR data for wetlands mapping, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (1), 71-88.

Bally P., Fellah K., 1995, Evaluation of the accuracy of the backscattering coefficient measurement in SAR data products, *Technical Note, ESA, Earth Sciences Division*, 36.

Brown R.E., Zmuda A.D., Slater J., Corr D., Rast M., Stuttard M., 1998, Flood and soil moisture monitoring in the UK using Radarsat, *Proceedings of ADRO RADARSAT*, Montréal, 10.

Desnos Y.-L., Buck C., Guijarro J.-L., Suchail J.-L., Torres R., Attema E., 2000, ASAR – Envisat's Advanced Synthetic Aperture Radar, Building on ERS achievements towards future Earth watch mission, *ESA Bulletin*, No. 102, 91-100.

Desnos Y.-L., Laur H., Lim P., Meisl P., Gach T., 1999, The ENVISAT-1 Advanced Synthetic Aperture Radar processor and data products, *Proceedings of IGARSS'99*, Vol. 3, 1683-1685.

EQECAT, 2002, Central European flooding, August 2002, Technical Report, ABS Consulting, 23 p.

ESA, 1990, Study of microwave interaction with the Earth's surface, *Active Microwave Remote Sensing of Vegetation*, Vol. II, ESA/ESTEC, Contract Number 8447/89/NL/PB(SC), 159-178.

ESA, 2002, ASAR product handbook, 543 (http ://envisat.esa.int/dataproducts/).

Fellah K., 1995, The impact of the observation scale in hydrological applications of SAR data, ESA-ESTEC/VRL, Earth Sciences Division, Land/Surface Unit, Stagiaire Report, 35.

Fellah K., Stock N., Axès F., Bach H., Ebel U., Grabak O., de Fraipont P., 2003, Toward an operationnal EO service for flood management, *Proceedings of IGARSS'03*.

Hawkins R.K., Attema E., Crapolicchio R., Lecomte P., Closa J., Meadows P.J., Srivastava S.K., 1999, Stability of Amazon backscatter at C-band : spaceborne SAR results from ERS-2 and RADARSAT-1, *CEOS SAR Workshop*, ESA-CNES, 26-29 October, Toulouse.

Hess L.L., Melack J.M., Filoso S., Wang Y., 1995, Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 33 (4), 896-904.

Joughin I.R., Percival D.B., Winebrenner D.P., 1993, Maximum likelihood estimation of K-distribution parameters for SAR data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 31 (5), 989-999.

Laur H., Kohlhammer G., Desnos Y.L., Coulson S., 2002, The ENVISAT mission : access to the data, *Proceedings of IGARSS'02*.

Lee J.S., Grunes M.R., Pottier E., 2001, Quantitative comparison of classification capability : fully polarimetric versus dual and single-polarization SAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39 (11), 2343-2351.

Lopez A., Nezry E., Touzi R., Laur H., 1993, Structure detection and statistical adaptative speckle filtering in SAR images, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14 (9), 535-544.

Meadows P., Wright P., 2002, ASAR IMP image quality (VV polarization), *Proceedings of the Envisat Calibration Review*, ESA SP-520.
Nghiem S.V., Liu W.T., Tsai W.-Y., Xie X., 2000, Flood mapping over the Asian continent during the 1999 summer monsoon season, *Proceedings of IGARSS'00*, Vol. 5, 2027-2028.

Rosich B., 2002, IM and WS modes Level 1 Product quality update, *ASAR Validation Review*, ESRIN, 11-12 december, http ://envisat.esa.int/workshops/.

Rosich B., Zink M., Torres R., Closa J., Buck C., 2003, ASAR instrument performance and product status, *Proceedings of IGARSS'03*.

Ulaby F.T., Elachi C., 1990, *Radar polarimetry for geoscience applications*, Artech House, 364.

Wang Y., Davis F.W., 1997, Decomposition of polarimetric synthetic aperture radar backscatter from upland and flooded forests, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18 (6), 1319-1332.

Xia Z.G., 1996, Applications of multi-frequency, multi-polarization and multi-incident angle SAR systems in urban land use and land cover mapping, *Proceedings of IGARSS'96*, Vol. 4, 2310-2314.

Références Internet

(EURIMAGE@), http ://www.eurimage.com

(SPOT IMAGE@), http ://www.spotimage.fr

(Dresdner@), http ://www.die-dresdner.de

(ENVISAT@), http ://envisat.esa.int

(EOMD@), http ://www.eomd.esa.int

(USGS@), http ://www.usgs.gov

Chapitre 6

Impact des inondations et analyse de vulnérabilité

Ce dernier chapitre s'intéresse à la phase de prévention, d'analyse a posteriori *d'événements historiques. Le suivi de l'urbanisation sur près de quarante ans à partir de données spatiales propose une vision des carences en matière d'aménagement et de prise en compte d'aléas naturels connus. L'utilisation du recensement national a été l'occasion de s'intéresser aux impacts des inondations sur les concentrations de population. La donnée spatiale intervient alors pour fournir une base géographique, plus adéquate que le découpage communal, à la distribution spatiale de cette variable. Cette partie de l'étude cherche à développer et à mettre en place des outils originaux pour l'analyse d'événements historiques et la prévention de leurs conséquences sur les biens et les personnes.*

6.1 Problématique et objectifs

Les capacités des techniques spatiales d'acquisition et d'analyse ont été développées au cours des chapitres précédents pour obtenir des informations sur l'aléa inondation, utilisables tant avant que pendant l'événement. Mais depuis de nombreuses années, les données d'observation de la Terre ont prouvé leur aptitude à décrire, dans l'espace et dans le temps, le paysage et l'occupation du sol. Ces informations fournissent les éléments nécessaires à la localisation et à une caractérisation des enjeux.

La description et le suivi de l'évolution du paysage en termes d'occupation du sol, voire d'utilisation du sol, sont susceptibles d'apporter une information pertinente à l'étude de l'impact d'une inondation, que la cartographie de son extension provienne d'un modèle ou d'une observation satellitaire. Cette dernière phase du processus de gestion du risque d'inondation consiste alors à valoriser les informations acquises sur une zone par tous les moyens disponibles.

Depuis près de quarante ans, les données spatiales d'observation de la Terre existent, mais n'ont pas été toujours accessibles. La déclassification d'images de systèmes militaires permet d'accéder à une information ancienne sur l'extension des zones urbaines vulnérables et d'analyser sur une longue période leurs évolutions, au regard d'inondations historiques de référence. Face aux inondations, les biens immobiliers ne sont pas les seuls vulnérables. Recensées périodiquement, les populations des zones vulnérables ne sont pas toujours localisables finement. En accédant à une description plus ou moins détaillée du paysage urbain, les données d'observation de la Terre offrent une vision de la densité des villes et la possibilité d'évaluer le nombre de personnes concernées par une inondation.

Finalement, la question principale que pose cette phase d'évaluation d'impacts et d'analyse de vulnérabilité est celle de la capacité de l'observation de la Terre à fournir des indicateurs pertinents sous forme d'une information spatialisée, synchrone et à jour sur les enjeux, pris au sens des biens comme des personnes.

Réalisée dans le cadre du projet PACTES (Prévention et Anticipation des Crues au moyen des TEchniques Spatiales, décrit en annexe B.1), cette partie de l'étude exploite des données d'origines variées (spatiales, cartographiques, tabulaires) pour apporter des éléments de réponse à la problématique de l'évaluation des impacts des inondations. Elle vise notamment à :
- caractériser l'évolution temporelle des impacts d'inondations de référence sur les zones urbaines, où se concentrent l'essentiel des biens vulnérables,
- évaluer le nombre et la répartition spatiale des habitants se trouvant dans les zones susceptibles d'être inondées par ces mêmes inondations de référence.

Ces deux objectifs rejoignent les préoccupations des services d'intervention tels que la Sécurité Civile : la protection des biens et des personnes. Ainsi, l'analyse d'événements *a posteriori* ou *a priori* sert, sous un point de vue différent de ceux exposés dans les précédents chapitres, les intérêts des phases de gestion de crise et d'anticipation.

Ce chapitre aborde d'abord la construction de la base de données géographiques sur la Moselle française, avant d'en présenter l'exploitation pour évaluer les impacts de crues historiques sur les zones urbaines et leur évolution au cours des quarante dernières années. Enfin, une méthode de spatialisation des populations est proposée pour fournir une évaluation de l'impact de ces crues sur les personnes.

6.2 Constitution de la base de données

La base de données constituée sur le secteur de la Moselle de Metz à Thionville comporte des données déclassifiées CORONA, une série temporelle d'images SPOT, des images optiques et radar à très haute résolution géométrique et enfin, un jeu de données cartographiques complémentaires provenant des base de données IGN et INSEE. Un jeu de données RSO (essentiellement ERS mais aussi RADARSAT et J-ERS) est également intégré et analysé mais leur exploitation n'est pas traitée dans ce chapitre.

6.2.1 Le site de la Moselle

Le bassin de la Moselle a été retenu par le programme PACTES pour l'étude des crues de plaines et pour sa dimension transnationale. Ce bassin a connu des crues importantes au cours du siècle dernier, et notamment celles de 1947 et 1983.

6.2.1.1 Caractéristiques du bassin

Le bassin versant de la Moselle couvre 4686 km^2 et deux départements (Moselle, Meurthe-et-Moselle). En amont de Nancy, la vallée est assez étroite et encaissée ; la Moselle y décrit alors de nombreux méandres. L'élargissement s'amorce à une trentaine de kilomètres en aval de Nancy. A Metz, la rivière forme plusieurs bras dans une plaine alluviale qui demeure large. Le relief de cuestas impose au bassin versant une géométrie disymétrique, plaçant la quasi-totalité des affluents à l'Est de la Moselle (Hubert, 2000).

Du point de vue climatique, le bassin de la Moselle est soumis à un climat océanique à tendance continentale. L'affaiblissement des influences océaniques contribue à régulariser le régime pluviométrique annuel et atténue l'amplitude thermique annuelle. Les conditions météorologiques

présentent malgré tout en Lorraine une certaine stabilité. On retiendra notamment la persistance en saison froide de temps anticycloniques continentaux ; ceux-ci peuvent être responsables de longues périodes froides et sèches, qui provoquent dans certains cas une rétention nivale et des étiages exceptionnels. De même en saison chaude, l'installation d'anticyclones peut entraîner un fort déficit pluviométrique et une évaporation qui provoquent une sécheresse marquée et des étiages prononcés. Enfin, la persistance "peu fréquente, en saison froide, de types de temps à crues par courants perturbés (...) est à l'origine d'épisodes pluvieux, de séries d'averses durables, génératrices de crues parfois très fortes, affectant à des degrés divers la totalité du bassin" (Frécaut, 1972).

6.2.1.2 Hydrologie du bassin

Le régime de la Moselle est assez simple : hautes eaux en période froide (de novembre à avril) et basses eaux de saison chaude (de mai à octobre). Le débit moyen mensuel maximum se situe au mois de janvier.

Le régime du cours d'eau est qualifié de pluvio-évaporal océanique puisque les précipitations sont assez bien réparties sur l'ensemble de l'année. Ainsi les variations mensuelles de débit sont davantage attribuables à des variations thermiques qu'à des variations pluviométriques, les températures estivales pouvant provoquer certaines années une évaporation intense ayant pour conséquence des étiages prononcés.

6.2.1.3 Aménagements hydrauliques

La vallée de la Moselle a été fortement industrialisée au XIXe siècle et demeure encore aujourd'hui une zone à forte concentration humaine et économique. Cette présence a amené toute une série d'aménagements (digues, canaux, gravières...) qui ont fortement modifié les caractéristiques d'écoulement.

L'installation des premiers grands aménagements débute entre 1867 et 1876 avec l'aménagement de la Moselle, au gabarit Freycinet (ou petit gabarit), de Frouard à Metz. Puis, en parallèle à l'essor de la métallurgie, c'est au tour du Canal des Mines de Fer de la Moselle, ou CAMIFEMO, de voir le jour. Il s'agissait d'un canal à gabarit moyen puisqu'il permettait la navigation de bateaux de plus de 350 tonnes et d'un tirant d'eau de 2.2 m. Enfin, la canalisation de la Moselle à grand gabarit (bateaux de 3000 tonnes) fut lancé en 1956 avec la Convention de la Moselle ; cette canalisation a atteint Metz en 1965 et Frouard en 1972.

La plupart des aménagements anciens de la Moselle n'existent plus en tant que tels car ils ont été intégrés depuis par le cours d'eau et lui ont ainsi conféré sa dynamique particulière. Si les aménagements comme les gués ont disparu depuis longtemps, d'autres comme les pontons d'embarcadères ou les ponts subsistent toujours. Des dérivations, ainsi que des barrages construits au XIXe siècle en amont de Metz destinés à l'alimentation de l'ancien canal latéral de la Moselle, existent encore et leur tracé est aujourd'hui réemprunté par le canal à grand gabarit. Parmi les aménagements plus anciens, on peut également mentionner l'implantation de la voie ferrée ainsi que de certains sites industriels à hauteur de Metz. Ces derniers ont eu pour conséquence de délimiter un nouveau lit majeur et de restreindre les champs d'inondation. Enfin, les villes et les quelques plans d'eau présents autour de Metz bouclent cette liste d'aménagements anciens qui n'ont guère de rôle prédominant sur la dynamique fluviale de la Moselle tant leur implantation était discrète et légère.

Par contre les nouveaux aménagements, à l'inverse des anciens, participent activement à la dynamique fluviale actuelle de la Moselle. Leur impact, en particulier dans le lit majeur, est

important notamment quand ceux-ci limitent l'étalement des eaux de crues. On peut inventorier parmi ces derniers, le canal à grand gabarit, les autoroutes, les zones commerciales et industrielles et les gravières. A la hauteur de l'agglomération messine, un contrôle sévère de la Moselle est ainsi assuré par la présence de digues, de berges relevées et de ponts. Le rétrécissement du lit majeur est amorcé dès le Sud de Metz où la Moselle est longée par les grands axes de communication (routes, autoroutes, voies ferrées) en aval de l'agglomération. La présence de gravières dans le fond alluvial a également tendance à contraindre de manière significative l'espace initialement disponible pour l'étalement des eaux de débordement. La contrainte exercée par ces gravières a été aggravée durant cette dernière décennie, même si des mesures ont depuis été prises par les services en charge de leur gestion.

En parallèle, d'autres structures ont été développées dans le lit mineur du cours d'eau. On retiendra notamment les enrochements, surmontés de digues, pour alimenter en eau le canal de navigation et les barrages associés à une micro-centrale électrique. L'ensemble de ces structures a très souvent eu des impacts sur les champs d'inondation en réduisant les possibilités de débordement de la rivière, notamment dans les périmètres habités.

Selon la DIREN Lorraine (1996), les dégâts provoqués en zones agricoles coûteraient près de 2000 euros/ha alors qu'en zones urbaines ou industrielles, leurs montants s'élèveraient respectivement à 525000 euros/ha et 135000 euros/ha. La forte présence humaine et les besoins de navigation engendrent une réduction des espaces disponibles à l'étalement des crues. Toutes ces implantations ont eu pour conséquence de réduire le champ d'inondation de 32.2%, entre la confluence de la Meurthe et Metz ($\sim$40 km). Du fait de la canalisation et des recoupements de méandres, la longueur du cours de la Moselle a été réduite sur l'ensemble du tracé qui va de la confluence de la Meurthe à Apach, et une perte de près de 46 km^2 de zones submersibles a été observée (Hubert, 2000). Toutes ces modifications ont un rôle important dans les conséquences des fortes crues qui affectent certaines portions du bassin.

6.2.1.4 Les grandes crues de la Moselle

L'inondation de décembre 1947, ainsi que sa genèse météorologique, est largement décrite par Baulig (1950). Il montre notamment que les importantes précipitations, dépassant 100 mm en une journée dans les Hautes-Vosges, sont tombées sur des sols saturés et ont ruissellé en totalité. A cela s'ajoute un redoux, de 6 à 8 $^\circ$ C, provoquant la fonte du manteau neigeux, présent dès 600 m d'altitude. Cette crue de la Moselle a été longue en raison des faibles pentes du cours d'eau et de la superposition des multiples apports de ses affluents. La crue s'est déplace à 8 km.h^{-1} en moyenne. Par la présence des divers aménagements et ponts, le niveau de la Moselle a atteint près de 8.90 m à Metz, soit 1.70 m de plus que les hauteurs jamais observées. "L'Ile Saint-Symphorien était totalement inondée ; le théâtre et la Préfecture isolés. On circulait à bord de barques (...), les maisons et les ponts s'effondraient. Des gens ont été sauvés de justesse" raconte le Républicain Lorrain. Les dégâts furent colossaux : rien que pour la ville de Metz, 3000 foyers furent sinistrés et le bilan fût estimé à 453 millions de francs. C'est l'une des crues les plus importantes répertoriées sur la Moselle ; elle fait figure de scénario catastrophe si elle se reproduisait.

Trois grands épisodes pluvieux, répartis de décembre 1982 à mai 1983, ont provoqué des crues exceptionnelles en Alsace et en Lorraine. Letouze (1985) classe ces événements dans la catégorie des situations hydrologiques hivernales, y compris pour celle du mois de mai, notamment à cause du caractère prolongé des phénomènes dépressionnaires généralisés sur la majeure partie de la France. Des précipitations inhabituelles sont à l'origine de ces crues, renforcées en avril 1983 par la fonte des neiges vosgiennes. Une analyse complète de ces différentes situations météorologiques et climatologiques est proposée par Paul et Roussel (1985), utilement complétée par Dégardin (1985) qui décrit le déroulement hydraulique des crues.

6.2.2 Données CORONA

Ces données, commercialisées par l'USGS (*United States Geological Survey*), ont été acquises sous forme de tirages photographiques papier. Une première étape de numérisation des bandes de clichés est donc nécessaire avant d'envisager les pré-traitements géométriques.

6.2.2.1 Numérisation

La numérisation des clichés (tab. 6.1 et fig. 6.1) est effectuée à une résolution de 11.5 μm/pixel, soit 2200 dpi. Ce choix de résolution est conforme aux données disponibles sur la résolution du film (Mac Donald, 1995) : 50 à 100 L/mm. D'après Kraus et Waldhausel (1998), le pas de scannage théorique est obtenu par la relation 6.1 et est inversement proportionnel au pouvoir résolvant de l'émulsion.

$$\Delta D_{[mm]} < \frac{1}{2.R} \tag{6.1}$$

Ainsi, la résolution du produit scanné est proche de la résolution minimale du produit photographique. Le choix de la limite inférieure est justifié par le peu d'informations disponibles sur les produits exploités. De ce fait, on évite une surestimation de la quantité d'information disponible dans les images et la génération d'artefacts. De plus, des essais de numérisation à des résolutions plus élevées ne montrent pas d'amélioration nette de la qualité de la donnée numérique.

Caméra	Mission	Cliché	Date	Résolution
KH-3	9025	10023 10024 10025	31/10/1961	7-24 m
KH-4A	9045	D41021 FWD D41022 FWD D41027 AFT D41028 AFT D41029 AFT	30/09/1962	6-15 m

Tab. 6.1 – Données CORONA exploitées

6.2.2.2 Traitements géométriques

Divers essais de transformations (polynomiales, fonctions non-linéaires locales...) ont mis en évidences les faiblesses géométriques de ces données. Par conséquent, le calcul en bloc est retenu, par la méthode de l'aérotriangulation par faisceaux. Cette méthode est couramment employée en photogrammétrie sur des blocs de photos aériennes à but cartographique. Elle est cependant poussée à ses limites en l'appliquant à ce type de données, obtenues par balayage et dont les modèles géométriques sont inconnus. A l'heure actuelle, seul un modèle géométrique pour le système ARGON (KH-5) a été proposé par Zhou *et al.* (2002).

Les résultats obtenus sont plutôt satisfaisants, compte tenu de la qualité des mesures d'entrée : orientations interne et externe inconnues, difficulté de saisie des points de calage à cause de l'intervalle de temps entre les images et les cartes de référence (plus de trente ans !). Le calcul d'aérotriangulation aboutit à une erreur moyenne quadratique globale de 17 mètres, avec sur les points de calage $\sigma_X = 5.1$ m, $\sigma_Y = 3.4$ m et $\sigma_Z = 2.8$ m, notamment grâce à l'utilisation du MNT à 50 m de résolution de la BD Alti IGN. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus

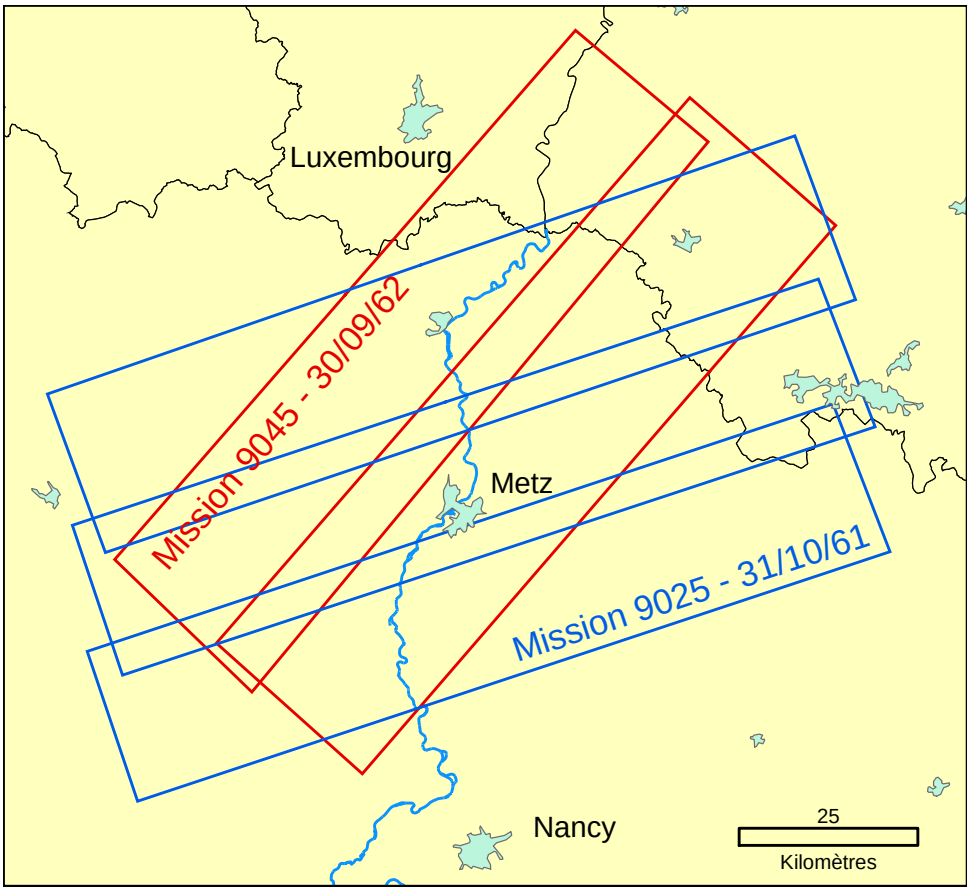


FIG. 6.1 – Emprises des données CORONA sur le secteur Metz-Thionville

par Altmaier et Kany (2002) avec des données KH-4B de 1972 sur le Maroc (2 à 6 m en planimétrie, 12 à 20 m en altimétrie).

Pour parfaire les produits issus de l'aérotriangulation, il a été nécessaire de procéder à une rectification supplémentaire par transformation élastique (*Rubber Sheeting*) par éléments finis (ERDAS, 1999), à partir d'une image SPOT panchromatique à 10 mètres de résolution. En effet, après le calcul d'orientation, la vérification des ortho-images générées par rapport à une image SPOT panchromatique a montré des écarts importants et inégaux, en particulier sur les reliefs (de 50 à 400 m).

La transformation élastique utilise les points saisis par l'opérateur pour définir un réseau de triangles irréguliers. A l'intérieur de chaque triangle, l'image est ajustée grâce à une transformation polynomiale spécifique. De ce fait, chaque triangle définit une correction locale. Un défaut majeur de cette méthode est la création d'artefacts géométriques entre deux triangles lorsque les déformations imposées à l'image diffèrent franchement de l'un à l'autre.

Par conséquent, la globalité de la transformation géométrique ne présente pas une rigueur absolue, loin s'en faut, mais a néanmoins le mérite de produire une donnée en cohérence avec le reste des données image de la base. Les ortho-images sont finalement échantillonnées à 10 m, ce qui les rend compatibles aux données panchromatiques SPOT mais surestime certainement leur résolution effective.

6.2.3 Données SPOT

Le programme PACTES a donné accès à des données SPOT (cf. tab.6.2), au niveau de prétraitement 3A, ou ORTHO. De cette façon, aucune opération de correction des effets dus au relief et à la géométrie d'acquisition n'a été nécessaire et les applications thématiques ont pu être entamées dès leur réception.

Date	Mode
27/06/00	Xi
20/06/00	P
10/10/94	XS
10/10/94	P
03/08/86	XS
01/05/86	P

TAB. 6.2 – Données SPOT sur la Moselle

Les traitements préliminaires à l'extraction de l'information dans les images optiques du système SPOT sont de deux ordres : radiométriques, par transformation en réflectance, et géométriques, par fusion de données panchromatiques et multispectrales.

6.2.3.1 Transformation en réflectance exo-atmosphérique

Cette opération de normalisation radiométrique a pour but de s'affranchir des biais astronomiques et instrumentaux, *i.e.* les paramètres d'illumination des scènes et d'acquisition des images. Cette étape de normalisation est d'autant plus importante qu'il s'agit d'analyser une série temporelle d'images SPOT. Le calcul de la transformation se base sur les caractéristiques et les conditions de l'acquisition (Begni, 1988).

$$\rho = \frac{\pi \times d^2 \times DN}{E_{sun} \times \cos(\theta_S) \times K} \tag{6.2}$$

avec ρ la réflectance pour la bande spectrale (λ_1, λ_2) considérée, d la distance Terre – Soleil, DN la mesure enregistrée par le capteur dans la bande spectrale, (λ_1, λ_2), E_{sun} la constante solaire équivalente dans cette même bande spectrale (indiquée dans l'en-tête du fichier SPOT), θ_S l'angle zénithal solaire et K le coefficient d'égalisation (gain).

6.2.3.2 Amélioration de la résolution spatiale

Pour les trois classifications à réaliser, la zone d'intérêt est couverte par des couples panchromatique et multispectral. Des produits de fusion sont réalisables pour profiter pleinement des informations contenues dans ces deux produits, notamment sur les zones urbaines. Ainsi, il est possible de combiner le gain en résolution spatiale du canal panchromatique avec la richesse spectrale des canaux XS ou Xi (fig. 6.2).

Concernant le produit de 2000, nous disposons de données P et Xi (cf. tab.6.2). Au regard des caractéristiques de ces deux modes d'acquisitions (cf. tab. A.3) et des objectifs fixés, Chavez et Kwarteng (1989) propose une méthode dite d'analyse en composantes principales sélective, séparant les différents domaines spectraux (visible, infra rouge...).

L'analyse des bandes Xi1 et Xi2 montrent une corrélation forte. Le recouvrement spectral du mode P avec les domaines des bandes 1 et 2 de l'HRVIR permet d'envisager une méthode de

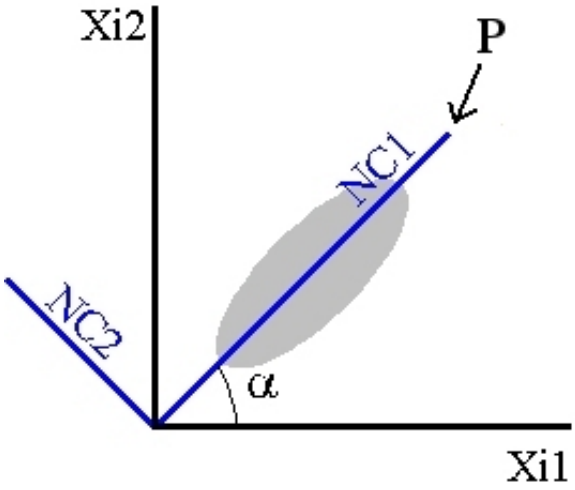


FIG. 6.2 – Transformation spectrale et injection du panchromatique

fusion des données panchromatiques avec les données multipsectrales non-destructrice quant à l'information spectrale.

La méthode de fusion consiste à procéder à une transformation radiométrique produisant deux néo-canaux NC1 et NC2, combinaisons linéaires des canaux bruts Xi1 et Xi2 en fonction de l'angle de la droite de corrélation (eq. 6.3 et 6.4). Celui-ci est évalué à 55 °. Après égalisation de la radiométrie, le canal panchromatique est substitué au néo-canal NC1 (fig. 6.2). Le retour à la radiométrie initiale est effectuée par application de la transformation inverse.

$$NC_1 = Xi_1 . \cos\alpha + Xi_2 . \sin\alpha \tag{6.3}$$

$$NC_2 = -Xi_1 . \sin\alpha + Xi_2 . \cos\alpha \tag{6.4}$$

Cette manipulation simple fondée sur la corrélation forte entre les canaux du visible permet d'aboutir à un produit dont les qualités radiométriques sont conservées pour une résolution spatiale améliorée dans les canaux du visible.

6.2.4 Données exogènes

Comprenant toutes les données et informations ne provenant pas de l'observation de la Terre, la composante exogène est particulièrement fournie. Elle constitue un outil d'interprétation complémentaire des données spatiales et intègre, entre autres, des couches provenant de l'Institut Géographique National (IGN), du Service de la Navigation et de l'Institut National de Statistiques et d'Etudes Economiques (INSEE).

6.2.4.1 Données IGN

Les bases de données géographiques commercialisées par l'Institut Géographique National proviennent de différentes cartes, et sont utilisables à des échelles spécifiques, adaptées à la résolution de production (tab. 6.3).

BD	Echelle	Précision	Thèmes majeurs
Carto	1/50.000	10 m	Hydrographie, occupation du sol, routes principales
Topo	1/25.000	5 m	Idem à la BD Carto
Alti	1/50.000	10 m	MNT à 50 m de résolution
Géoroute	1/50.000	5 à 20 m	Réseaux et équipements routiers, nom de voirie
Scan25	1/25.000		Carte 1/25.000 au format raster

TAB. 6.3 – Base de données IGN

Ces données géographiques exogènes constituent un point d'entrée à l'analyse spatiale des différentes sources d'imagerie citées auparavant. En apportant des informations thématiques supplémentaires, des informations fonctionnelles inaccessibles au satellite, elles amènent un enrichissement la base de données, néanmoins limité par les capactiés de réactualisation.

6.2.4.2 Données du Service de la Navigation

Dans le cadre de sa participation au projet, le Service de la Navigation du Nord-Est a mis à disposition des éléments de sa base de données :
- un modèle numérique de terrain, à 2 m de résolution spatiale, réalisé par photogrammétrie aérienne,
- des champs d'inondations historiques (1947, 1982, 1983).

6.2.4.3 Données INSEE

Comme dans le cas des bases vendues par l'IGN, l'Institut National de Statistiques et d'Etudes Economiques décline également ses données en diverses résolutions géographiques et sémantiques. De façon générale, elles décrivent de 100 à 700 indicateurs caractéristiques (population au dernier recensement, pyramide des âges, salubrité des logements, déplacements domicile-lieu de travail...) définis sur des entités géographiques allant de l'aire urbaine à l'IRIS2000 (îlot de 2000 personnes, disponibles sur quelques grandes agglomérations).

Les données disponibles dans cette partie de l'étude sont issues de la série "Communes...Profils", intégrant les informations recueillies lors des recensements de 1990 et 1999. Elles sont définies au mieux à l'échelle de la commune.

6.3 Impact sur les zones urbaines

Si les données spatiales se sont révélées, au cours des chapitres précédents, efficaces pour obtenir une information sur l'extension des inondations, c'est notamment parce qu'elles ont prouvé leur pertinence pour la description de l'occupation du sol. Parmi les différents thèmes identifiables, les zones urbaines sont celles qui présentent les enjeux les plus forts (DIREN Lorraine, 1996). En valorisant les larges archives d'images disponibles, l'analyse dynamique de ces zones offre une vision synoptique et objective de l'évolution des enjeux et de leur vulnérabilité face à des aléas connus.

La variété des données d'observation de la Terre intégrées dans la base de données sur le secteur Metz-Thionville impose l'utilisation de méthodes de traitements propres à chacune d'entre elles. Les images provenant du système CORONA sont essentiellement analysées par photo-interprétation alors que les données optiques à haute résolution font l'objet d'analyses

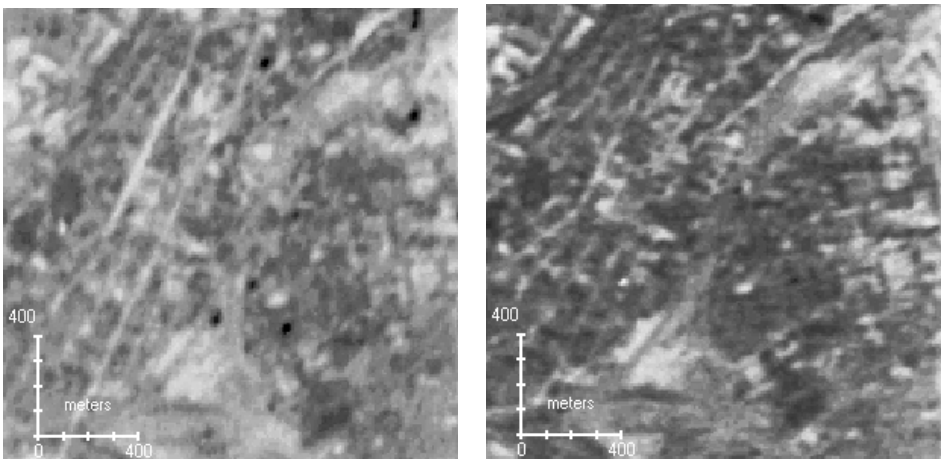
numériques. La vaste couverture temporelle permet d'accéder à la dynamique de la zone urbanisée sur une période de quarante ans et de s'intéresser aux impacts d'événements historiques.

6.3.1 Données CORONA

Avant toute interprétation thématique, il est nécessaire de combler les lacunes d'information dans les zones où se trouvent des nuages ou des trous du film. Cette fusion est réalisée par une détection numérique des fortes variations radiométriques, validée par photo-interprétation. Finalement, très peu de traitements numériques sont réalisés du fait de l'absence de véritable information radiométrique (on parlera cependant de radiométrie, même s'il s'agit là d'un abus de langage) et de la qualité très moyenne des photographies.

6.3.1.1 Extraction des zones non porteuses d'information

Les tirages photographiques présentent deux types d'éléments non porteurs d'informations thématiques : les nuages et les trous (fig. 6.3). Les premiers sont inhérents à toute acquisition optique et le seul moyen de compléter les zones masquées est d'utiliser des images acquises à des dates différentes. Ces nuages sont caractérisés par des valeurs radiométriques très élevées. Les trous semblent moins provenir des conditions de vol et de récupération des films, parfois hasardeuses (NRO@), que de défauts du film. En effet, d'un tirage à l'autre, ils apparaissent à des endroits différents. Ces zones de petite taille (de l'ordre de 0.5 ha) sont caractérisées par des radiométries très faibles.



(a) KH4 FWD, 30/09/62 (b) KH4 AFT, 30/09/62

Fig. 6.3 – Photographies CORONA sur Metz

Ces caractéristiques radiométriques fournissent des critères d'identification simples, qui doivent être complétés par une expertise visuelle (fig. 6.4). La zone d'étude est couverte par deux vols KH3 et KH4-A à double couverture (avant et arrière) géométriquement exploitables. L'analyse de la différence arithmétique des deux images, dont les histogrammes ont été préalablement centrés et normés, permet d'identifier (avec $diff = image_1 - image_2$) :
– $diff >> 0$, nuage sur l'image 1 ou trou sur l'image 2,
– $diff << 0$, nuage sur l'image 2 ou trou sur l'image 1.

Cette détection doit être accompagnée d'une étape de dilatation des zones détectées afin de compenser les inexactitudes géométriques des images et leurs effets sur la radiométrie des pixels qui les bordent.

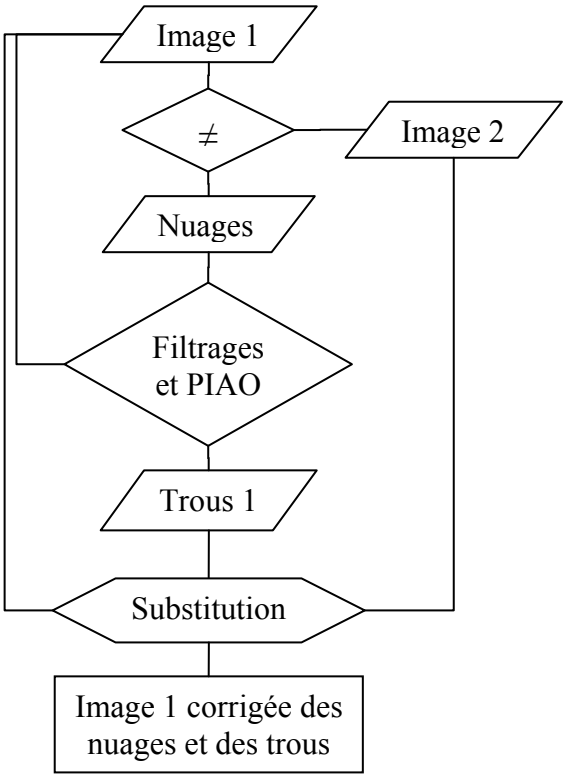


FIG. 6.4 – Algorithme de correction des données CORONA

Ainsi, on obtient pour chacune des images des masques binaires localisant les zones ne portant pas d'information pertinente. Il est alors possible de créer une image résultant de la combinaison des deux images d'origine, ne comportant plus de zone sans information.

6.3.1.2 Interprétation thématique

Si la détection des zones sans intérêt thématique peut être partiellement réalisée grâce aux traitements numériques, l'extraction d'une information thématique nécessite une interprétation complète de l'image. La radiométrie, comme la granularité du film source, complique considérablement la tâche et l'utilisation d'images SPOT panchromatiques est souvent nécessaire pour lever des ambiguïtés, malgré l'écart dans le temps.

Le thème majeur obtenu par photo-interprétation est l'extension des zones urbaines (fig. 6.5). A l'intérieur de ce masque urbain, une discrimination des zones industrielles est entamée. Cependant, cette dernière information est extrêmement soumise à caution, n'autorisant pas son utilisation dans une étude de la dynamique temporelle de cette classe en particulier.

Globalement, la cartographie de la zone urbanisée en 1962 semble assez satisfaisante en terme de photo-interprétation. Elle mériterait d'être confrontée à une carte topographique de l'époque, pour confirmer ou infirmer certains contours douteux et valider les clefs d'interprétation et le plan d'information obtenu dans son ensemble.

6.3.2 Données SPOT

Les données SPOT sont utilisées pour dériver des classifications d'occupation du sol aux différentes dates d'acquisition (1986, 1994 et 2000), selon des méthodologies éprouvées, et obtenir une vision dynamique de l'évolution des zones urbanisées.

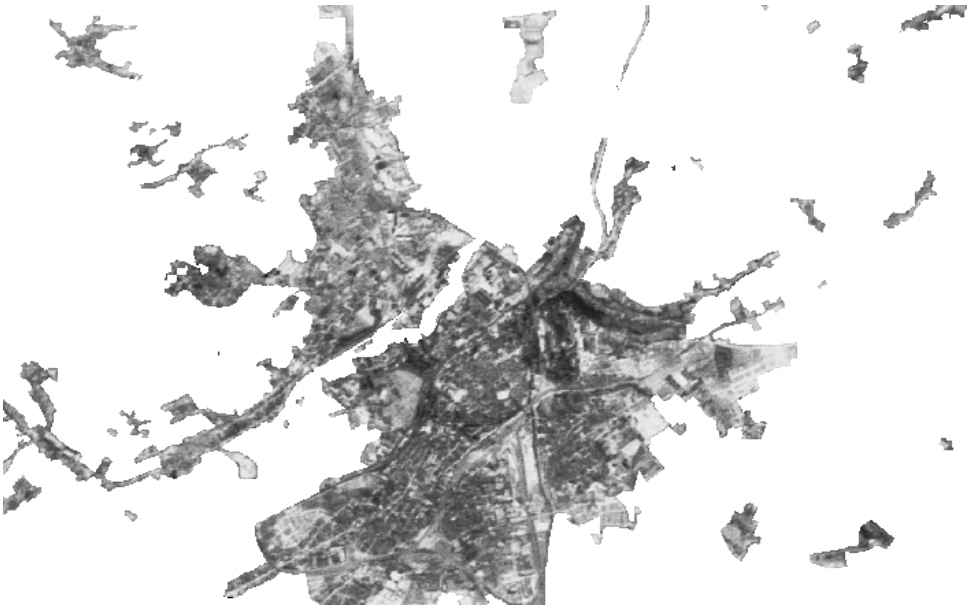


FIG. 6.5 – Photo-interprétation du masque urbain sur l'agglomération de Metz

6.3.2.1 Classification d'occupation du sol radiométrique

Les classes extraites des images sont sensiblement identiques dans leur nature et dans leur méthode d'extraction à celles obtenues lors des programmes PRATIS (Tholey *et al.*, 1997) et GENESIS 2000 (Henry, 2000a et b)(tab. 6.4). Il n'a pas été jugé nécessaire de développer des méthodologies particulières d'extraction d'information sur les images optiques, celles-ci étant spécifiquement destinées à la description de l'occupation du sol.

Approche biophysique	Nomenclature thématique hiérarchisée		
	Niveau général		Niveau détaillé
Hydrographie (H)	1. Hydrographie	1. Hydrographie	111. Plans d'eau
			112. Réseaux linéaires
Végétation Dense (VD)	2. Surfaces forestières	2. Surfaces forestières	221. Dominante feuillus
			222. Dominante conifères
			223. Mixte
Végétation Marquée (VM)	3. Surfaces agricoles	31. Cultures permanentes	311. Surfaces en herbe
			312. Vignes
Végétation Discontinue (VDC)		32. Terres arables	321. Cultures d'hiver
Sols Nus (MR)			322. Cultures de printemps
Végétation Présente en milieu urbain (VP)	4. Surfaces artificialisées	41. Surfaces urbaines	411. Espaces verts urbains
			412. Tissus urbains lâches
Bâti Discontinu (BD)			413. Tissus urbains discontinus
Bâti Continu (BC)			414. Tissus urbains denses
Grandes Emprises (GE)		42. Zones d'activités économiques	421. Grandes emprises industrielles et commerciales
			422. Zones d'extraction (gravières)

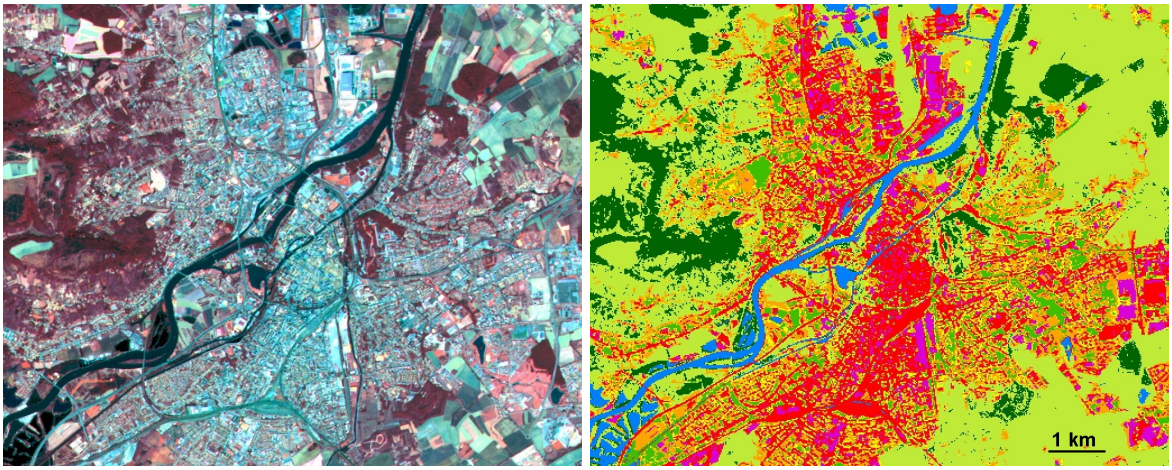
TAB. 6.4 – Nomenclature de la classification d'occupation du sol

Ainsi, l'analyse des données de 1986, 1994 et 2000 a permis d'établir les produits de classification d'occupation du sol correspondants. Ces produits ont été validés par expertise contradictoire.

6.3.2.2 Dérivation d'une classification contextuelle

La classification thématique qui dérive des traitements précédents est très dépendante de la résolution des images et de leur radiométrie. L'analyse visuelle du produit obtenu montre une disparité résiduelle forte à l'intérieur des différentes classes.

La présence de trois classes de bâti dans les zones urbaines permet d'évaluer qualitativement et intuitivement la densité de bâti (fig. 6.6). L'objectif de la classification contextuelle est d'obtenir une description de cette densité plus quantitative et ainsi, plus facilement manipulable dans un système d'information géographique.



(a) Donnée SPOT 2000 (b) Classification dérivée

FIG. 6.6 – Classification thématique sur Metz, selon le niveau détaillé (tab. 6.4)

Fondée sur des critères géographiques de répartition des différentes classes dans l'espace urbain, la méthode utilise les informations exogènes provenant des bases de données IGN. Elles sont notamment utilisées pour filtrer les zones affectées à l'habitation seule ou les réseaux routiers, généralement classés en "bâti dense" et de façon discontinue. Les routes proposent une base excellente de segmentation de l'espace urbain classé, en permettant de délimiter des ilôts, base géographique exploitée dans la section 6.4.2.1.

Pratiquement, l'analyse exploite les observations qualitatives de la distribution des classes urbaines dans les agglomérations. Elles pourront faire l'effet de truismes, mais les énoncer clairement permet d'envisager la méthode pour les mettre quantitativement en évidence :
- le centre d'une grande ville se compose essentiellement de bâti dense,
- en périphérie et dans les petites villes, la classe "bâti dense" est dispersée dans les deux autres classes, largement majoritaires.

La méthode de réaffectation est alors construite sur deux critères d'identification des ensembles bâtis : leur taille et leur composition thématique (Magallon, 2002). Elle procède par filtrage itératif décroissant où la composition du bâti est analysée par un calcul de densité dans une fenêtre glissante, dont la taille est réduite à chaque passage pour affiner les contours (de 81×81 à 5×5). Pour éviter les erreurs de classification, les communes sont préalablement classées par taille afin d'éviter l'application de filtres de grande taille là où les zones urbaines sont faiblement étendues. Ainsi, les plus grosses communes subissent jusqu'à 7 filtrages successifs contre 2 pour les plus petites.

Une image qualifiant la densité des zones urbanisées est établie à partir du produit de classification "standard" dérivé de l'analyse spectrale. Ce produit de deuxième niveau constitue un niveau d'expertise supplémentaire des données d'observation de la Terre initiales. Il qualifie de façon beaucoup plus précise la répartition des trois classes de bâti dans les zones urbaines et rend exploitable numériquement la dimension intuitive du produit de classification initial (fig. 6.7).

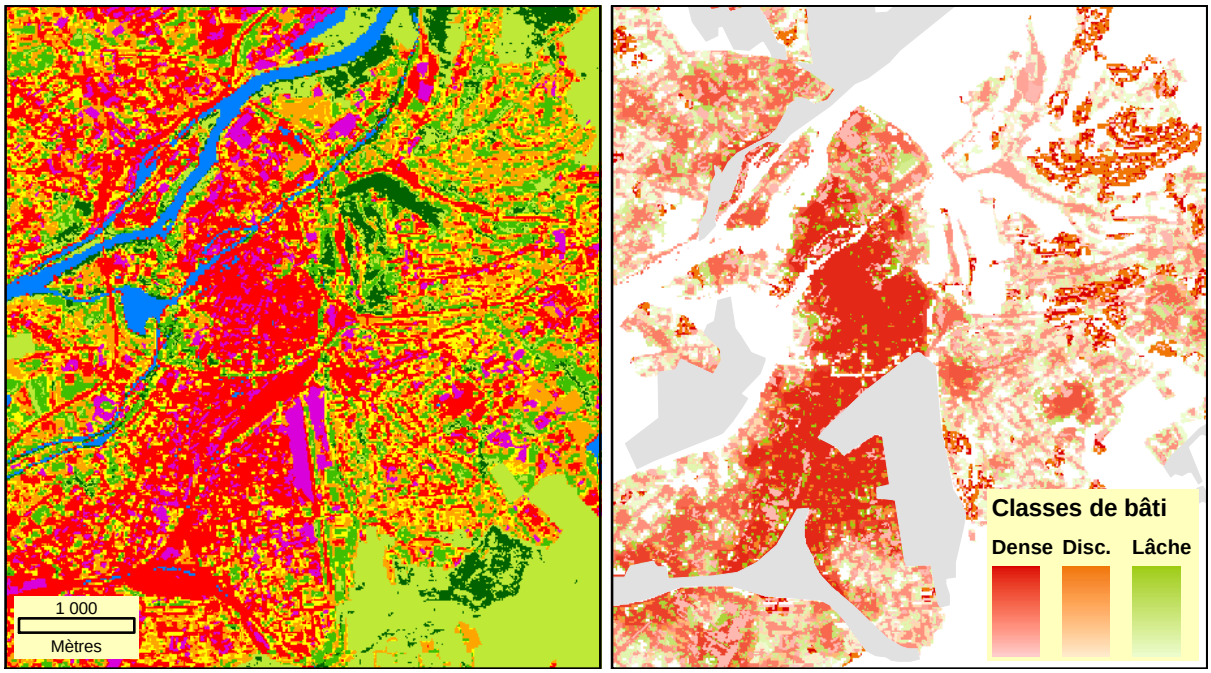


FIG. 6.7 – Classification contextuelle en 24 classes élaborée sur Metz

Ce nouveau produit de classification permet une identification et une délimitation fidèle des zones densément urbanisées. La gradation de couleurs vers l'extérieur de l'agglomération témoigne de l'évaluation intuitive évoquée précédemment, à l'observation de la figure 6.6.

6.3.3 Dynamique de l'occupation du sol

La série temporelle d'images permet l'étude de la dynamique des zones urbaines et la mise en évidence des zones privilégiées d'expansion. L'analyse géographique et thématique conduit à considérer la nature de ces zones, leur position par rapport aux champs d'inondation historiques et finalement, à évaluer la prise en compte de l'existence du risque dans le processus d'urbanisation (cf. §6.3.4).

La réalisation de classifications d'occupation du sol avec des images SPOT de 2000, 1994 et 1986, complétées par l'interprétation des images CORONA de 1962, a permis de cartographier l'évolution des surfaces bâties dans la vallée de la Moselle sur une quarantaine d'années (fig. 6.8).

Cette phase d'exploitation des produits dérivés de l'observation de la Terre décrit les zones urbaines de façon indifférenciée. Disposant de masques binaires d'emprise urbaine pour chaque observation, la création d'un index temporel est relativement aisée et donne accès à une évaluation chiffrée de la croissance urbaine (tab. 6.5).

Cette information permet d'identifier les vecteurs préférentiels de développement des zones urbanisées. Elle est capitale pour pouvoir s'intéresser à la prise en compte des risques connus,

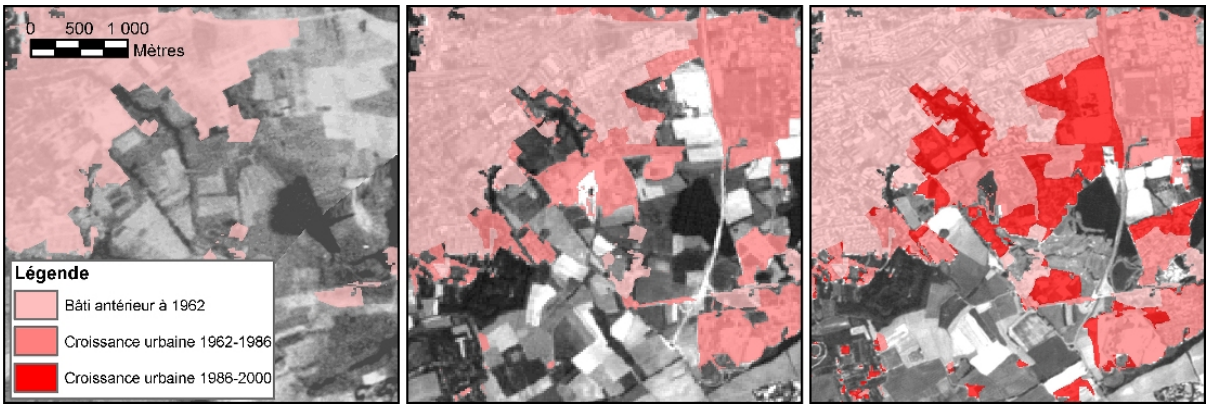


FIG. 6.8 – Extension des zones urbaines dans le secteur de Metz, de 1962 à 2000

Commune	1962-1986	1986-2000
Apach	19%	76%
Ay-sur-Moselle	138%	37%
Le Ban Saint Martin	16%	34%
Longeville-les-Metz	26%	28%
Talange	60%	5%
Uckange	55%	6%
Metz	48%	22%

TAB. 6.5 – Statistiques de la croissance de l'extension urbaine sur quelques communes

au travers d'événements historiques d'envergure (les crues de 1947 ou de 1983 par exemple), dans le processus d'urbanisation du lit majeur (Haase, 2003).

6.3.4 Analyse d'impacts d'événements historiques

L'analyse d'événements historiques constitue un des maillons essentiels de la prévention. La base de données sur les inondations, composée d'images radar acquises pendant des crues importantes des dix dernières années et de champs d'inondation maximaux observés par les Services de la Navigation, est croisée avec les classifications d'occupation du sol successives. L'objectif est d'évaluer ponctuellement les impacts de l'événement et leur variation au cours du temps.

6.3.4.1 Paysages touchés

Le croisement des plans d'information "Occupation du sol" et "Champs d'inondation historique" permet d'évaluer l'impact d'une crue sur le paysage de la vallée. En s'intéressant aux deux événements importants de 1947 et 1983, on constate une différence d'impacts assez importante. Si des inondations de la même ampleur que 1947 ou 1983 venaient à se produire (fig. C.11 et C.13), alors les cartes C.12 et C.14 présentent les conséquences sur les thématiques génériques d'occupation du sol : surfaces naturelles (forêt, surfaces agricoles, prairies...), zones urbaines et zones industrielles. Grâce à ces représentations, on peut constater que de tels événements auraient aujourd'hui des conséquences très graves sur l'ensemble des communes. D'après les estimations réalisées en 1996 par la DIREN (cf. §6.2.1.1) et l'occupation du sol en 2000, des crues similaires à celles de 1947 (tab. 6.6) et 1983 (tab. 6.7) généreraient respectivement près de 300 millions et 50 millions d'euros de dégâts sur la commune de Metz.

Commune	Naturel (ha)	Urbain (ha)	Industriel (ha)	Total (ha)
Apach	15.4	24.0	1.1	40.5
Ay sur Moselle	259.5	102.8	11.4	373.7
Le Ban Saint Martin	11.2	62.7	2.5	76.3
Longeville-les-Metz	46.1	145.4	7.5	199.0
Metz	175.7	550.0	70.0	795.7
Talange	63.6	113.9	8.6	186.1
Uckange	66.3	232.9	12.3	311.4

TAB. 6.6 – Impact d'une crue similaire à 1947 sur l'occupation du sol de 2000

Commune	Naturel (ha)	Urbain (ha)	Industriel (ha)	Total (ha)
Apach	12.8	8.5	0.0	21.3
Ay sur Moselle	260.3	110.3	11.6	382.2
Le Ban Saint Martin	8.2	36.6	1.6	46.4
Longeville-les-Metz	43.8	109.1	6.0	158.9
Metz	103.2	101.8	11.2	216.2
Talange	48.2	41.4	1.8	91.3
Uckange	31.3	90.3	3.3	124.9

TAB. 6.7 – Impact d'une crue similaire à 1983 sur l'occupation du sol de 2000

Cette analyse est typiquement celle qui peut être réalisée pendant la crise (chapitre 5), où l'emprise du champ d'inondation est représentée en superposition sur un fond d'imagerie ou de cartographie permettant une évaluation qualitative. L'intérêt de disposer d'informations interprétées sur l'occupation du sol est de pouvoir générer des évaluations chiffrées des impacts pendant le déroulement de l'inondation.

6.3.4.2 Variation de vulnérabilité

La réalisation du plan d'information "Dynamique urbaine", obtenu par fusion des produits dérivés de l'analyse des données d'observation de la Terre, permet de s'intéresser à un autre aspect de l'impact des crues. L'idée est ici de considérer un "aléa constant", par l'intermédiaire d'un événement donné, et de ne prendre en compte que l'évolution temporelle des zones vulnérables. Cette démarche n'intègre pas les aménagements qui peuvent être réalisés pour diminuer les effets des crues, mais elle permet néanmoins de qualifier l'accroissement des surfaces bâties dans les zones inondées par le passé, et donc potentiellement ré-inondables.

Les deux graphiques qui suivent mettent en relation l'évolution des zones bâties dans l'ensemble de la commune avec cette même évolution dans la surface plus restreinte de la zone inondée en 1947 (fig. 6.9) et en 1983 (fig. 6.10).

L'élaboration de cette représentation utilise le calcul suivant :
- en ordonnées : $\frac{Surface\ urbanisée}{Surface\ communale}$
- en abscisse : $\frac{Surface\ urbanisée\ dans\ le\ champs\ d'inondation}{Surface\ urbanisée}$

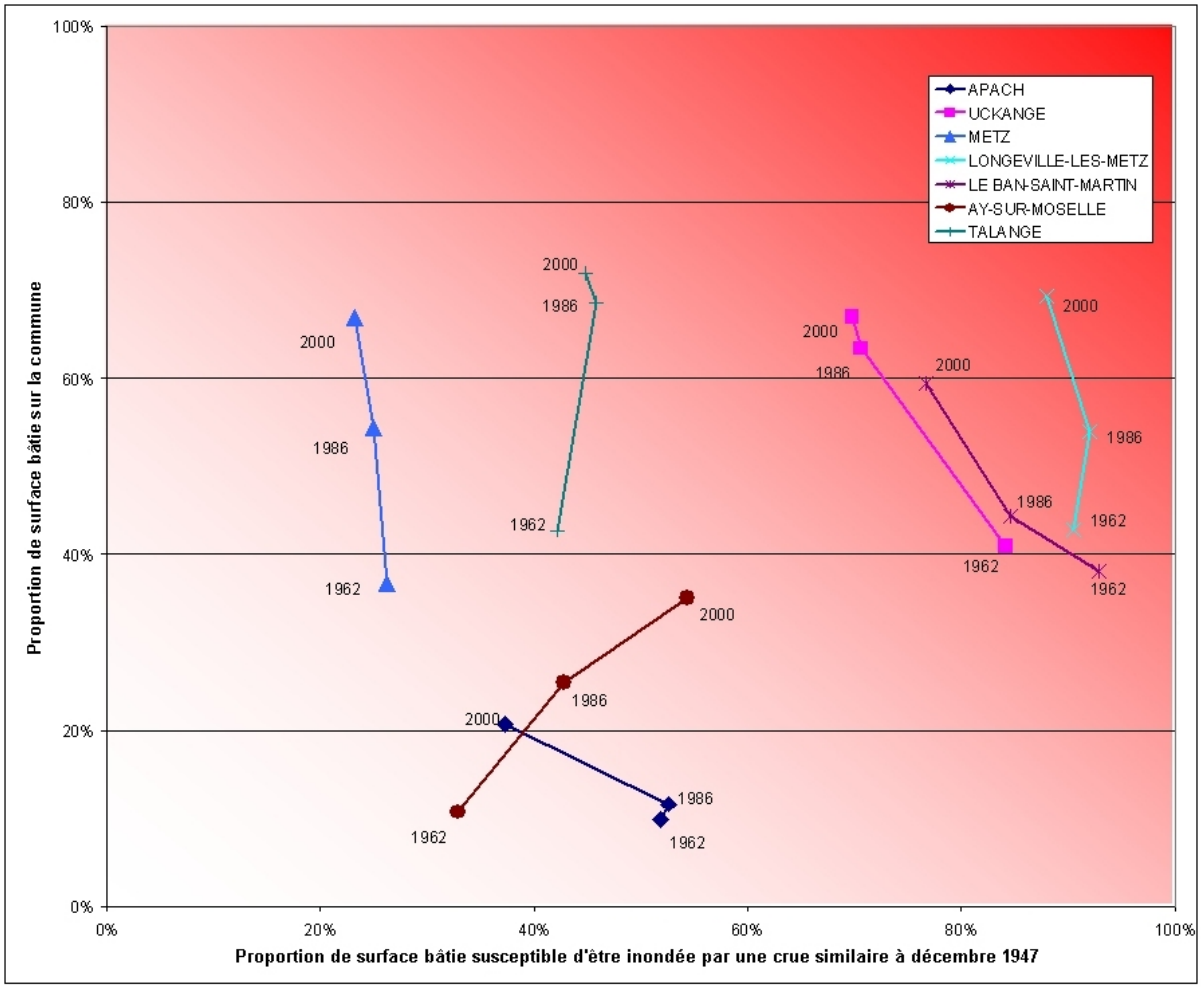


FIG. 6.9 – Impact d'une crue similaire à 1947 sur le bâti et son évolution

Cette représentation permet de distinguer plusieurs tendances, par l'intermédiaire du coefficient directeur de chaque segment :

- **segment vertical :** augmentation de la proportion de surface urbanisée dans la commune et augmentation symétrique dans le champ d'inondation, *i.e.* la même proportion de surface a été urbanisée à l'intérieur de la zone inondée qu'à l'extérieur (Metz pour l'inondation de 1983).
- **segment oblique, pente positive :** augmentation de la surface urbanisée à l'échelle de la commune avec une forte augmentation dans le champ d'inondation, *i.e.* les nouvelles constructions sont, pour une large part, concentrées dans l'emprise de la zone inondée (Ay-sur-Moselle pour l'inondation de 1947).
- **segment oblique, pente négative :** augmentation de la surface urbanisée à l'échelle de la commune avec pas ou peu de constructions dans le champ d'inondation, *i.e.* les nouvelles constructions sont majoritairement situées en dehors de la zone inondée (Uckange entre 1962 et 1986 pour l'inondation de 1947).

Cette méthode d'analyse, couplée à ce type de représentation graphique, met en évidence la dynamique d'urbanisation des communes considérées, en fonction de la longueur des segments, et la prise en compte de l'histoire hydraulique des zones urbanisées. Malgré tout, en étudiant l'impact d'une crue donnée sur la dynamique des zones urbanisées, on ne peut pas réellement parler d'étude de la variation de vulnérabilité. Cette démarche occulte complètement les effets

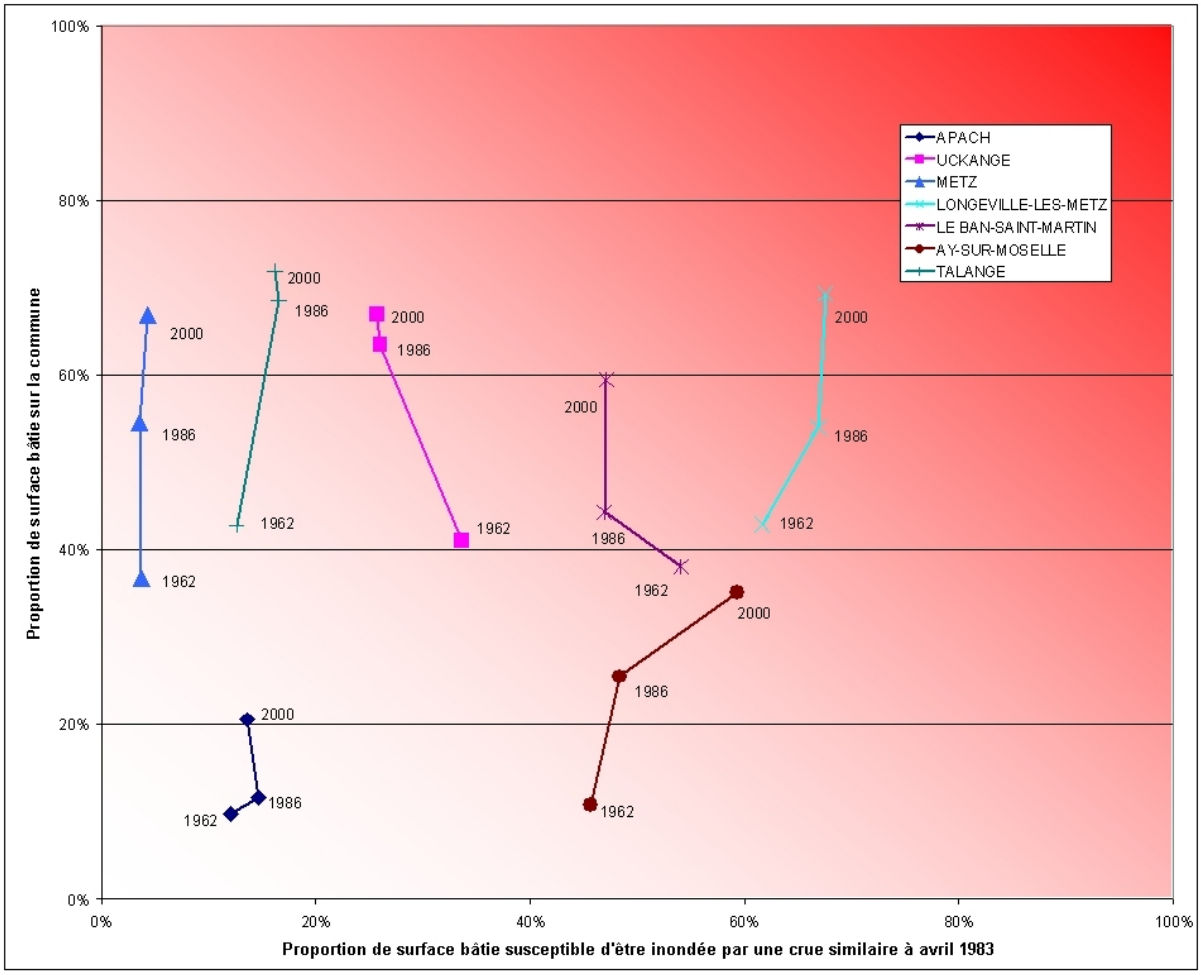


FIG. 6.10 – Impact d'une crue similaire à 1983 sur le bâti et son évolution

d'aménagements réalisés après l'événement pour en limiter les effets. Il ne semble donc raisonnable de ne parler que d'indicateurs de variation des zones exposées, dans la mesure où il est toujours possible d'assister à un événement plus fort que les précédents qui dépassera les aménagements de protection.

En ne s'intéressant qu'à l'extension des surfaces urbanisées, cette démarche ne prend pas en compte la valeur financière des biens touchés ou le nombre de personnes touchées. L'intégration de telles informations nécessite l'utilisation de données externes, référençables géographiquement. Cette démarche est amorcée en s'intéressant à la seule question de la population.

6.4 Impact sur la population

Aisément accessible, l'information de recensement à la commune est cependant insuffisante pour accéder à une évaluation de l'impact sur les habitants des zones touchées. A partir des classifications élaborées pour l'évaluation d'impact sur les zones urbaines et des données INSEE communales, le couplage envisagé permet de compléter le produit de cartographie d'impact des crues. En offrant une segmentation de l'espace urbain, les produits dérivés de l'imagerie spatiale, couplés aux sources de données exogènes, proposent une base géographique qui semble pertinente pour procéder à une redistribution intra-communale des données de recensement.

Ce point a fait l'objet d'une étude exploratoire approfondie quant aux méthodes de répartition des données statistiques sur la base géographique des produits dérivés de l'observation de la Terre (Magallon, 2002). Cette section présente les premiers résultats et les premières applications sur le secteur d'étude de la Moselle.

6.4.1 Contexte général

L'utilisation conjointe de données dérivées de l'observation de la Terre et de données socio-économiques prend place dans un contexte où peu d'expériences ont été réalisées. Cet aspect positionne le développement méthodologique entrepris dans une situation favorable, puisque l'on constate une certaine lacune à ce sujet dans la littérature, même si la problématique a été soulevée depuis longtemps.

Sur la question de l'évaluation et du recensement de population par les techniques de télédétection, la littérature est à la fois assez ancienne et peu fournie. Le support de la photographie aérienne fait partie des premiers supports a avoir été investigué (Collins et El-Beik, 1971 ; Hsu, 1971 ; Kraus *et al.*, 1974 ; Clayton et Estes, 1980). Les outils de télédétection spatiale ont très vite trouvé un écho favorable (Ogrosky, 1975), en couvrant de larges zones et en autorisant une qualification plus fine de l'environnement urbain (Weber et Hirsch, 1992).

Olorunfemi (1983) suggère l'emploi de données Landsat et radar sur le Nigeria pour palier à un manque d'information, dû pour l'essentiel à un recensement officiel ancien. Cette étude, et celles citées plus haut exploitant la photographie, sont quasiment les seules visant à un recensement. Les méthodologies établies à partir de données d'observation de la Terre ont plutôt pour objectif de proposer une meilleure distribution de la population dans l'espace géographique urbain. Elles utilisent le recensement officiel comme donnée d'entrée, au même titre que les plans d'information dérivés de l'imagerie. Les auteurs mettent toujours en évidence le problème de l'interpolation et de la représentation cartographique, que ces plans proviennent d'images :
- SPOT (Weber et Hirsch, 1992),
- Landsat TM (Iiasaka et Egedus, 1982 ; Langford *et al.*, 1991 ; Yuan *et al.*, 1997),
- du système nocturne DMSP-OLS (*Defense Meteorological Satellite Program - Optical Linescan System*) à 1 km de résolution (Sutton, 1997 et 2003 ; Elvidge *et al.*, 1997 ; Takashima *et al.*, 2003),
- d'images de nuit de NOAA-AVHRR (Streutker, 2003), pour dériver la température de l'UHI (*Urban Heat Island*).

Martin et Bracken (1993), comme Langford et Unwin (1994), rappellent le principe de la représentation dasymétrique (Wright, 1936) utilisant les données de recensement et la cartographie des zones urbanisées (fig. 6.11a et b), ses intérêts mais aussi ses limites. La spatialisation d'une variable selon la représentation dasymétrique est fondée sur sa distribution spatiale propre, et non sur la base d'un découpage provenant de données exogènes, comme c'est le cas avec la méthode des choroplèthes (Mennis, 2003). Le haut niveau de détails qu'elle procure constitue à la fois un atout et un inconvénient. Langford et Unwin (1994) proposent alors de

passer à une représentation surfacique par filtrage spatial de la représentation dasymétrique (fig. 6.11c), dont peuvent dériver des représentations tridimensionnelles (fig. 6.11d et e).

Pour mettre en relation les informations sur l'occupation du sol et les populations, on retiendra la méthode proposée par Yuan *et al.* (1997) qui affectent des coefficients de densité par classe thématique. Ainsi, pour chaque commune disposant d'une description thématique de ses zones urbanisées et de sa population totale, on peut exprimer une densité par classe.

6.4.2 Le problème de la segmentation du bâti

La répartition géographique de la population à l'échelle de la commune pose le problème de la connaissance des surfaces sur lesquelles elle est répartie. La segmentation du bâti des zones urbanisées et son impact sur la répartition de la donnée de population est envisagée selon trois angles. Tout d'abord, on limite les zones habitées à une typologie unique : le masque urbain global, épuré des zones industrielles et des réseaux de communication, est utilisé dans son ensemble. Puis, une variabilité de densité des zones urbaines est introduite par l'utilisation des trois classes dérivant de l'analyse radiométrique (cf. §6.3.2.1). Cette variation de la densité de construction induit la prise en compte d'une variabilité de la densité de population dans les zones habitables. Enfin, la troisième et dernière méthode s'appuie sur la classification contextuelle élaborée à partir de l'analyse thématique (cf. §6.3.2.2). Cette évaluation, qui tient mieux compte de la diversité du milieu urbain, est plus représentative de la répartition géographique de la population visée.

Les trois hypothèses et les méthodes de répartition qui en dérivent sont présentées afin de mettre en évidence leurs atouts et leurs faiblesses :
- **un bâti uniforme**, qui ne considère que le masque urbain,
- **un bâti en trois classes**, qui s'appuie sur la segmentation radiométrique,
- **un bâti en n classes**, qui exploite la classification contextuelle.

Ces développements, bien que prometteurs, méritent encore des améliorations et un approfondissement. Dans tous les cas, l'occupation du sol d'une commune est constituée de surfaces naturelles indifférenciées et de surfaces artificielles comprenant des zones habitables, des zones industrielles et commerciales, des réseaux de communication. Le thème retenu ici est celui des zones habitables. L'objectif principal est d'obtenir pour chaque pixel, ou groupe de pixels, de la classification d'occupation du sol une valeur de population correspondante.

6.4.2.1 Hypothèse du bâti uniforme

Selon cette hypothèse, les zones habitables de toute commune sont susceptibles de porter une même densité de population. Cette grandeur est donnée par le ratio du nombre d'habitants recensés et de la surface habitable. On dispose ainsi d'un nombre d'habitants moyen pour chaque pixel du masque urbain, représentable graphiquement.

Evaluation des densités

L'utilisation des bases de données exogènes pour retirer les réseaux routiers permet de ne pas affecter de population sur ces surfaces et produit une structuration du paysage. Des "îlots urbains" sont créés, définis comme un groupe de pixels entouré par des axes de communication. Sur cette base, une relation peut être construite entre population communale et surface bâtie.

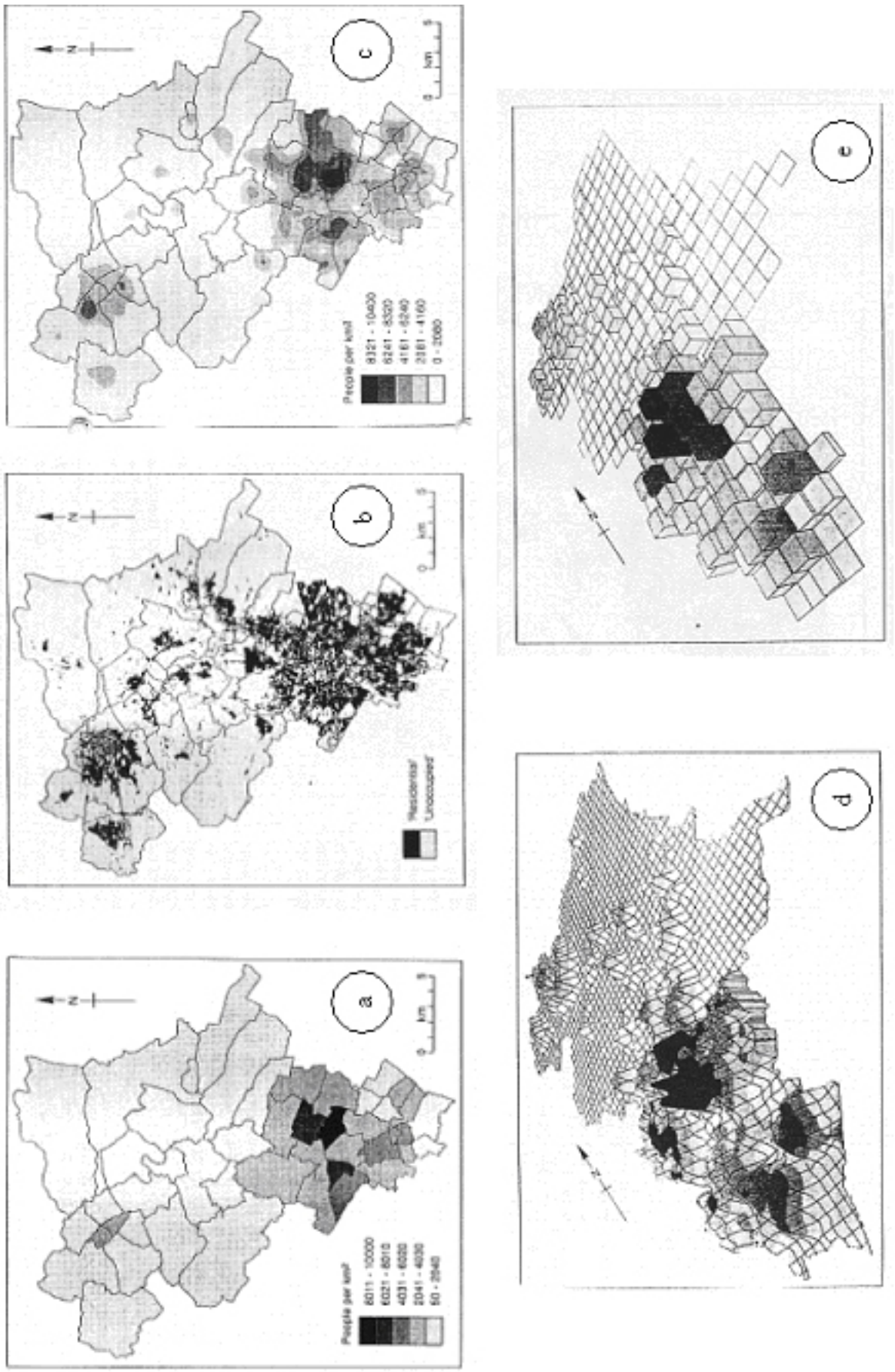
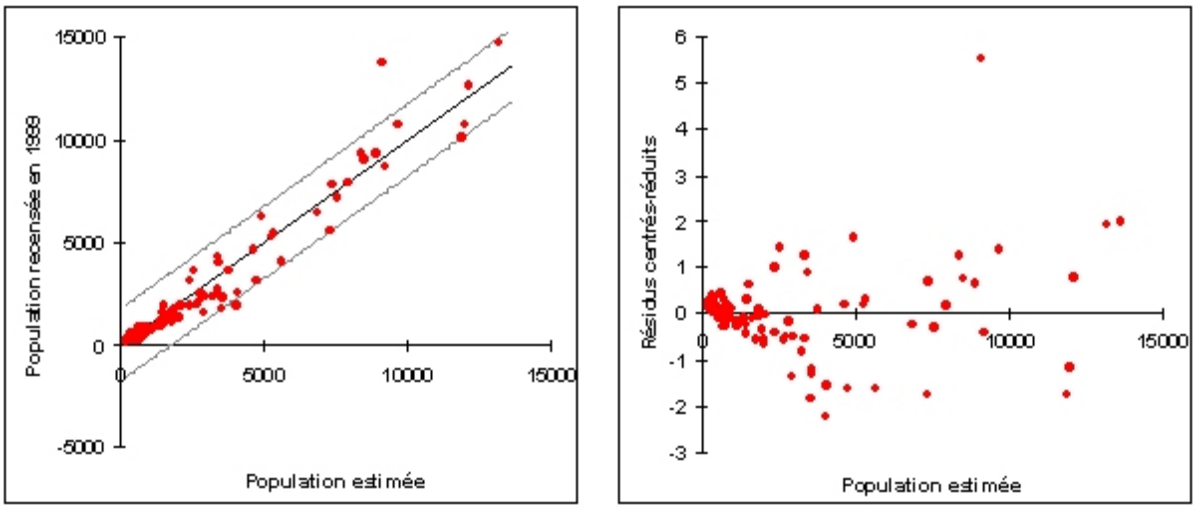


FIG. 6.11 – Comparaison des représentations de la population – Représentation choroplèthe (a), image classée (b), représentation surfacique (c), surface 3D (d), grille 1km×1km (e) (Langford et Unwin, 1994)

L'analyse statistique de la série mettant en correspondance la surface bâtie et la population de chaque commune montre la corrélation de ces deux variables sur un échantillon d'une centaine de communes (fig. 6.12). La relation est modélisée par une régression linéaire. Sutton (2003) présente des résultats comparables avec une relation linéaire Ln-Ln entre population et surface habitée, sur un échantillon un peu plus important (environ 300).



(a) Confrontation du modèle aux données réelles

(b) Résidus de la modélisation

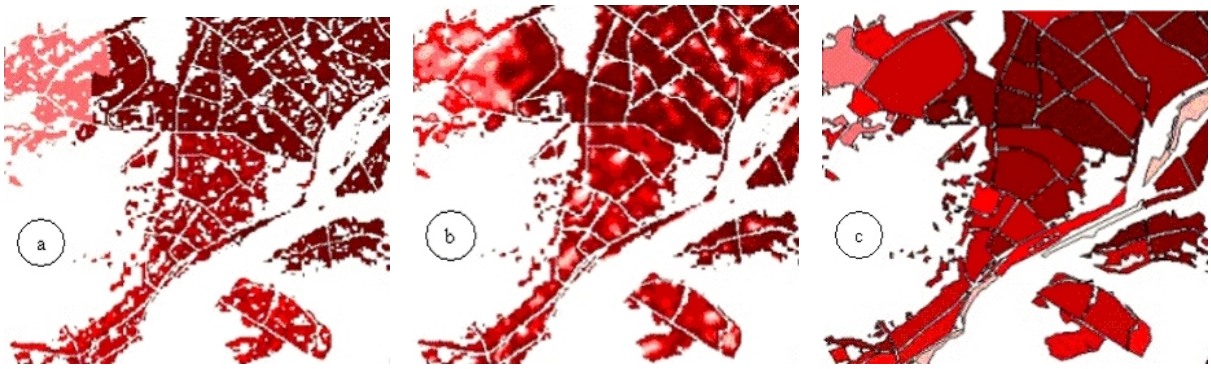
FIG. 6.12 – Modélisation linéaire de la population à partir de la surface bâtie

Les communes les plus peuplées de l'échantillon ne sont pas représentées. Leur prise en compte dans la régression linéaire génère de très forts écarts, en particulier sur les petites communes où ils sont déjà importants. Cette observation tend à mettre en avant une première limite de cette approche simple. Une seconde limite est mise en évidence par la distribution du nuage de points par rapport à la droite de régression. On constate que pour les petites communes, les points ont tendance à se situer plutôt en dessous de cette droite, alors qu'ils sont plus majoritairement au-dessus pour les plus grandes agglomérations. Cette observation est répétée sur la représentation des résidus. Ainsi, cette méthode surestime la population des petites communes alors qu'elle la sous-estime dans les grandes, du fait de son hypothèse initiale d'un bâti uniforme.

Cette méthode de calcul très simple permet d'obtenir une évaluation moins biaisée de la densité de population, puisqu'elle est calculée par rapport à la surface bâtie et potentiellement habitable, plutôt que sur la surface communale totale. Cette grandeur sera retenue dans la suite sous le nom de densité urbaine (D_u).

Représentations graphiques

Les représentations dasymétriques (fig. 6.13a) et surfaciques (fig. 6.13b) induisent des discontinuités fortes sur les limites administratives. Malgré tout, la représentation par zones (fig. 6.13c) ne constitue pas non plus la réponse idéale, en distribuant uniformément la densité de population à l'intérieur des "îlots urbains". Elle permet d'obtenir une meilleure appréciation et une meilleure lisibilité de la distribution des populations mais altère sa résolution spatiale. Ainsi, son usage peut être envisagé comme stade final de représentation, en conservant l'information au pixel pour l'analyse.



(a) Dasymétrique (b) Surfacique (c) Par zones

FIG. 6.13 – Représentations cartographiques de l'information spatialisée de population

6.4.2.2 Segmentation du bâti en trois classes

La classification élaborée par analyse spectrale des images SPOT (selon la nomenclature 6.4) isole trois classes de bâti en zones urbaines. Comme précédemment, les emprises des zones commerciales et industrielles ainsi que les réseaux de communication sont retirés du masque à partir des sources de données exogènes. Plutôt que de considérer une seule densité de population par commune quelle que soit la typologie de bâti, on cherche ici à prendre en compte la variabilité de la densité des zones bâties et à la relier à la distribution des populations.

Deux approches peuvent être envisagées en considérant la relation 6.5 et en l'appliquant indépendamment à chaque classe de bâti (Yuan *et al.*, 1997). De façon similaire à la densité urbaine, on définit une densité de population spécifique à la classe de bâti : la densité thématique (D_t). La relation entre la densité thématique, la surface occupée par la classe correspondante et la population est abordée et modélisée d'abord selon une approche linéaire, puis en supposant un comportement gaussien.

Résolution linéaire

L'ensemble choisi intègre des communes dont la densité urbaine varie de moins de 3000 hab/km^2 (pour les plus petites communes) à plus de 10000 (pour les plus importantes telles que Metz). Une résolution globale en utilisant la totalité des communes de l'échantillon génère des solutions aberrantes ($D_t < 0$). Ainsi, il apparaît nécessaire d'exploiter des jeux de données plus réduits, en segmentant l'ensemble de départ en plusieurs classes de densités urbaines, *i.e.* plusieurs classes de communes. A l'intérieur de ces classes, les densités thématiques peuvent être plus légitimement supposées constantes.

En écrivant la relation 6.5 pour chaque classe de bâti sur un ensemble de communes, et en supposant les densités thématiques constantes sur cet ensemble, on obtient un système linéaire. Sa résolution met encore en évidence des solutions aberrantes, provenant d'hypothèses trop réductrices.

$$Population = \sum_{i=1}^{n} densité_i \times surface_i \tag{6.5}$$

Certes, ces hypothèses permettent d'améliorer la détermination des densités thématiques, mais les tests de classification des communes montrent une très forte influence du mode de classement sur les estimations. Finalement, quel que soit le mode retenu, il n'est pas possible d'éviter des solutions aberrantes, biaisées par le classement en préalable de la résolution linéaire.

Résolution gaussienne

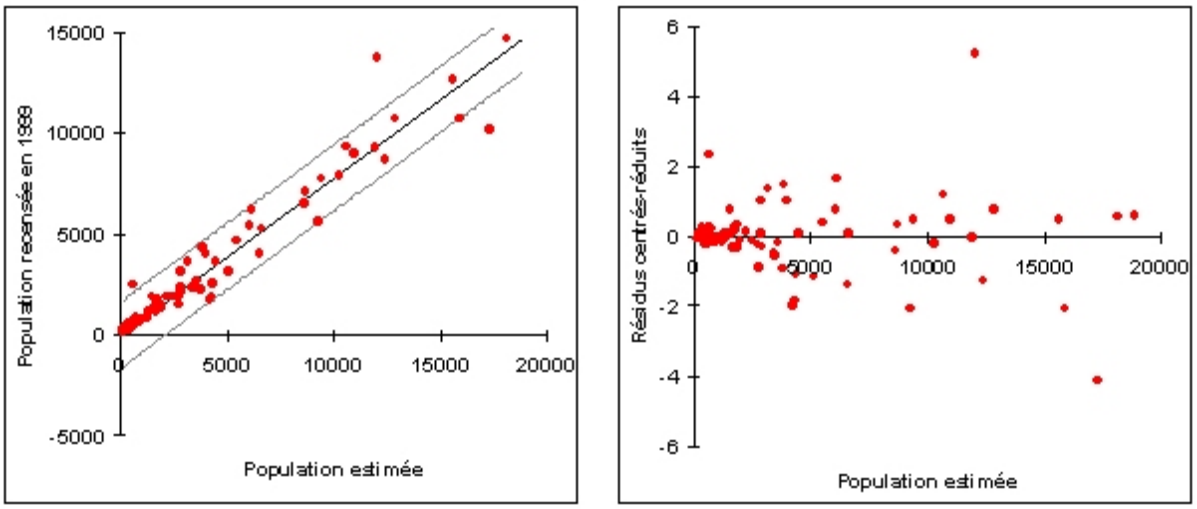
A partir des constatations précédentes, de nouvelles hypothèses sont émises. Les surfaces de chaque classe sont supposées distribuées selon une loi normale f, avec une moyenne et un écart-type calculés par classe et sur l'ensemble des communes. La relation entre densité thématique et densité urbaine est défini linéairement, et le coefficient directeur a_i est supposé inversement proportionnel à cette fonction de répartition des surfaces (eq. 6.7).

$$D_t^i = a_i \cdot D_u \tag{6.6}$$

$$a_i = \frac{3}{f(S_i)} \cdot \sum_j \frac{1}{f(S_j)} \tag{6.7}$$

Les valeurs de coefficient de densité obtenues semblent alors évoluer dans des gammes de valeurs plus réalistes et plus interprétables. On constate en effet que pour les petites communes, à faible population, les coefficients de densités ont des valeurs assez semblables. Cet aspect est confirmé qualitativement, visuellement sur les images où l'on peut noter une certaine homogénéité du bâti dans les petites communes. Par contre, pour les communes à population plus importante, l'écart de densité entre les classes va croissant.

La confrontation des résultats aux données de recensement montre que cette modélisation a tendance à surestimer la population (fig. 6.14). Finalement, l'erreur sur la détermination des densités est estimée à 25%. Pour comparaison, Streutker (2003) obtient une très faible corrélation de 30% entre l'augmentation de population à Houston et l'UHI dérivé de NOAA-AVHRR.



(a) Confrontation du modèle aux données réelles

(b) Résidus de la modélisation

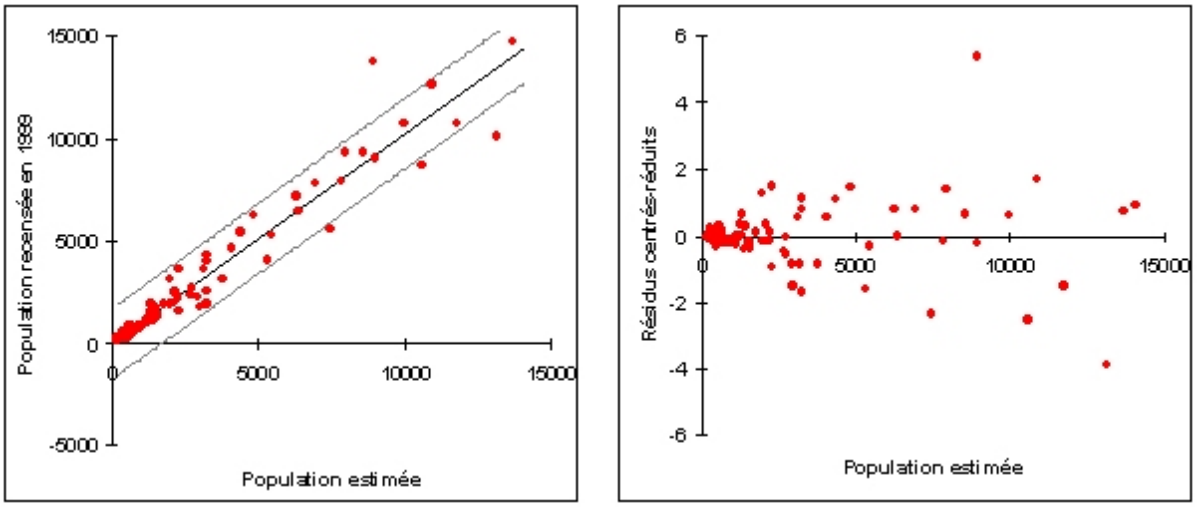
FIG. 6.14 – Modélisation gaussienne de la population à partir de trois classes de bâti

6.4.2.3 Segmentation du bâti en n classes

L'hypothèse d'un bâti urbain distribué en trois classes permet d'obtenir des évaluations réalistes des densités par typologie de bâti, en fonction de la population totale communale. Mais la section 6.4.2.1 a montré une forte corrélation entre la population d'une commune et sa surface bâtie habitable. Ainsi, on peut supposer qu'à partir d'une classification suffisamment détaillée (notamment en utilisant les données de SPOT5 ou du futur système Pléiades) de la densité

de l'habitat puisse être dérivée une répartition de la population. Cela suppose évidemment de disposer de quelques communes test pour calibrer les relations.

A partir de la classification contextuelle élaborée (cf. §6.3.2.2) et sa segmentation supplémentaire de l'espace urbain, un lien plus fort entre la densité de population et la classe de bâti est envisageable. La méthode de génération amène une classifcation des ensembles urbains par taille et composition où, pour chaque nouvelle classe, l'équation 6.5 est applicable. La résolution du système ainsi formé propose des résulats cohérents avec les précédents. L'utilisation d'une loi de distribution parabolique, plutôt que gaussienne, réduit l'erreur d'estimation à 20%. La mise en relation des populations estimée et réelle montre une légère sous-estimation par le modèle (fig. 6.15).



(a) Confrontation du modèle aux données réelles

(b) Résidus de la modélisation

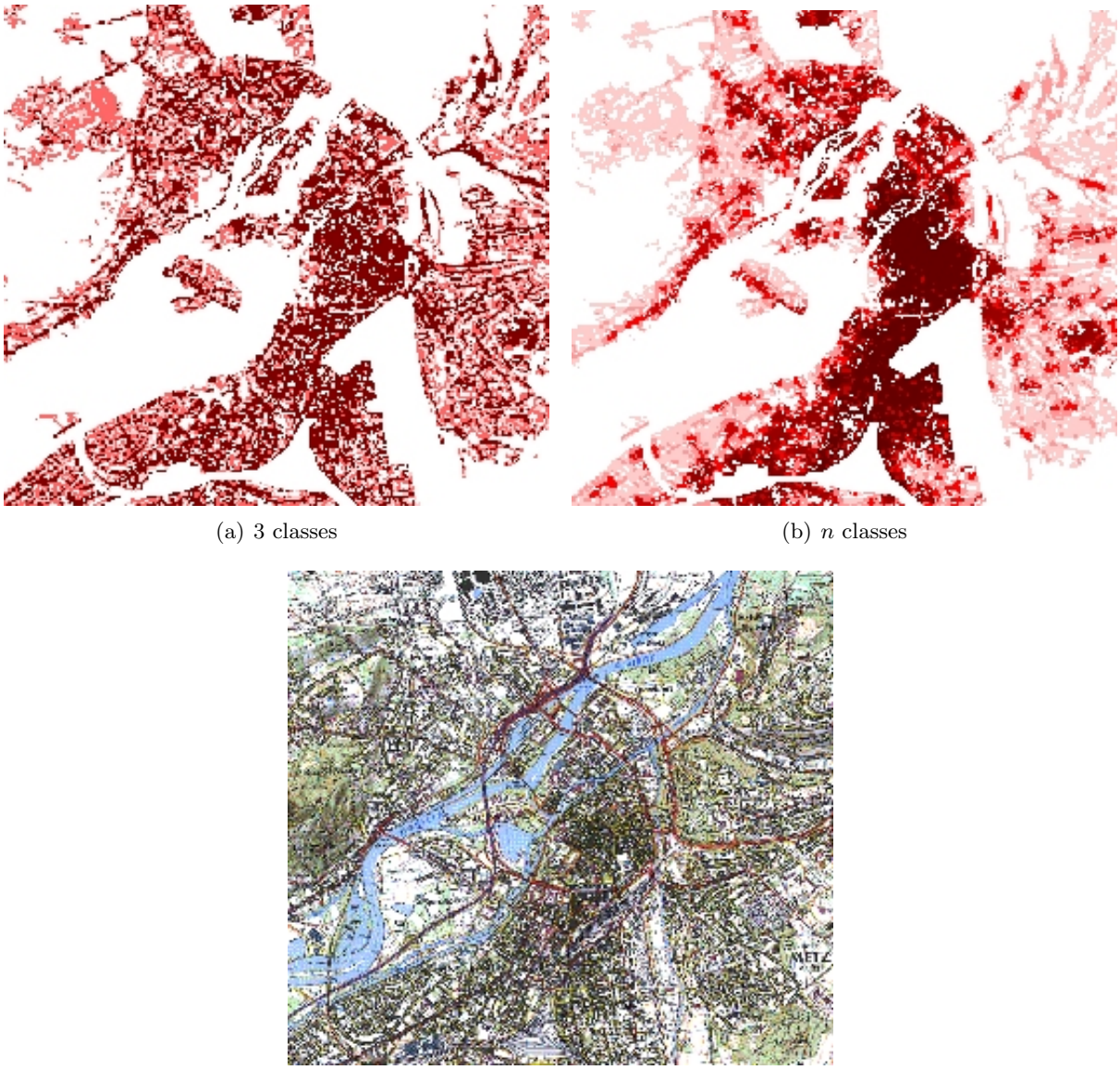
FIG. 6.15 – Modélisation de la population à partir de la classification contextuelle

La spatialisation finalement obtenue est représentée sur la figure 6.16, qui comporte les résultats des modélisations sur trois classes et sur n classes, comparés à un extrait de la carte au 1/25.000 de l'IGN sur la même zone. Elle illustre bien une certaine supériorité de la classification contextuelle comme donnée de base à la spatialisation des populations. Elle n'est alors plus tributaire de la définition radiométrique des classes, nécessairement un peu arbitraire, et propose une vision plus continue. Elle est fondée sur la notion de classes d'habitat, obtenues par analyse de la répartition géographique, de la densité des classes de bâti issues de l'analyse radiométrique.

6.4.2.4 Avantages et inconvénients des trois méthodes

La succession de ces trois méthodes témoigne d'une progression dans le degré de finesse atteint par la modélisation de la relation entre les espaces bâtis décrits par les techniques spatiales et la population qui les occupent. Les limites des représentations cartographiques à l'échelle du pixel sont mises en évidence. L'intérêt se porte plutôt vers une représentation par zones qui, bien que gommant la variabilité spatiale de la distribution, la rend plus lisible. Malgré tout, l'information calculée au pixel demeure la base de toute l'analyse.

Si la première méthode exposée a le mérite d'être rapide et simple à mettre en œuvre, elle ne propose qu'une évaluation très globale de la répartition de la population, induisant des fortes discontinuités spatiales. Elle fournit néanmoins les premières approximations utilisées dans la



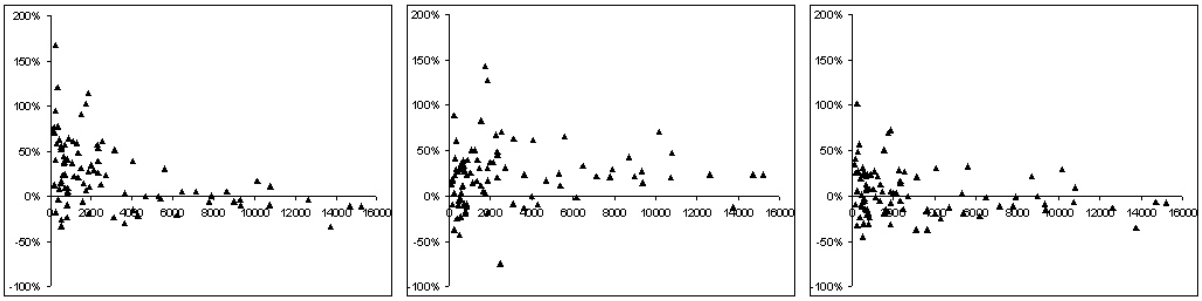
(a) 3 classes

(b) n classes

(c) Carte IGN

FIG. 6.16 – Spatialisation de la population sur trois classes (a), sur n classes de bâti (b) et portion de carte IGN 1/25.000 correspondante (c)

suite des calculs. La seconde méthode tente d'exploiter l'information thématique sur la typologie de bâti provenant de la classification d'occupation du sol, réalisée par analyse physique des canaux d'acquisition. Elle aboutit à des coefficients de densité de population propres à chaque classe thématique, introduisant une variabilité intra-communale de la répartition de ses habitants. Comme la première méthode, elle présente également de fortes discontinuités spatiales, contrôlées cette fois-ci par la localisation des classes thématiques. Pour aboutir à une répartition plus uniforme, l'emploi de la classification contextuelle est envisagé. En apportant la notion de classes d'habitat, plutôt que de bâti, elle propose un mode de spatialisation qui s'affranchit du caractère arbitraire des limites communales et des classes thématiques. La progression dans la définition des modèles provoque une diminution des erreurs d'estimation (fig. 6.17) même si elles restent encore importantes.



(a) Uniforme (b) 3 classes (c) 24 classes

FIG. 6.17 – Erreurs d'estimation des modèles selon le niveau de segmentation de l'espace urbain

La base géographique utilisée pour la répartition exploite à la fois les informations dérivées de l'analyse des produits d'imagerie spatiale SPOT et des informations extraites des sources de données exogènes. L'emploi d'images plus résolues en géométrie devrait permettre d'accéder à un niveau de détail plus élevé des classifications. Ces dernières produiraient *a priori* une base géographique plus précise en évitant le recours aux données externes, néanmoins capables d'apporter une information fonctionnelle inaccessible au satellite. De plus, l'élévation des bâtiments apparaît comme un facteur pertinent pour améliorer la définition de la densité urbaine. On peut légitimement espérer une meilleure efficacité des modèles en prenant en compte les distributions horizontale et verticale de l'habitat.

Pour l'instant, la seule validation de ces produits est réalisée par inversion du modèle de distribution, qui consiste à évaluer la population totale à partir du résultat de la spatialisation. C'est de cette façon que sont estimées les erreurs présentées précédemment. Les bases de données INSEE existent à une échelle géographique plus fine : les îlots de 5000 habitants ou les IRIS de 2000 habitants (seulement dans les communes de plus de 100 000 habitants). Ces produits pourraient d'une part fournir une base surfacique officielle, évitant la construction d'une segmentation hétérogène du territoire, et d'autre part constituer une source contradictoire pour valider la spatialisation.

Les trois méthodes présentées sont ciblées sur la répartition géographique de la population communale à l'intérieur des zones habitables. De fait, la seule variable considérée dans la base de données INSEE est l'indice de population des différents recensements. L'ampleur des développements nécessaires à la mise en place de ces méthodologies justifie la seule prise en compte de ce paramètre. Cependant, il est envisageable de s'intéresser à d'autres variables qui trouveraient un écho évident pour la gestion des risques d'inondation (migrations intra et inter-communales professionnelles, emplois, entreprises...).

6.4.3 Analyse d'impacts d'événements historiques

Comme pour l'occupation du sol et son évolution, l'analyse de l'impact de crues historiques est menée à partir de la spatialisation des populations réalisée à la section 6.4.2.3. Les inondations de 1947 et 1983 sont à nouveau prises comme événements de référence.

La grande crue de 1947 a eu des impacts économiques et humains très lourds, et si elle venait à se reproduire, plus ou moins à l'identique, les populations de l'agglomération de Metz seraient sévèrement touchées (fig. 6.18). Le couplage de la classification d'occupation du sol avec la population, son intersection géographique avec le champ d'inondation maximal de 1947

et sa représentation par zones propose une vision efficace et intuitive de l'impact d'une telle catastrophe, dans l'état des connaissances de la région en 2000 (fig. C.11).

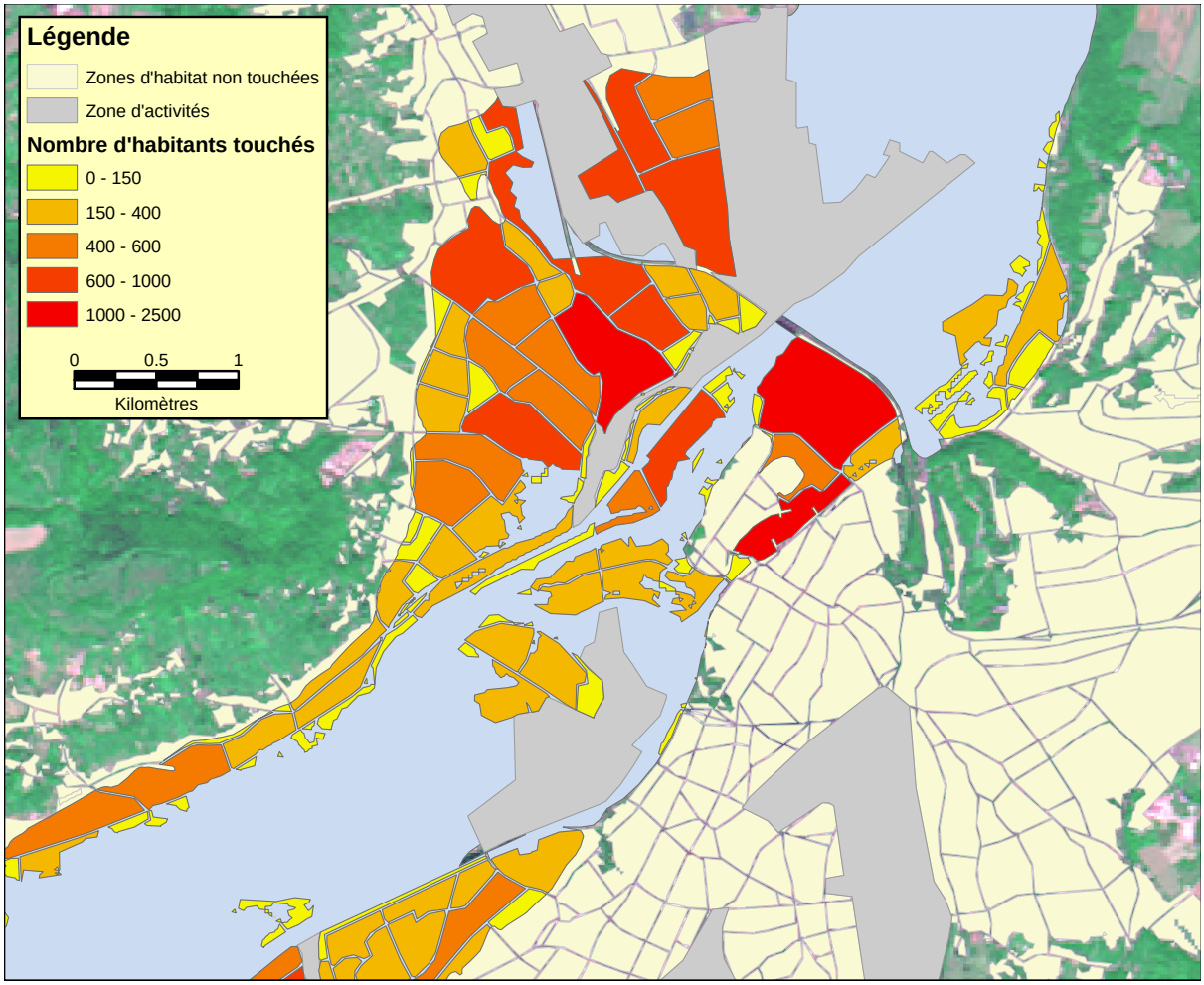


FIG. 6.18 – Impact d'un crue d'ampleur similaire à 1947 sur le centre de Metz

La crue de décembre 1983 (fig. C.16) aurait des conséquences moins importantes sur la population, si elle venait à se reproduire. Malgré tout, il faut souligner que cet aspect de l'étude de l'impact d'événements historiques ne propose qu'une évaluation du nombre d'habitants concernés par l'inondation (tab. 6.8), et ne permet en aucun cas une évaluation économique des dégâts. On peut d'ailleurs noter sur les deux cartes C.15 et C.16 que les zones d'activité de l'agglomération messine sont largement concernées par le risque d'une crue de même ampleur que 1947 ou 1983.

Ces exemples d'application, bien qu'ils ne soient encore que des prototypes, laissent envisager une utilisation de ce type d'information tant en analyse d'impacts *a posteriori* qu'avant et pendant le déroulement de l'événement.

Commune	Nombre d'habitants total estimé en 2000	Nb estimé d'habitants touchés	
		1947	1983
Apach	600	53	15
Ay sur Moselle	2300	522	1020
Le Ban Saint Martin	3200	2679	1606
Longeville-les-Metz	3200	2728	2187
Metz	120000	21587	2786
Talange	7000	2883	758
Uckange	7800	4361	1955

TAB. 6.8 – Evaluation de l'impact sur la population de crues similaires à 1947 et 1983

6.5 Conclusions

La constitution d'une large base de données couvrant une période de quarante ans permet de s'intéresser à la dynamique des zones urbanisées, *i.e.* des enjeux les plus importants. L'interprétation des données déclassifiées du satellite espion américain CORONA fournit un jalon historique incomparable. L'analyse numérique complète de ces données est quasi impossible, mais la photo-interprétation permet d'accéder à l'extension de la zone urbanisée en 1962. Les traitements appliqués aux images SPOT dérivent d'une méthodologie bien éprouvée, appliquée depuis plusieurs années sur la région alsacienne. La réalisation de classifications à partir d'images de 1986, 1994 et 2000 fournit une vision dynamique du paysage et notamment des zones urbaines.

Afin de mieux rendre compte de la diversité du milieu urbain, une méthode de réaffectation par analyse de densité est proposée. La classification d'occupation du sol, représentée selon une nomenclature détaillée, ne donne qu'une dimension intuitive à la densité urbaine. La réaffectation transforme cette appréciation qualitative en une information quantitative, exploitable par les outils d'analyse spatiale. Le résultat est structuré en 24 classes, issues des trois classes originelles dénommées bâti dense, discontinu et lâche.

Disposant de plusieurs niveaux d'interprétation des zones urbaines (1, 3 et 24 classes) et des données communales du recensement de 1999, une méthode de spatialisation des populations est proposée. Elle tend à fournir une autre vision des enjeux et de leur vulnérabilité, en s'intéressant au nombre de personnes concernées par l'inondation. Trois niveaux de description de la répartition de la population sont envisagés, correspondant aux trois niveaux de description de la zone urbaine. Différents modes de représentation de l'information sont également étudiés. La définition de zones à partir du réseau routier fournit une base géographique assez efficace de calcul et de représentation. Cependant, une validation de la méthode de spatialisation par l'utilisation de données de recensement mieux résolues spatialement fait encore défaut. Enfin, l'intégration de données spatiales plus résolues et d'informations altimétriques sur les bâtiments constitue une voie de développement qu'il semble utile d'investiguer.

La combinaison des différents plans d'information générés permet de considérer les enjeux et leur évolution de différents points de vue. Aussi, le croisement de la dynamique urbaine sur quarante ans avec les champs d'inondation historiques met en évidence le niveau de prise en compte d'aléas connus dans le processus d'urbanisation. De plus, la représentation graphique proposée met en relation les variations de surfaces urbanisées aux échelles de la commune et du champ d'inondation. Enfin, le croisement des champs d'inondation avec l'information spatialisée sur la population fournit une évaluation du nombre d'habitants touchés par un événement. Même si des améliorations sont réalisables sur ce type de cartographies, elles permettent d'accéder à une autre dimension de l'événement : une dimension humaine, voire humanitaire.

6.6 Bibliographie

Altmaier A., Kany C., 2002, Digital surface model generation from CORONA satellite images, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 56, 221-235.

Baulig H., 1950, Les inondations de décembre 1947, *Publications du Comité Consultatif Météorologique du Bas-Rhin, Annales de l'Institut de Physique du Globe de Strasbourg*, Vol. V, 3e part., 12.

Begni G., 1988, Document de synthèse sur l'étalonnage absolu des données SPOT, CNES, 19.

Chavez P.S., Kwarteng A.Y., 1989, Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image using selective principal components analysis, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55 (3), 339-348.

Clayton C., Estes J.E., 1980, Image analysis as a check on Census enumeration accuracy, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 46, 757-764.

Collins W.G., El-Beik A.H.A., 1971, Population census with the aid of aerial photographs : an experiment in the city of Leeds, *Photogrammetric Record*, Vol. 7, 16-26.

Dégardin F., 1985, Quelques réflexions pratiques sur les crues des 9-11 avril et 25-26 mai 1983 dans le bassin français de la Moselle, *MOSELLA-TOME XV - Numéro Spécial Annuel*, 183-209.

DIREN Lorraine, 1996, Hydrologie des crues de la Moselle et de la Saône, Synhtèse des études hydrologiques et propositions en matière de politiques de prévention.

Elvidge C.D., Baugh K.E., Kihn E.A., Kroehl H.W., Davis E.R., 1997, Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational linescan system, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 63 (6), 727-734.

ERDAS, 1999, *Field guide*, Fifth edition, 698.

Frécaut R., 1972, *La Moselle et son bassin. Contribution à l'hydrologie et à la dynamique fluviale en milieu tempéré ocanique*, Thèse de doctorat, Université de Brest.

Haase D., 2003, Holocene floodplains and their distribution in urban areas - functionality indicators for their retention potentials, *Landscape and Urban Planning*, Vol. 66 (1), 5-18.

Henry J.-B., 2000a, Techniques spatiales et systèmes d'information pour la gestion des inondations, Mémoire de soutenance de diplôme d'ingénieur ENSAIS, section Topographie, 63.

Henry J.-B., 2000b, Intégration de données multisources dans un système d'information pour la gestion des risques naturels - Application aux inondations du bassin de la Zorn (Alsace-France), Mémoire de DEA Systèmes Spatiaux et Environnement, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 80.

Hsu S.Y., 1971, Population estimation, *Photogrammetric Engineering*, Vol. 37, 449-454.

Iiasaka J., Hegedus E., 1982, Population estimation from Landsat imagery, *Remote Sensing Environment*, Vol. 12, 259-272.

Kraus S.P., Senger L.W., Ryerson J.M., 1974, Estimating population from photographically determined residential land use types, *Remote Sensing Environment*, Vol. 3.

Kraus K., Waldhäusl P., 1998, Manuel de Photogrammétrie, Principes et procédés fondamentaux - Volume I, Editions Hermès Paris, 407.

Lafue Y., 2002, La très haute résolution au service de la gestion et de la prévention du risque inondation, Rapport de Stage de DESS Applications des Techniques Spatiales, Universités Robert Schuman, Louis Pasteur et Marc Bloch de Strasbourg.

Langford M., Maguire D.J., Unwin D.J., 1991, The areal interpolation problem : estimating population using remote sensing in a GIS framework, in *Handling geographical information*, Longman, London, 55-77.

Langford M., Unwin D.J., 1994, Generating and mapping population density surfaces within a geographical information system, *The Cartographic Journal*, Vol. 31, 21-26.

Letouze F., 1985, Les crues d'hiver et de printemps 1982-83 sur les bassins ruraux de Lorraine, *MOSELLA-TOME XV - Numéro Spécial Annuel*, 163-182.

Mac Donald R.A., 1995a, Opening the Cold War Sky to the Public : Declassifying Satellite Reconnaissance Imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61 (4), 385-390.

Mac Donald R.A., 1995b, CORONA : Success for Space Reconnaissance, A Look into the Cold War and a Revolution for Intelligence, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61 (4), 689-719.

Magallon L., 2002, Méthode d'analyse conjointe de données de recensement et d'observation de la Terre appliquée au risque d'inondation, Mémoire de Soutenance de Diplôme d'Ingénieur, Spécialité Topographie, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries de Strasbourg.

Martin D., Bracken I., 1993, The integration of socio-economic and physical resource data for applied land management information systems, *Applied Geography*, Vol. 13, 45-53.

Mennis, J., 2003. Generating surface models of population using dasymetric mapping, *The Professional Geographer*, Vol. 55(1), 31-42.

Paul P., Roussel I., 1985, Les précipitations exceptionnelles d'avril et mai 1983 l'origine des fortes crues en Alsace et en Lorraine, *MOSELLA-TOME XV - Numéro Spécial Annuel*, 3-29.

Ogrosky C.E., 1975, Population estimates from satellite imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 41, 707-712.

Olorunfemi J.F., 1983, Towards a philosophy of population census in Nigeria : remote sensing inputs, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 4 (4), 731-738.

Streutker D.R., 2003, Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 85 (3), 282-289.

Sutton P., 1997, Modeling population density with night time satellite imagery and GIS, *Computer, Environment and Urban Systems*, Vol. 21 (3/4), 227-244.

Sutton P., 2003, A scale-adjusted measure of "Urban sprawl" using nighttime satellite imagery, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 86 (3), 353-369.
Takashima M., Hayashi H., Nagata S., 2003, Monitoring spatial distribution of population and buildings using DMSP night-time imagery and its application for earthquake damage assessment, *Proceedings of IGARSS'03*.

Tholey N., Clandillon S., de Fraipont P., 1997, Integration of SPOT derived information into urban and land planning, En example of an original french regional partnership in Alsace, *ESRI User Conference*, San Diego (CA), July 8-11.

Weber C., Hirsch J., 1992, Some urban measurements from SPOT data : urban life quality indices, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13 (17), 3251-3261.

Wright J.K., 1936, A method of mapping densities of population with Cape Cod as an example, *Geographic Review*, Vol. 26, 103-110.

Yuan Y., Richard M.S., Limp W.F., 1997, Remodeling census population with spatial information from Landsat TM imagery, *Computer, Environment and Urban Systems*, Vol. 21 (3/4), 245-258.

Zhou G., Jezek K., Wright W., Rand J., Granger J., 2002, Orthorectification of 1960s satellite photographs covering Greenland, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40 (6), 1247-1259.

Références Internet

(NRO@), http ://www.nro.gov.

Conclusions et perspectives

Conclusions et perspectives

Focalisée sur le risque d'inondation de plaine, cette thèse propose une vision d'ensemble des informations accessibles grâce aux techniques d'acquisition et d'analyse spatiales. Illustrée par des exemples précis, elle présente les capacités des systèmes d'observation de la Terre à fournir une aide pertinente au processus de gestion du risque, scindé en trois grandes phases (prévision, crise et post-crise).

Les trois études de cas mettent en évidence les intérêts de deux types de données, radar et optiques. Les techniques d'acquisition radar permettent tout d'abord d'obtenir une évaluation de paramètres biophysiques tel que l'humidité de surface des sols. De telles mesures trouvent des échos largement favorables auprès des communautés développant les modélisations hydrauliques et hydrologiques, utilisables en prévision. Ensuite, leur capacité d'acquisition par tous temps (indépendante de la nébulosité, de jour comme de nuit) en fait des outils de cartographie des inondations particulièrement intéressants. Ces informations sont exploitables tant par les gestionnaires de crise pour gérer au mieux l'événement, que par les modélisateurs pour améliorer la calibration des modèles. Les images optiques permettent de réaliser des analyses d'impact, pendant le déroulement de la crue ou *a posteriori*, en s'intéressant à la qualification des enjeux, tout comme à leur évolution dans le temps. Ces différents aspects de l'exploitation des acquisitions spatiales constituent une forte valorisation des bases de données d'archive des différents systèmes d'observation. Les résultats obtenus pour les trois phases de gestion laissent entrevoir des perspectives nombreuses et diversifiées.

Une aide à la prévision

Améliorer la prévision des phénomènes, en développant les outils de modélisation et la connaissance des fonctionnements des bassins, est un défi majeur de la gestion du risque. Depuis quelques dizaines d'années, les données d'observation de la Terre offrent toute une gamme d'informations spatialisées sur d'importants territoires, qui complète et enrichit les campagnes de terrain. Il importe donc de savoir quels sont les paramètres accessibles par les techniques spatiales qui peuvent raisonnablement être utilisés par les modèles et/ou en complément de leur mise en œuvre.

Les propriétés physiques de l'interaction signal-matière dans le domaine des micro-ondes, en particulier l'influence de la teneur en eau des sols sur la constante diélectrique et la réflexion spéculaire de l'onde radar sur l'eau libre, sont exploitées dans la première étude de cas. Elles complètent et apportent une dimension spatialisée aux mesures collectées par les observations ponctuelles. Tout d'abord, les relations établies entre les variables hydro-météorologiques (pluviométrie et piézométrie) et la mesure de rétrodiffusion radar démontrent la capacité des systèmes radar orbitaux à fournir une évaluation spatialisée du niveau de saturation d'un bassin. Puis, une méthode d'identification de zones hydrauliques homogènes est proposée par des techniques statistiques de réduction d'information et de classement, appliquées à une série temporelle d'images. La stabilité des résultats, validés par l'expertise de terrain, témoigne à la fois

des exigences de la méthode, de sa cohérence et de sa pertinence. Enfin, l'extension de l'inondation observée par le radar est intégrée à la construction d'une méthode de calage des modèles hydrauliques visant à améliorer leurs performances, en prenant en compte l'inter-dépendance de leurs différents paramètres et les incertitudes sur les mesures de contrôle, qu'elles proviennent du terrain comme de l'imagerie.

Les perspectives de poursuite de cette étude sont très larges, et un certain nombre d'entre elles sont envisagées dans la suite du projet. Il semble tout d'abord intéressant d'approfondir les relations établies empiriquement, notamment en reliant les paliers de saturation issus de l'imagerie aux valeurs établies par les études antérieures menées par le CRP-GL. Ensuite, l'extension temporelle à trois années, voire plus, de la série d'images exploitée permettrait de couvrir la gamme de variation annuelle du bilan hydrologique et de valider les corrélations relevées. De plus, toutes les images de la période d'acquisition en mode "3 jours" d'ERS-1 n'ont pas été utilisées. Leur intégration, par la méthode d'identification des zones hydrauliques homogènes, constituerait un moyen de valider cette méthode et de l'affiner. Cette extension et cette densification de la couverture temporelle permettraient de renforcer l'assise des interprétations formulées et des méthodes développées. Il peut également être envisagé de retravailler ces aspects de l'étude en s'intéressant à la phase et à la polarisation du signal radar, plutôt qu'à sa seule amplitude, pour les aborder d'un autre point de vue. Enfin, la méthode de calage des modèles avec les données de terrain et les informations dérivées de l'imagerie n'en est qu'à ses débuts. Si des premiers résultats encourageants sont fortement pressentis, des efforts particuliers de développement seront nécessaires, tant pour l'évaluation des incertitudes sur l'extension de l'inondation à partir d'une image radar que pour leur prise en compte dans la détermination des intervalles de confiance sur les paramètres.

Une aide à la gestion de crise

Très utile pour caler les modèles hydrauliques, la cartographie de l'étendue de l'inondation devient capitale en période de crise, dès lors qu'elle permet le déploiement des moyens d'intervention et de secours sur le terrain. Pour cela, la plupart des systèmes d'observation de la Terre sont déjà exploités. L'aptitude à l'acquisition par tous les temps confèrent aux techniques radar un grand intérêt vis-à-vis de la problématique des inondations. Le nouvel instrument radar ASAR du satellite ENVISAT offre de nouvelles possibilités d'imagerie (multi-polarisation, multi-incidence, multi-résolution) qui doivent être évaluées pour ce type d'application.

L'évaluation radiométrique des produits d'imagerie ASAR disponibles est effectuée pour vérifier les niveaux de performance effectivement atteints par l'instrument, alors en phase de recette en vol. Elle montre que les produits à haute résolution spatiale atteignent les spécifications radiométriques initiales, contrairement à la moyenne résolution. Avec trois polarisations acquises quasi-simultanément (HH et HV par ENVISAT, VV par ERS-2), une analyse thématique de leur complémentarité est proposée d'abord par pseudo-calibration puis par photo-interprétation avec un intérêt tout particulier pour les surfaces en eau. L'emploi de deux polarisations, croisée et parallèle, constitue une solution efficace pour l'identification des surfaces inondées comme pour l'appréciation du paysage environnant à partir d'une seule acquisition pendant l'inondation. L'intérêt de la moyenne résolution spatiale pour la problématique des inondations est son excellente résolution radiométrique et son faible volume facilitant les traitements, mais n'offrant aucune amélioration de la fréquence de revisite.

L'instrument ASAR apporte des réponses très positives sur la problématique de la cartographie des inondations, notamment avec son mode de fonctionnement en polarisation alternée, produit à haute et moyenne résolutions spatiales. Il semble nécessaire de transposer, et d'adapter aux

spécificités de l'instrument, les différents acquis pratiques et méthodologiques des missions ERS-1 et 2. Concernant la cartographie des inondations en particulier, la phase de l'onde radar pourrait apporter des éléments supplémentaires pour infirmer ou confirmer la présence d'eau, mais nécessiterait d'importants développements pour être utilisable en temps rapide pendant la crise. D'autres modes de fonctionnement à haute résolution temporelle, tels que le champs large ou la basse résolution, seraient à évaluer pour réaliser des cartes à très grande échelle, surveiller de grands bassins et disposer ainsi d'une vision d'ensemble de la situation.

Une aide à la prévention

Qu'elle soit simulée ou observée, l'information spatiale sur l'aléa, couplée à une description des enjeux, permet d'évaluer l'impact de l'inondation. Ces enjeux, pris au sens des biens et des personnes, évoluent rapidement et ne sont pas toujours connus précisément dans le temps et dans l'espace. Réalisée avant, pendant ou après l'inondation, la pertinence de l'analyse d'impact est conditionnée par la qualité et l'actualité des données sur les enjeux. L'observation de la Terre propose une réponse en termes de couverture spatiale, de fréquence de mise à jour et d'homogénéité d'information.

Les archives de l'observation de la Terre offrent un moyen efficace de reconstituer l'évolution des zones urbanisées au cours du temps. Grâce à la déclassification des images des premiers systèmes orbitaux d'espionnage, quarante ans d'urbanisation sont cartographiés, illustrant la prise en compte (ou non) de l'aléa inondation. Une méthode synthétique de représentation graphique est proposée, en analysant le processus d'urbanisation simultanément à l'échelle de la commune et à l'échelle de différents champs d'inondations historiques. Mais la cartographie des zones urbanisées sert également de structuration géographique à la modélisation et à l'évaluation de la répartition de la population dans les zones vulnérables. Plusieurs niveaux de détail de la description de l'espace urbain sont considérés et il apparaît nécessaire de dépasser le résultat de la seule analyse d'image en passant à une classification de la densité d'habitat. La méthode proposée permet de passer d'un nombre total d'habitants par commune à une représentation spatialisée d'une densité de population plus proche de la réalité.

Cette troisième étude de cas ouvre deux grandes pistes d'investigation : la description des zones urbaines dans l'espace et surtout dans le temps pour localiser les failles de l'urbanisation ; l'utilisation de cette description pour apporter une dimension humaine à l'évaluation des enjeux. Tout d'abord, la démarche d'évaluation des enjeux matériels peut être renforcée par l'exploitation de la méthode sur des thèmes particuliers (industriel, résidentiel...) et non plus sur l'emprise urbaine globale. L'emploi de produits d'imagerie à plus forte résolution spatiale pourrait contribuer à cette amélioration thématique. De plus, la notion de valeur est encore absente de la démarche et pourrait être prise en compte en exploitant les données des assurances, notamment celles relatives à l'indemnisation des catastrophes naturelles. Enfin, les premiers résultats de la méthode de spatialisation des populations proposent des estimations qui nécessitent une validation, notamment par l'emploi de données de recensement définies sur une emprise géographique plus restreinte. De nombreuses améliorations de la méthode sont envisageables ; elles nécessitent toutes l'amélioration de la description de l'espace urbain. La très haute résolution spatiale peut certainement apporter une réponse, mais l'information sur la hauteur des bâtiments, et indirectement le nombre d'étages, semble être cruciale.

Bilan

L'aptitude des systèmes d'observation de la Terre à fournir une donnée événementielle géolocalisée et synchrone sur de vastes territoires constitue un des atouts spécifiques du secteur spatial pour participer au développement de l'utilisation de l'imagerie satellitaire dans la gestion des risques. L'analyse de ces données permet d'accéder à une information sur l'aléa et sur les enjeux. Fournie à différents pas de temps, différentes échelles et caractérisant différents paramètres, l'information dérivée de l'observation de la Terre ressort de cette étude, et des exemples qui la composent, comme une aide précieuse à la gestion du risque d'inondation.

Les questions actuelles du changement climatique et de l'impact des activités humaines sur l'intensité des catastrophes sont au cœur des préoccupations, à la fois sociales, sociétales, politiques et économiques. L'initiative GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*) témoigne de l'implication de la Commission Européenne et de l'Agence Spatiale Européenne dans ce type d'applications. Les techniques d'acquisition et d'analyse spatiales, en décrivant aléas et enjeux, adressent clairement ces deux champs d'action : environnement et sécurité.

La multiplication des plates-formes, la diversification des capteurs, l'augmentation des fréquences de revisite et l'amélioration des résolutions géométriques comptent parmi les facteurs techniques clefs du développement de la place du spatial dans les applications de sécurité. En parallèle, les dispositifs d'utilisation de la ressource spatiale doivent être encore renforcés, améliorés et communiqués encore plus largement aux utilisateurs potentiels. Ces facteurs structurels participent à rendre cette ressource utilisable facilement, rapidement et systématiquement pour générer une information cartographique à haute valeur ajoutée. L'obtention d'une cartographie de l'événement, au plus près de son paroxysme, conditionne toutes les activités d'analyse, de la prévision à l'évaluation des impacts.

ANNEXES

Annexe A

Spécifications des systèmes d'observation de la Terre

Cette première annexe regroupe les spécifications des différents systèmes d'observation de la Terre dont les données ont été exploitées au cours de ce travail. Ces informations complètent les aspects généraux et théoriques développés dans le chapitre 2. On y aborde les systèmes de télédétection optique puis radar.

A.1 Systèmes de télédétection optique

Cette section présente les systèmes de télédétection optique utilisés dans cette étude. On évoquera cependant les autres dispositifs d'acquisition ainsi que les futurs systèmes.

A.1.1 Le système CORONA

D'un point de vue historique et technique, l'aventure du programme CORONA a posé de nombreux jalons dans le développement des systèmes d'observation de la Terre, qu'ils soient à buts militaires dans un premier temps, puis civils dans un second temps. Les services de renseignement américains ont été les pionniers de l'observation de la Terre.

Ce programme ancien présente des intérêts historiques considérables, que ce soit du point de vue technique ou scientifique. Par conséquent, il semble intéressant et nécessaire de rappeler les événements qui lui ont donné naissance.

A.1.1.1 Les origines

Lancé en février 1958 par le président D. D. Eisenhower, le premier succès opérationnel du programme intervient en août 1960, moins de trois mois après l'arrêt des vols des avions espions U-2 (Wheelon, 1995). Ces appareils assuraient des missions photographiques capitales pour les renseignements américains, mais le vol 4154 de F.G. Powers abattu au-dessus du territoire soviétique a marqué la fin d'une époque.

L'objectif du programme est de mettre en place un satellite d'imagerie, pour des opérations de reconnaissance au-dessus du bloc Sino-Soviétique (Mac Donald, 1995). Les images sont enregistrées sur un film photographique stocké dans une capsule, éjectée en fin de mission. Cette capsule est ensuite récupérée par un avion équipé d'un filet (NRO@). D'un point de vue géopolitique, le programme CORONA se doit de fournir les moyens d'assurer la sécurité nationale des Etats-Unis, sans pour autant les placer dans des situations embarrassantes telles que celle qui a suivi l'affaire de la mission 4154. Autrement dit, dans le contexte tendu de la guerre

froide, les américains doivent mettre en place un système espion plus discret et plus efficace. C'est l'importance stratégique de ces informations qui explique l'opiniâtreté des développeurs du programme : la première réussite intervient au onzième lancement, et ce n'est qu'à partir de la troisième génération du système que le taux de réussite dépasse 50%.

De 1962 à 1964, parallèlement à CORONA, deux autres programmes d'imagerie par satellite sont développés sous les noms de LANYARD et ARGON. Leurs réalisations opérationnelles sont connues sous les noms de KH-5 pour ARGON et KH-6 pour LANYARD. Cette multiplication des projets traduit la forte volonté politique d'évaluer à distance l'évolution des moyens militaires des pays communistes.

C'est en février 1995 que le président Bill Clinton signe le décret 12951, ordonnant la déclassification de l'imagerie acquise par les systèmes spatiaux nationaux de reconnaissance et d'espionnage, connus sous le nom de missions CORONA, ARGON et LANYARD. Plus généralement, le gouvernement américain enclenche à cette date un processus de mise à disposition du public des données d'imagerie, jugées obsolètes par les services de renseignement. Bien entendu, cette déclassification se doit d'être compatible avec les intérêts de la sécurité nationale et de la politique étrangère des Etats-Unis (Gore, 1995 in Mac Donald, 1995a).

Malgré la déclassification de ces données et des informations qui leurs correspondent, on constate un certain nombre de lacunes dans les caractéristiques techniques des chambres de prise de vue. Il reste extrêmement difficile d'obtenir des informations précises sur les systèmes optiques, les divers paramètres d'éphéméride...

A.1.1.2 Géométrie de l'acquisition

La technologie d'acquisition d'images employée par le programme CORONA est celle de la photographie. Différents systèmes ont été conçus, ils sont connus sous le nom de KH (en anglais : *keyhole*, littéralement le trou de serrure). Chaque nouvelle version intègre les leçons des missions précédentes, permettant ainsi d'évoluer de l'image monoscopique à 40 ft (∼12 m) de résolution au sol, vers le couple d'images stéréoscopiques à 6 ft (∼1,80 m). Les émulsions évoluent elles aussi, permettant des agrandissement pouvant aller de 4× à 40×, et des échelles de travail du 1/1.000.000^e au 1/3.000^e, selon le type de film et de focale utilisés. Au fil des missions, comme le montre le tableau A.1, la conception des caméras s'adapte et la technique progresse (Mac Donald, 1995a).

Caméra	KH-1/2/3	KH-4	KH-4A	KH-4B	KH-5	KH-6
Période opérationnelle	1959-62	1962-1963	1963-69	1967-72	05/1962-08/1964	07/08/63
Durée de mission	1 à 4 j	6 à 7 j	4 à 15 j	19 j	n/c	n/c
Altitude opérationnelle	n/c	200 km (e)	185 km (e)	150 km (e)	320 km	170 km
Couverture	n/c	n/c	20 X 270 km	16 X 220 km	550 X 550 km	14 X 74 km
Ouverture de balayage	70°	70°	70°	70°	n/c	22°
Type de prise de vue	mono	stéréo	stéréo	stéréo	scène	panoramique
Focale	61 cm	61 cm	61 cm	61 cm	7,6 cm	167 cm
Résolution du film	50-100 l/mm	50-100 l/mm	120 l/mm	160 l/mm	30 l/mm	160 l/mm
Résolution au sol	7-24 m	6-15 m	5-15 m	3,6 m	270 m	3,6 m
Echelle de prise de vue	n/c	1/300.000	1/305.000	1/247.500	1/4.250.000	1/100.000
Echelle maximale	n/c	1/12.000	1/7.500	1/7.500	1/1.000.000	1/3.000

Tab. A.1 – Systèmes photographiques KH (d'après Mac Donald, 1995a)

La géométrie de la prise de vue photographique est la projection centrale. Tout système optique utilisé pour focaliser l'image du terrain sur un film engendre des distorsions qu'il s'agit de pouvoir corriger. Les méthodes de la photogrammétrie sont, depuis de longues années, en mesure

de calibrer ces systèmes optiques et par conséquent, de corriger rigoureusement leurs aberrations (Kraus et Waldhäusl, 1998). L'expérience montre que la prise en compte de ces erreurs systématiques est des plus nécessaires, en particulier lorsqu'il s'agit d'extraire une information géographique, correcte du point de vue géométrique.

La géométrie est un des problèmes majeurs avec les produits d'imagerie provenant du programme CORONA et des différentes phases qui le constituent. L'impossibilité de connaître avec précision les paramètres d'orbite implique des difficultés lors des traitements préliminaires sur la géométrie.

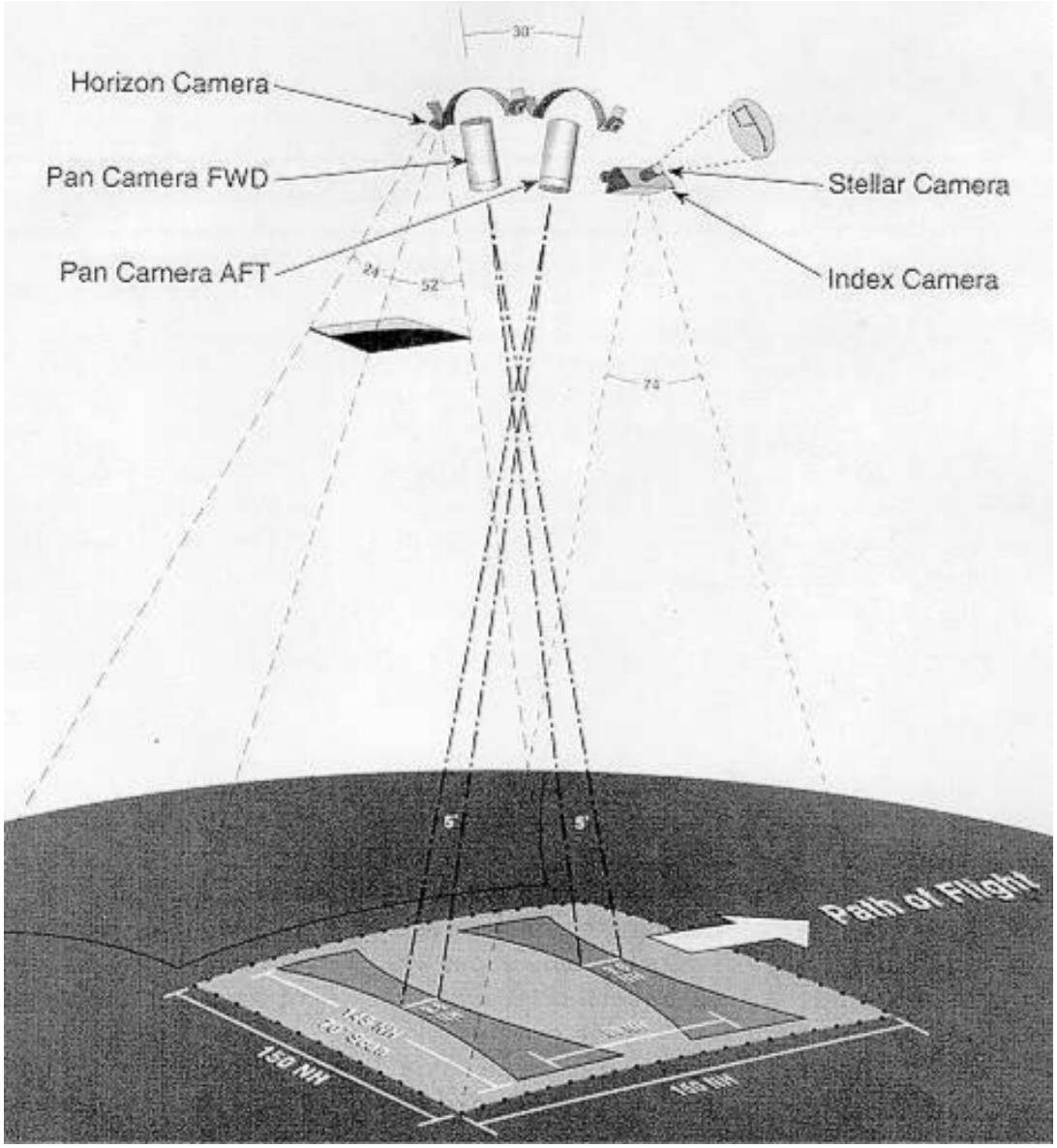


Fig. A.1 – Géométrie d'acquisition du système stéréoscopique KH-4 (Mac Donald, 1995)

Le système d'acquisition KH-4 représenté (fig. A.1 et fig. A.2) combine deux caméras panoramiques KH-3, l'une pointée 15 ° en avant du nadir, l'autre 15 ° en arrière. Techniquement (tab. A.1), il a connu plusieurs versions (KH-4, KH-4 A, KH-4 B) et les progrès qu'elles incluent ne concernent que la finesse des émulsions, les capacités de stockage de film, ou encore le doublement

de la capsule de récupération (*recovery vehicle* ou *bucket*) mais pas les principes géométriques de la prise de vues. La figure A.2 témoigne de la complexité du système global, mais aussi et surtout de son ingéniosité : système de localisation géodésique (*stellar camera*, *index camera*), de contrôle de l'attitude du satellite (*horizon camera*).

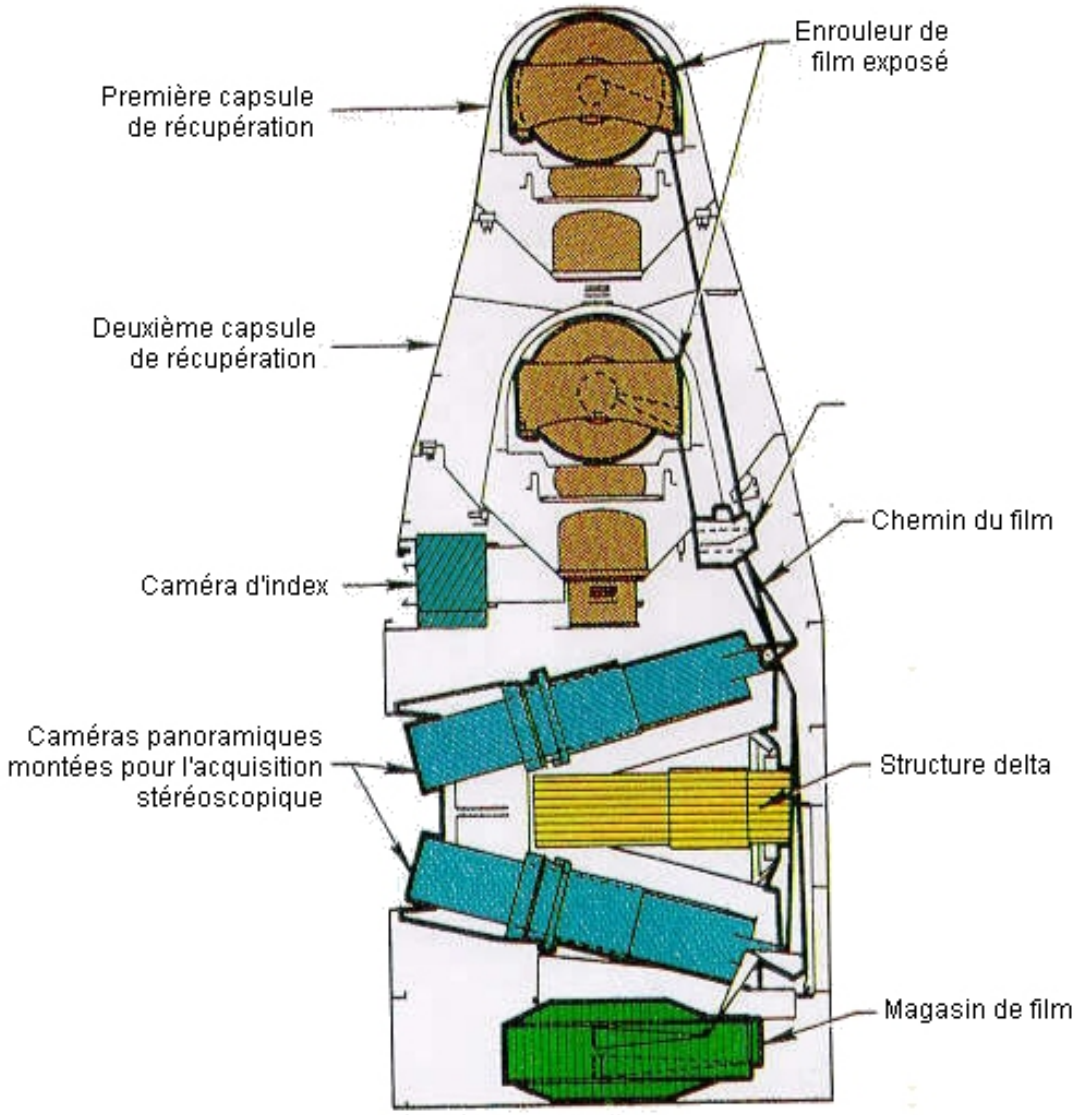


Fig. A.2 – Constitution de la caméra KH-4B (NRO@)

La formation de l'image sur le film photographique est rendu possible par les avancements concomitants du satellite sur sa trace et de la pellicule devant l'ouverture (le trou de serrure). Les caméras qui suivent un mouvement permanent de rotation forment alors l'image.

L'illustration de la figure A.1 donne une représentation assez fidèle de ce qu'engendre la courbure de la Terre sur la géométrie des images acquises à cette altitude. Cependant, hormis pour les images acquises par le programme ARGON (KH-5), la largeur des bandes est telle que l'on peut aisément faire l'approximation d'une échelle constante sur la largeur de la bande.

A.1.1.3 Intérêt de la donnée déclassifiée

L'étude menée sur le Parc Naturel Régional des Vosges du Nord par Clandillon *et al.* (2002) met en évidence l'intérêt historique de ces données. Il en ressort cependant de grosses difficultés de traitement : sur le plan de la géométrie, notamment pour la saisie de points d'amer à partir de références beaucoup plus récentes, et de la radiométrie des données numérisées. Par conséquent, leur exploitation semble plutôt vouée à la photo interprétation qu'à des méthodes basées sur l'analyse radiométrique, comme le montre l'étude menée par Tappan *et al.* (2000).

Altmaier et Kany (2002) présentent une expérience réussie sur le Maroc, d'orthorectification et de génération de modèle numérique de surface, avec des précisions de 10 m en altimétrie contre 3 en planimétrie. Sur la thématique de la cartographie des glaces du Groënland, Zhou *et al.* (2002) proposent un modèle géométrique rigoureux pour l'orthorectification de ces données par ajustement en bloc par la méthode des faisceaux.

Comme le présente Mac Donald (1995b), les données déclassifiées présentent de grands intérêts scientifiques. Elles constituent une source incomparable d'information pour "remonter le temps" et étudier l'impact de l'activité humaine sur les paysages.

A.1.2 Les systèmes SPOT

La série des satellites SPOT débute en 1986 avec le lancement de SPOT 1 (*Système Probatoire d'Observation de la Terre*). L'orbite de tous ces satellites, à 822 km d'altitude, est quasi-polaire et héliosynchrone. Elle est qualifiée de phasée, c'est-à-dire que le satellite survole les mêmes zones tous les 26 jours, soit sa période de retour. Par conséquent, ce sont toujours les mêmes traces qui sont observées à intervalles réguliers. Durant ce laps de temps, il effectue 369 révolutions de 101 minutes.

A.1.2.1 Le capteur HRV(IR)

Le capteur HRV (*Haute Résolution Visible*), monté en double sur les trois premiers satellites SPOT, a été amélioré à la conception de SPOT4 en incluant une bande spectrale supplémentaire, le Moyen Infra Rouge (MIR), devenant ainsi HRVIR (*Haute Résolution Visible et Infra Rouge*). Par conséquent, le détecteur est capable d'acquérir des données dans les bandes présentées dans le tableau A.2, chacune possédant ses caractéristiques et ses propriétés vis-à-vis de la différenciation des objets (Lillesand et Kieffer, 1987).

Les bandes XS font référence aux satellites SPOT 1 à 3, alors que les Xi concernent SPOT 4. A partir de ces canaux sont définis des modes de fonctionnement pour l'acquisition des données.

A.1.2.2 Modes spectraux

SPOT 4 élargit le domaine spectral d'observation de ses prédécesseurs, en ajoutant une bande dans le moyen infra rouge. Par contre, le mode panchromatique P des SPOT 1/3, couvrant les bandes du vert (XS1) et du rouge (XS2), est réduit à un mode monospectral correspondant à la bande du rouge (tab. A.3).

Les modes mono et multispectraux fonctionnent sur les deux capteurs HRVIR, de manière simultanée ou individuelle, pour des scènes de 60×60 km.

Canal	**Longueur d'onde**	**Localisation spectrale**	**Applications**
XS1 ou Xi1	0.5 – 0.59 μm	Vert – Jaune	Mesure du sommet de réflectance végétale Discrimination de la végétation Analyse de la vigueur végétale Identification des infrastructures et bâti
XS2 ou Xi2	0.61 – 0.68 μm	Rouge	Absorption chlorophyllienne Différenciation des espèces végétales Identification des infrastructures et bâti
XS3 ou Xi3	0.79 – 0.89 μm	Proche Infra-Rouge (PIR)	Classement des espèces végétales Estimation de biomasse Extraction des surfaces en eau Discrimination de l'humidité du sol
Xi4	1.58 – 1.75 μm	Moyen Infra-Rouge (MIR)	Indicatif d'humidité végétale et du sol Stress végétal

Tab. A.2 – Bandes spectrales de SPOT et propriétés (d'après Lillesand et Kieffer, 1987)

Mode	**Bandes ou longueurs d'onde**	**Résolution**	**Systèmes**
Panchromatique (P)	0.51 – 0.73 μm	10 m	SPOT 1, 2, 3
Multispectral XS	XS 1 à 3	20 m	SPOT 1, 2, 3
Monospectral (M)	0.61 – 0.68 μm (Xi 2)	10 m	SPOT 4
Multispectral Xi	Xi 1 à 4	20 m	SPOT 4

Tab. A.3 – Modes spectraux du système SPOT

A.1.2.3 Echantillonnage des données

La série des satellites SPOT emploie le principe du balayage parallèle à la trajectoire (CCRS@), qui utilise le mouvement de la plate-forme afin d'enregistrer les données le long de lignes successives et de construire une image bidimensionnelle (fig. A.3). Un ensemble de détecteurs alignés (A) est situé sur le plan focal de l'image (B) formé par un système de lentilles (C). Ces détecteurs sont "poussés" le long de la trajectoire de la plate-forme (système *push broom*).

Les détecteurs individuels, capteurs CCD (*Charge Coupled Device*), mesurent l'énergie pour une cellule de résolution au sol (D). Le champ de vision instantané (CVI) détermine la résolution spatiale du système. Un ensemble distinct de détecteurs est nécessaire pour chacune des bandes spectrales. Les données sont ensuite enregistrées numériquement.

Le balayage parallèle à la trajectoire présente plusieurs avantages par rapport au balayage perpendiculaire à la trajectoire, qui utilise un miroir. L'ensemble de détecteurs, combiné au mouvement, permet d'avoir un temps de résidence plus long pour chacune des cellules de résolution au sol. Ceci permet aux détecteurs de capter plus d'énergie provenant de chaque cellule de résolution, ce qui améliore la résolution radiométrique. Le temps de résidence accru permet d'avoir un CVI plus petit, ainsi que de plus petites bandes spectrales, sans pour autant réduire la résolution radiométrique. De plus, comme les détecteurs sont des dispositifs micro-électroniques,

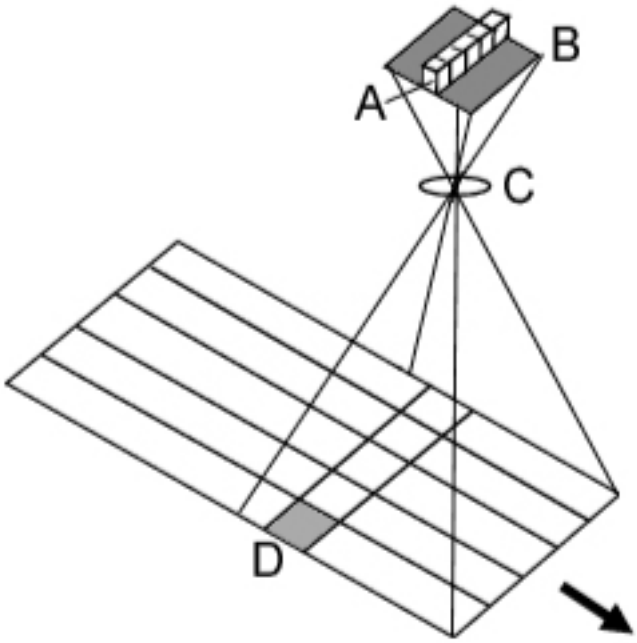


Fig. A.3 – Le système Push Broom (CCRS@)

ils sont généralement plus petits, plus légers et nécessitent moins d'énergie. Ils sont plus fiables et plus durables car ils n'ont pas de pièces mobiles. En contrepartie, le calibrage de milliers de détecteurs dans le but d'obtenir une sensibilité uniforme pour l'ensemble du système est une tâche nécessaire mais complexe (CCRS@).

A.1.2.4 Géométrie de l'image SPOT 1/4

Une scène SPOT, au niveau de pré-traitement le plus bas, est composée de 3000 lignes de 3000 pixels de 20 mètres en mode multispectral, ou de 6000 lignes de 6000 pixels de 10 mètres, en mode monospectral ou panchromatique.

Les possibilités de visées obliques (jusqu'à 27 $^\circ$) font varier la dimension au sol d'une ligne de 60 km à 80 km. Par conséquent, la taille des cellules de résolution est variable, mais elles sont systématiquement rééchantillonnées aux pas fixes de 10 ou 20 m, selon le mode spectral (Marquaille, 1999). Les autres paramètres régissant la géométrie de l'image proviennent du mode d'acquisition, c'est-à-dire du capteur présenté au paragraphe précédent.

A.1.2.5 Les niveaux de pré-traitement

Ces différents types d'acquisition peuvent être suivis de pré-traitements des données, avant d'être fournis au client. Ceux-ci s'étendent de l'égalisation radiométrique simple, sans correction de la géométrie, jusqu'à l'égalisation complète accompagnée d'une correction de distorsions et d'une projection cartographique par orthorectification (tab. A.4) (SPOT Image@).

MTF : *Modulation Transfer Function*, cette transformation consiste à corriger les différences de sensibilité entre les détecteurs des barrettes CCD en appliquant un modèle linéaire.
DDS : *Digital Dynamic Stretching*, qui consiste en un étalement dynamique de l'histogramme avant discrétisation.

Niveau	Egalisation radiométrique	Correction géométrique
1A	MTF, DDS optionnel	Aucune
1B	MTF, DDS optionnel	Sur la base des distorsions instrumentales *a priori*
2A	MTF, DDS	Distorsions instrumentales *a priori*, projection dans un système cartographique sans points de calage
2B	MTF, DDS	Distorsions instrumentales *a priori*, projection dans un système cartographique avec points de calage
ORTHO	MTF, DDS	Orthorectifcation

Tab. A.4 – Niveaux de pré-traitement de l'imagerie SPOT (SPOT Image@)

A.1.3 Les systèmes à Très Haute Résolution

Les systèmes civils d'observation de la Terre à Très Haute Résolution proposent à l'heure actuelle des résolutions spatiales s'étalant de 5 m (SPOT 5) à 0.61 m (Panchromatique Quickbird).

A.1.3.1 Les innovations SPOT 5

La première innovation du satellite SPOT 5 est le doublement des résolutions spatiales des modes panchromatique et multispectral, qui passent respectivement à 5 mètres et 10 mètres. Le passage de l'instrument HRVIR de SPOT 4, au HRG (Haute Résolution Géométrique) de SPOT 5, s'est fait essentiellement par le doublement du nombre de capteurs sur les barrettes CCD sans changement des résolutions spectrales.

La résolution de l'acquisition en mode panchromatique à 5 m peut encore être améliorée par l'utilisation d'un procédé appelé Super-Mode. L'acquisition est réalisée par une double barrette de détecteurs panchromatiques, montées en quinconce et décalées d'un demi pixel. Les deux images à 5 m ainsi acquises sont ensuite entrelacées, pour les positionner l'une par rapport à l'autre, et interpolées pour combler les pixels manquants, sur la base de la théorie de Shannon (qui spécifie que la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure à la fréquence maximale du signal divisée par deux). Enfin, l'image subit un procédé de restauration qui génère un produit à 2.5 m de résolution.

Le HRG est complété par un nouvel instrument : le HRS (Haute Résolution Stéréoscopique). Cet instrument permet des acquisitions stéréoscopiques, localisées à une précision de 15 mètres. Son fonctionnement est basé sur l'emploi de deux téléscopes, un visant vers l'avant et l'autre vers l'arrière. Ils fonctionnent alternativement toutes les 90 secondes, générant ainsi en 3 minutes des couples stéréoscopiques de 600 km de long sur 120 de large.

A.1.3.2 Le système IKONOS

Comme SPOT, IKONOS (tab. A.5) est placé sur une orbite circulaire quasi-polaire et héliosynchrone. L'angle de dépointage de l'instrument de prise de vues lui permet d'acquérir des données jusqu'à 700 km de sa trace au sol, offrant ainsi une fréquence de revisite de 1,5 jour. Bien évidemment, la résolution géométrique du produit en est affectée (supérieure à 2 mètres pour le panchromatique au dépointage maximum).

Contrairement aux systèmes classiques d'observation de la Terre (Landsat, SPOT...), IKONOS ne procède pas à des acquisition continues d'image mais doit toujours être programmé, à la demande du client final.

Capteur	**Bande**	**Largeur spectrale (μm)**	**Résolution spatiale**	**Largeur de la scène**
PAN	1	0.45 – 0.90	1 m	11 km
MS	1 (bleu)	0.45 – 0.53	4 m	
	2 (vert)	0.52 – 0.61		
	3 (rouge)	0.64 – 0.72		
	4 (PIR)	0.77 – 0.88		

Tab. A.5 – Modes d'acquisition d'IKONOS

Les produits IKONOS sont proposés à différents niveaux de pré-traitements géométriques et radiométriques (SPACE IMAGING@, EURIMAGE@) :
- Produits GEO : qui prennent en compte les distorsions géométriques dues à l'acquisition, et sont géoréférencés dans des projections au choix. Ces produits sont annoncés à une précision planimétrique de 50 mètres.
- Produits orthorectifiés : qui prennent en compte à la fois les distorsions de l'acquisition et les distorsions dues au relief, sont proposés en cinq niveaux de précision planimétrique (de 25 mètres environ à 2 mètres).

Un dernier produit combine la résolution spatiale du canal panchromatique aux quatre canaux du mode multispectral : le *PAN-Sharpened*. On peut ainsi obtenir un produit en "couleur", à un mètre de résolution. Cependant, l'information radiométrique n'est plus exploitable pour les processus de classification.

A.1.4 Les autres systèmes et les futurs systèmes

A ces systèmes de télédétection optique, dont les images ont été utilisées dans cette étude, s'ajoutent d'autres dispositifs actuellement en service, et d'autres pour lesquels on ne dispose que de données d'archives (Bonn et Rochon, 1993) :
- **Landsat :** le premier système américain Landsat a été lancé en juillet 1972. Il est doté d'un scanneur multispectral, d'abord nommé MSS (*Multi Spectral Scanner* puis TM (*Thematic Mapper*). Le dernier né (Landsat-7 ETM+) fournit des images dans sept bandes (visible, PIR, MIR et IR thermique), à 30 m de résolution sur 185 km de fauchée.
- **IRS-1 A et B :** le satellite indien, lancé dès 1988, acquiert des données dans 4 bandes spectrales (visible et PIR) à une résolution de 36 m sur 145 km de fauchée.
- **IRS-1 C et D :** successeurs des versions A et B, capable d'acquérir des données multispectrales à 23 m et panchromatiques à 6 m de résolution sur 142 km de fauchée.
- **KFA-1000 :** (archives) chambre de prise de vue orbitale russe qui fournissait des clichés panchromatiques à 5 m de résolution sur 120 km de fauchée.
- **MK-4 :** (archives) chambre de prise de vue orbitale russe qui fournissait des clichés multispectraux dans 6 bandes à 6 m de résolution sur 120 à 270 km de fauchée.
- **KVR :** (archives) chambre de prise de vue orbitale russe qui fournissait des clichés panchromatiques à 2 m de résolution sur 40 km de fauchée.
- **MOS :** (archives) satellites japonnais, lancé dès 1987 et d'un principe similaire à Landsat, à 50 m de résolution sur une fauchée pouvant atteindre 200 km.
- **Quickbird :** le dernier né des satellites optiques à très haute résolution, qui fournit des images de 16 à 20 km de fauchée, avec une résolution de 52-61 cm en panchromatique et 2.44-2.88 m en multispectral (DIGITAL GLOBE@).
- **Orbview :** les deux premiers satellites s'apparentent aux systèmes météorologiques (basse résolution). Les deux derniers sont des capteurs à très haute résolution à 1 m en panchroma-

tique et 4 m en multispectral. Orbview 4 ajoute un capteur hyperspectral de 200 canaux à 8 m (ORBVIEW@).

Cette liste peut être complétée par tous les satellites météorologiques, à basse résolution (de l'ordre du kilomètre) mais à très vaste couverture. On retiendra pour l'essentiel les satellites Météosat européens (qui seront bientôt renouvelés par les systèmes MSG, Météosat Seconde Génération), les américains AVHRR, TIROS, GOES de la NOAA, Orbview 1 et 2 de la NASA ou DMSP militaires.

Enfin, de nouveaux systèmes sont actuellement à l'étude et notamment ORFEO (*Optical and Radar Federated Earth Observation*), la double constellation franco-italienne de micro satellites (environ 500 kg contre 3 tonnes pour SPOT 5). Elle combinera le système d'acquisition optique Pléïades (Haute Résolution, Champs Large et Multispectral) et radar COSMO SKYMED (évoqué dans la section suivante). Le système optique Pléïades-HR pourra acquérir des images couleur à une résolution de 60 à 80 cm, sur une fauchée inférieure à 20 km.

L'ensemble de ces systèmes et leurs caractéristiques principales sont résumés dans le tableau 2.4, en fin de chapitre 2. Outre les sources citées plus haut, une grande quantité d'information (malheureusement parfois contradictoire) peut être trouvée sur Internet (CHAART@, GIRS@), notamment sur les sites des agences spatiales.

A.2 Systèmes radar imageurs

Les systèmes radar imageurs actuellement disponibles sont moins nombreux que les sytèmes optiques. Depuis mars 2002, l'Europe a pris une place importante dans ce domaine avec ENVISAT, qui assure la suite des missions ERS-1 et 2 tout en augmentant considérablement les possibilités d'imagerie en termes de polarisation, d'incidence, de fréquence de revisite, de résolutions radiométrique et spatiale. Certaines de ces capacités ont déjà pu être évaluées grâce au système canadien RADARSAT. D'autres systèmes sont encore en phase de développement et devraient, dans les prochaines années, améliorer les capacités de couverture spatiale et temporelle (tab. 2.5).

A.2.1 Le système ERS

Le satellite ERS (*Earth Resources Satellite*) est conçu sur la base d'une plate-forme multimission. Il intègre des services opérationnels de contrôle de la charge utile et de la plate-forme (contrôle d'attitude et d'orbite, état des instruments, communications avec les stations de réception...).

A.2.1.1 La charge utile

Les instruments d'observation de la Terre embarqués sur ERS-1 sont :
- l'AMI (*Active Microwave Instrument*), intégre le radar à synthèse d'ouverture et un diffusomètre. Le premier opère soit en mode image pour fournir des images à haute résolution telles que celles utilisées dans cette étude, soit en mode vague pour produire des imagettes de 5 km par 5 km décrivant la surface des océans. Le second utilise deux antennes en plus de celle du RSO pour mesurer la vitesse et la direction du vent à la surface de la mer,
- le RA (*Radar Altimeter*) fournit des mesures topographiques de la surface marine, ainsi que divers paramètres sur les glaces, la vitesse du vent à la surface...
- l'ATSR (*Along Track Scanning Radiometer*) combine un radiomètre infrarouge et un sondeur micro-onde pour la mesure de la température de surface de la mer, la température du sommet des nuages, la couverture nuageuse et la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère,

- le PRARE (*Precise Range and Range-rate Equipment*) permet la détermination précise de la position du satellite et des caractéristiques de son orbite,
- des LRR (*Laser Retro-Reflectors*) permettent d'utiliser le satellite pour des tirs laser depuis des stations terrestres, dans des buts d'orbitographie ou de géodésie.

La mission ERS-2 poursuit les mêmes objectifs, avec une charge utile complétée par :
- le GOME (*Global Ozone Monitoring Equipment*) est un spectromètre à absorption mesurant la présence d'ozone, d'aérosols dans la stratosphère et la troposphère,
- l'IDHT (*Instrument Data Handling and Transmission*) permet les stockage des données acquises sur une orbite (2x6,5 Go). Il peut également transmettre les images RSO en temps réel, à un débit de 105 Mo/s.

Pour accomplir leur mission, les satellites ERS ont été placés sur des orbites héliosynchrones, polaires et quasi circulaires (tab. 2.5).

A.2.1.2 Les images

Les images acquises par l'instrument RSO des systèmes ERS sont distribuées par l'Agence Spatiale Européenne, généralement via des distributeurs locaux. Elles sont accessibles sous différents formats propres, présentant chacun des intérêts spécifiques selon le type d'application poursuivie (ESA, 1992a, b et c) :
- Complexe (SAR.SLC) : ces images mono-vues sont fournies en géométrie radar, distance-temps (*slant range*), et donnent la phase et la quadrature de phase de l'amplitude complexe du signal. Elles constituent le produit de base, au niveau de pré-traitement le plus bas.
- Amplitude (SAR.PRI) : les images d'amplitude PRI (*Precision Image*) subissent des traitements multi-vues (3-vues) et de calibration absolue. Contrairement aux données complexes, elles sont fournies en distance sol (*ground range*) et échantillonnées à 12.5m.
- Amplitude géocodée (SAR.GEC) : de mêmes caractéristiques que les données PRI, elles ont subi en plus une transformation géométrique les ramenant dans un système cartographique donné (projection UTM pour les scènes acquises de -80 ° à 84 ° de latitude et stéréographique polaire en-deçà et au-delà)

A.2.1.3 Les applications

Les capacités des différents types d'images du radar à synthèse d'ouverture des systèmes ERS ont fait l'objet de très nombreuses études théoriques et appliquées (EARTH ESA@). On retiendra cependant quelques aspects généraux.

D'un point de vue thématique *sensu stricto*, l'emploi des données d'amplitude géocodées apparaît comme efficace et très rapide. En effet, ces données fournies avec une référence géographique clairement identifiée sont directement intégrables à des interfaces de traitement d'images orientées SIG. Leur interprétation ne nécessite donc pas de traitements géographiques particuliers. Cependant, elles ne sont pas nécessairement satisfaisantes géométriquement, car elles ne prennent pas en compte les distorsions locales induites par le relief.

De ce fait, bon nombre d'études exploitant les données RSO d'ERS préfèrent les images en mode PRI, voire SLC. Pour les premières, bien qu'elles possèdent les mêmes qualités radiométriques et les mêmes altérations géométriques, elles sont fournies avec plus d'information sur les paramètres d'acquisition que les données GEC. Ainsi, elles sont facilement exploitables par des procédures d'orthorectification ou des algorithmes d'analyse de phase.

Enfin, il existe une limitation due à la conception même des satellites ERS. Leur temps d'acquisition maximal dépend du moment de la journée : il est de 12 minutes de jour alors qu'il s'abaisse à 4 minutes de nuit, sachant qu'une image (100×100 km) est acquise en 15 secondes (Maître, 2001).

A.2.2 Le système RADARSAT

Le système RADARSAT est le premier système d'observation de la Terre canadien. Lancé en novembre 1995 sur une orbite quasi-polaire et héliosynchrone, il a déjà fourni un grand nombre d'images, utilisées dans diverses applications (contrôle des glaces, foresterie, hydrologie, agriculture...).

A.2.2.1 La charge utile

L'essentiel de la charge utile de RADARSAT est constitué par le radar à synthèse d'ouverture. Ce radar est conçu de telle sorte qu'il peut opérer selon plusieurs angles d'incidences, plusieurs résolutions en polarisation HH. De fait, sa fréquence de revisite à 24 jours peut-être grandement améliorée par l'utilisation combinée et successive de plusieurs faisceaux.

A.2.2.2 Les images

En fonction du mode d'imagerie, RADARSAT donne accès à plusieurs catégories de produits :

Mode	Résolution (m)	ENL	Fauchée (km)	Incidence (deg.)
Standard	25	4	100	20 - 49
Grand Angle	25 - 48	4	150 - 165	20 - 39
Haute Résolution	10	1	45	38 - 46
ScanSAR Fin	50	2 - 4	305	20 - 40
ScanSAR Large	100	4 - 8	510	20 - 49
Faisceau prolongé	19 - 22	4	75	50 - 60
Faisceau prolongé	28 - 63	4	170	10 - 23

Tab. A.6 – Modes d'imagerie de RADARSAT

Cette grande variété de produits image offre une flexibilité très intéressante et rend aisément possible de nombreuses applications telles que l'interférométrie ou la radargrammétrie. Néanmoins, l'exploitation commerciale de ce satellite amène des tarifications très élevées, rendant ses données difficilement accessibles (une scène en mode Standard coûte environ 10.000 euros).

A.2.3 Le système ENVISAT

En mars 2002, l'Agence Spatiale Européenne mettait sur orbite le plus gros satellite scientifique d'observation de la Terre jamais conçu. Avec ses dix instruments embarqués, il dispose de l'une des plus grosses charges utiles de l'histoire spatiale.

Les nouvelles spécifications du radar à synthèse d'ouverture, baptisé ASAR (*Advanced Synthetic Aperture Radar*), contribuent à une amélioration notable des modes d'observation avec notamment les angles d'incidences variables, la multi-polarisation ou les multiples résolutions et fauchées. De plus, cet instrument assure la continuité des missions ERS.

En dotant l'Europe d'un système de télédétection très évolué, l'ESA offre la possibilité de mieux s'investir dans les projets d'étude de l'environnement. Les motivations principales de la

mission ENVISAT sont tout d'abord d'assurer la continuité avec la mission ERS en améliorant les données produites, puis d'étendre la gamme explorée du spectre électromagnétique afin d'améliorer la connaissance des différents facteurs environnementaux et ainsi, proposer une contribution significative à l'étude de l'environnement dans sa globalité.

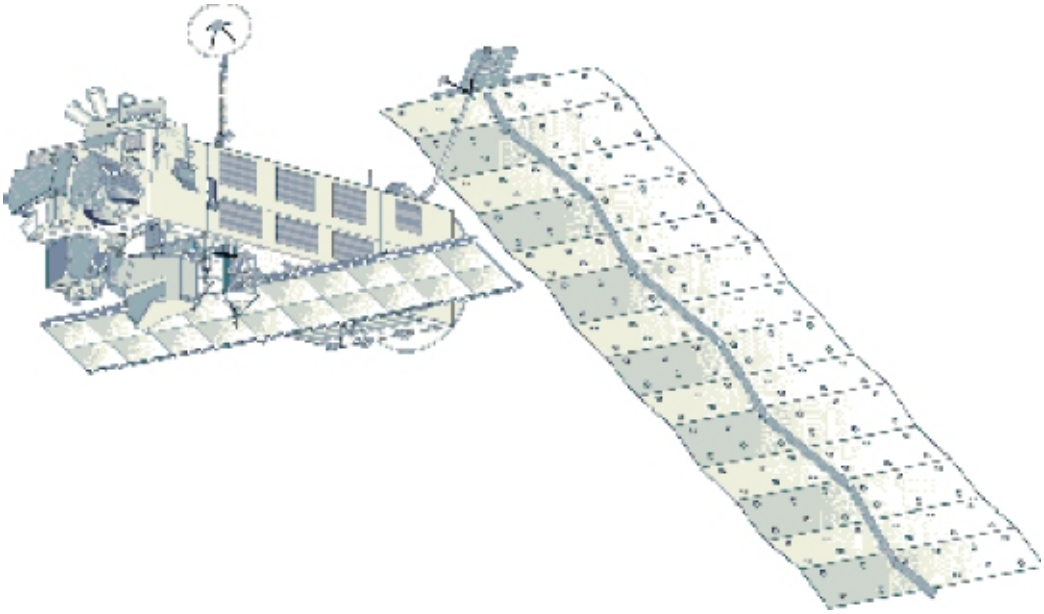


Fig. A.4 – Le satellite ENVISAT en orbite (ENVISAT@)

La mission ENVISAT a été conçue selon des objectifs globaux et des objectifs régionaux. Pour les premiers, la fourniture de données est annoncée en temps quasi réel (de quelques heures à un jour) pour des applications telles que le suivi de la mer (pollutions, surface, température...), de l'atmosphère (composants chimiques particuliers, variables physiques...) ou en temps différé (jusqu'à quelques semaines) pour les applications quantitatives telles que l'étude de la dynamique océanique, des interactions sol-atmosphère ou des processus radiatifs. Concernant les objectifs régionaux, ils visent des applications telles que le suivi de l'humidité du sol, la surveillance d'aléas, la recherche hydrologique, l'interférométrie, ou la cartographie des glaces. Les exigences en terme de délai de mise à disposition des données sont assez variables, de quelques heures (pour la surveillance d'aléas par exemple) à quelques jours ou semaines.

A.2.3.1 Les instruments

Ce géant de 8.2 tonnes et de 26×10×5 mètres dispose de nombreux instruments (Louet, 2001) :
- Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding (MIPAS) ;
- Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars (GOMOS) ;
- Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (SCIAMACHY) ;
- Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) ;
- Advanced Along Track Scanning Radiometer (AATSR) ;
- Advanced Synthetic Aperture Radar (ASAR) ;
- Radar Altimeter 2 (RA-2) ;
- Microwave Radiometer (MWR) ;
- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite (DORIS) ;
- Laser Retro-Reflector (LRR).

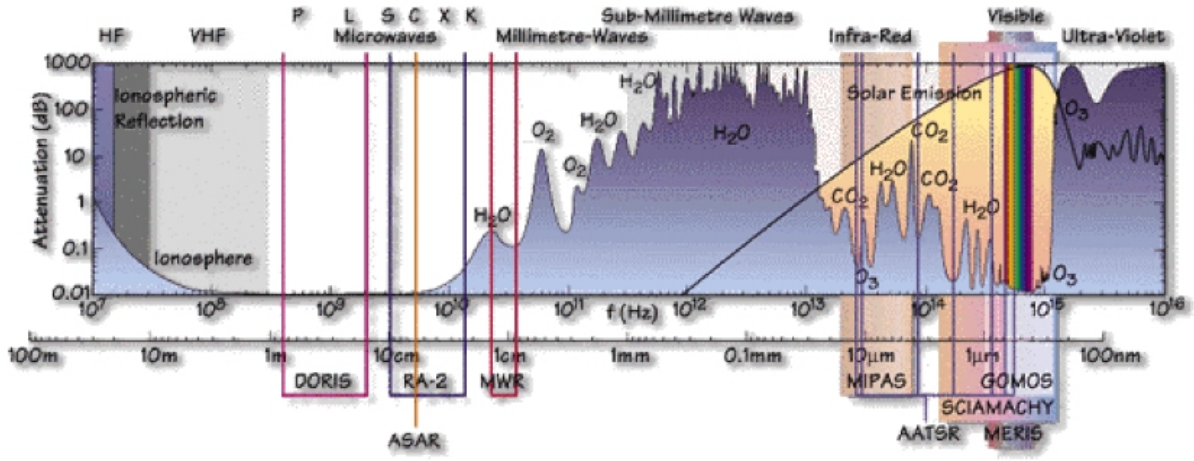


FIG. A.5 – Couverture spectrale des instruments d'ENVISAT (ENVISAT@)

Ces instruments couvrent une large part du spectre électromagnétique (fig. A.5). Dans la suite, et conformément à la problématique de l'étude, nous nous intéresserons plutôt à l'instrument ASAR, dont les capacités sont évaluées, pour la description de l'occupation du sol et la détection de champs d'inondation.

A.2.3.2 L'instrument ASAR

L'instrument ASAR d'ENVISAT opère en bande C (5.331 GHz) et selon plusieurs modes d'imagerie, mutuellement exclusifs (Desnos *et al.*, 1999), (fig. A.6) se distinguant par différentes combinaisons de fauchée, de résolution, de polarisation et d'incidence.

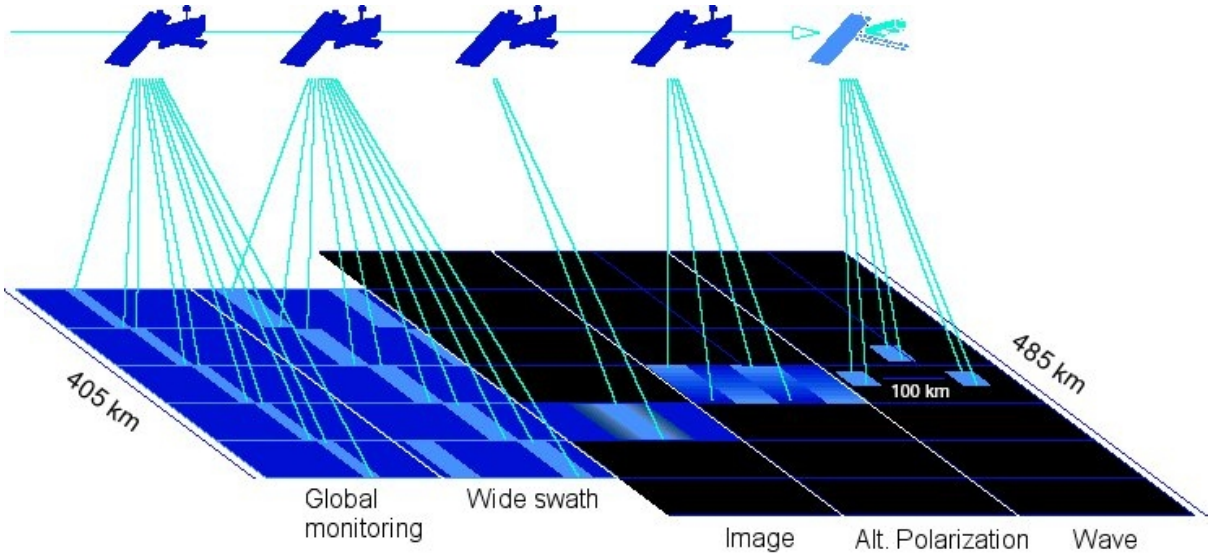


FIG. A.6 – Les modes d'acquisition de l'ASAR d'ENVISAT (ESA@)

La multi-polarisation

L'ASAR est capable d'acquérir des images selon plusieurs polarisations, c'est-à-dire en HH, VV, HV et VH. Une acquisition en mode Polarisation Alternée (AP, *Alternating Polarisation*) correspond à deux images acquises selon trois combinaisons possibles de polarisation : HH et VV, HH et HV, VV et VH. La résolution des images est de 30 m pour un pixel à 12.5 m, pour une couverture en distance s'étendant de 56 à 100 km selon la fauchée. Enfin, le nombre de vues équivalent (ENL) est de 1.8 (ESA, 1997).

La multi-polarisation présente des intérêts dans plusieurs domaines et notamment pour le suivi de cultures (Burgess-Allen et Bird, 1999 ; Ferrazoli *et al.*, 1999 ; Braccaglia *et al.*, 1995) et la cartographie d'occupation du sol (Baghdadi *et al.*, 2001) pour laquelle Xia (1996) propose une synthèse des applications du radar à synthèse d'ouverture multi-fréquence, multi-polarisation et multi-incidence. Hormis les multiples fréquences, ENVISAT disposera donc de modes d'imagerie très variés, adaptés à la cartographie et à la modélisation hydrologique (Neusch, 2000).

Nghiem *et al.* (2000) présentent une méthode de cartographie des zones inondées à partir de données du système QuickSCAT, fonctionnant en bande Ku (13.4 GHz) avec deux polarisations, HH et VV. Fondée sur l'inversion de polarisation de l'onde électromagnétique lors de sa réflexion sur l'eau, elle tire parti plus du rapport σ_{VV}/σ_{HH}, ainsi que de la différence d'angle d'incidence entre les deux données (54 $^\circ$ pour VV et 46 $^\circ$ pour HH), que des valeurs absolues du coefficient de rétrodiffusion σ_0. Lorsqu'une surface est inondée, la réflexion devient prépondérant sur la diffusion et le rapport est inférieur à 1 sur une échelle linéaire. L'auteur met en avant la plus grande sensibilité de ce ratio devant la seule analyse du σ_0, qui peut ne varier que faiblement du fait des variations combinées de ses différentes composantes. Ces résultats sont appuyés par l'étude thématique menée par Baghdadi *et al.* (2001), à partir d'un jeu multi-temporel de données polarimétriques, sur différents thèmes d'occupation du sol (fig. A.7 et fig. A.8).

Les modes basse et moyenne résolution

Les spécifications des modes à moyenne et basse résolutions de l'ASAR montrent des qualités radiométriques très intéressantes même si la résolution spatiale est faible. On retiendra en particulier les modes WS (*Wide Swath*) et GM (*Global Monitoring*) conçus sur la base de la technique ScanSAR et qui ont fait l'objet d'études d'optimisation (Monti Guarnieri et Desnos, 1999) cherchant à élaborer la chaîne de traitement la plus efficace, notamment pour garantir un rapport signal/bruit optimal et un nombre de vues équivalent élevé. L'avantage majeur de ces données est la fauchée sur laquelle elles sont acquises (fig. A.6), une résolution moyenne permettant de limiter le volume de données et une fréquence de revisite accrue. Cependant, elles posent des problèmes de conception importants, notamment pour assurer la résolution des ambiguïtés en distance.

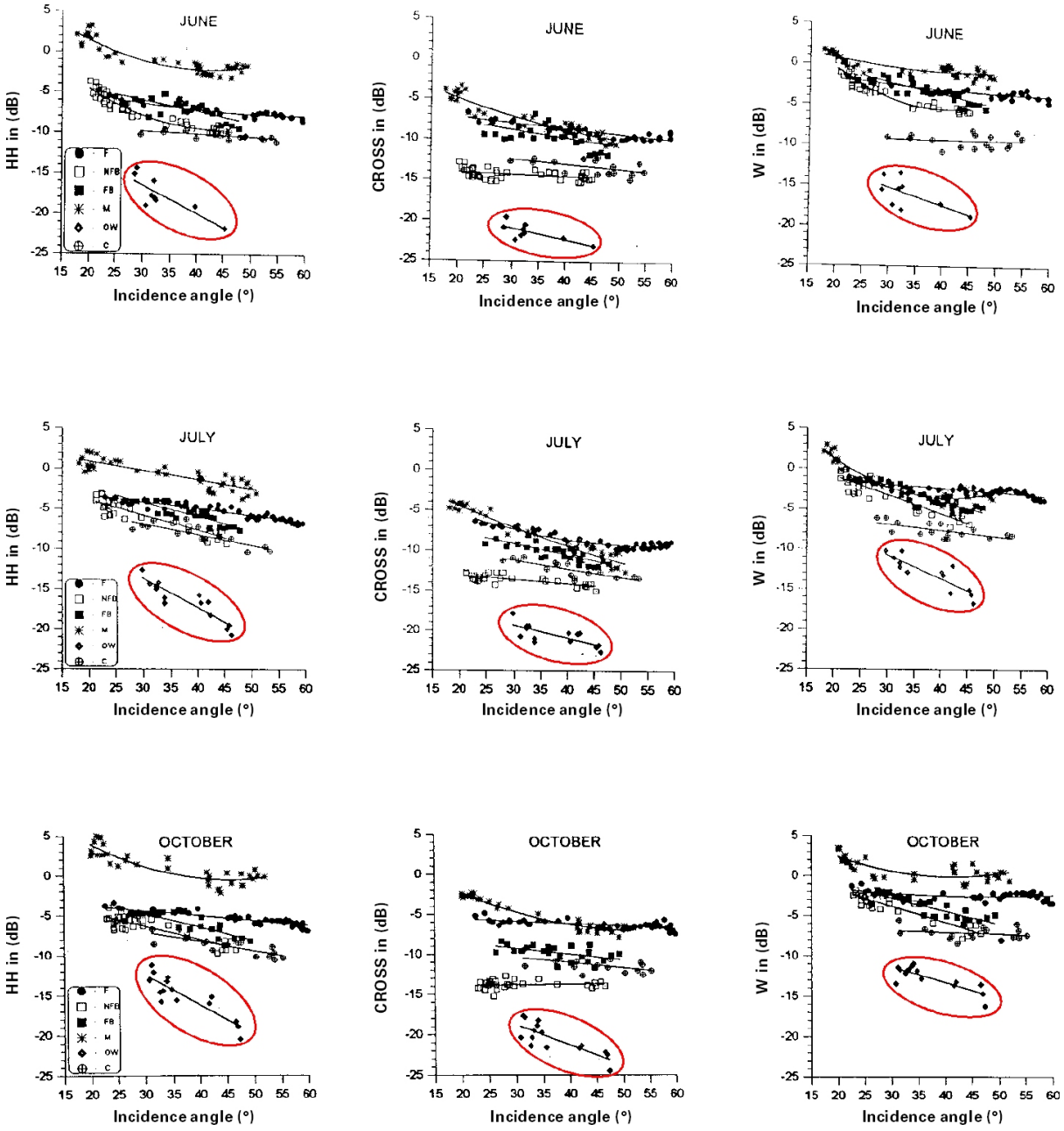


FIG. A.7 – Mesure du coefficient de rétrodiffusion radar en fonction de la polarisation de l'onde, de l'angle d'incidence et de la date d'acquisition (Baghdadi et al., 2001)

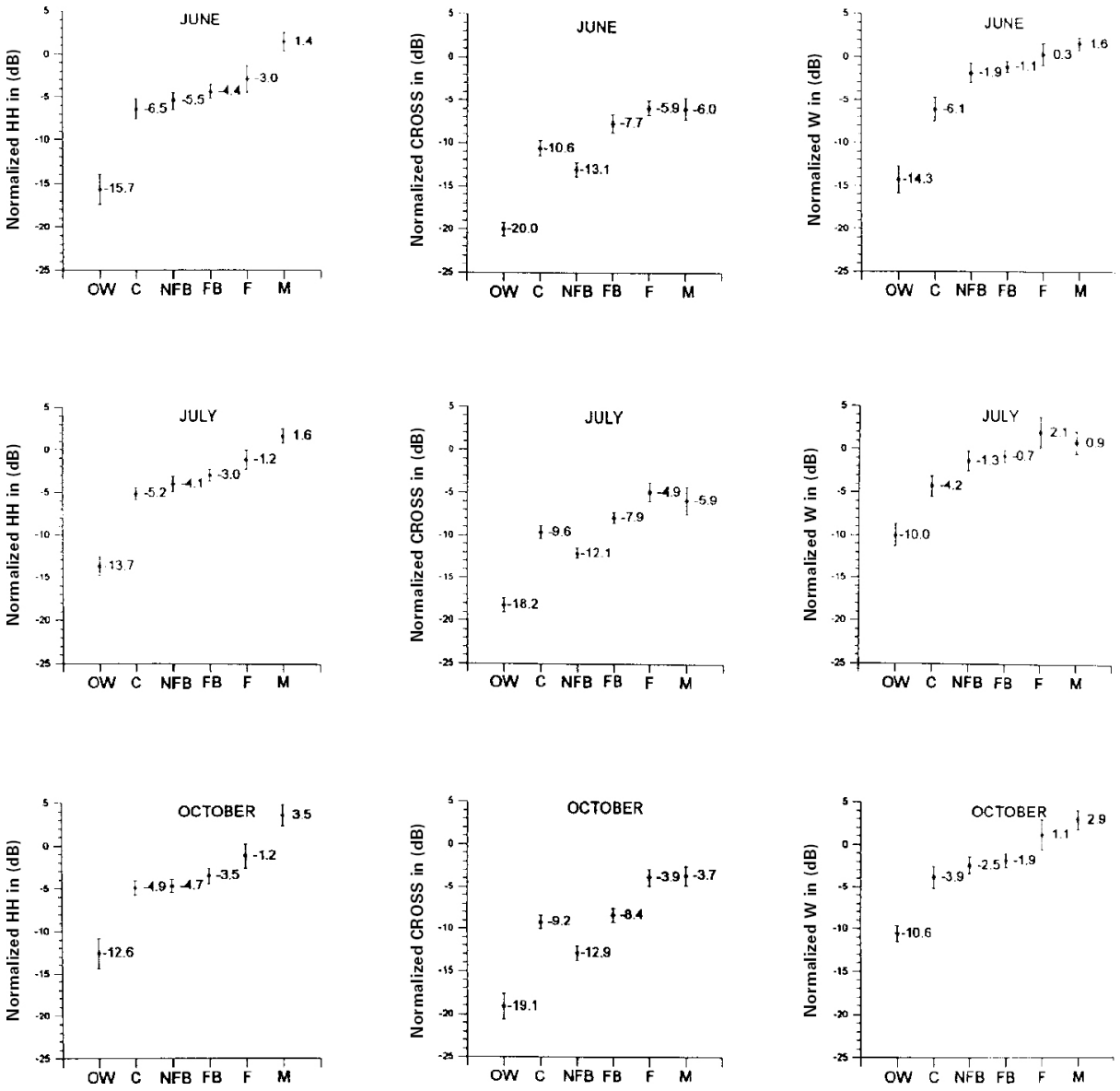


FIG. A.8 – Mesure du coefficient normalisé de rétrodiffusion radar en fonction de l'occupation du sol, de la polarisation et de la période de l'année (Baghdadi et al., 2001)

A.2.3.3 Les images de l'ASAR

Les informations présentées dans cette section sont tirées du document *ASAR Product Handbook* établi par l'ESA (2002). Les images produites par l'instrument ASAR sont regroupées selon trois niveaux de traitement successifs :
- Niveau 0 : premier niveau de traitement des données brutes pour tous les modes de fonctionnement ;
- Niveau 1B : regroupe l'essentiel des produits images standards (tab. A.7) à différents niveaux de consolidation ;
- Niveau 2 : constitué de produits géophysiques géolocalisés (seul le mode WV est actuellement amené à ce niveau de traitement).

La présentation des différentes étapes algorithmiques de traitement se limite aux produits 1B, les plus adaptés et les plus souvent utilisés pour des opérations courantes de traitement d'image et d'extraction d'information (dans cette étude en particulier). L'intérêt est concentré sur les modes IM et AP, en haute et moyenne résolution géométrique (exploités dans les chapitres 4 et 5). L'algorithme de production des images se décompose en trois phases : pré-traitement, estimation du centroïde Doppler et formation de l'image.

Deux chaînes de traitement se distinguent selon le mode d'opération du capteur et le type de produit final :
- mode IM, haute résolution (IMS/IMP) : estimation Doppler par la méthode MLCC (*Multi-Look Cross Correlation*) et formation de l'image par l'algorithme Range-Doppler,
- mode AP et produits moyenne résolution : estimation Doppler MLCC, affinée par la technique du *Look Power Balancing* et formation de l'image par l'algorithme SPECAN.

Ces deux chaînes correspondent à deux méthodes d'acquisition différentes : en continu pour le mode IM à haute résolution, par intermittence (*burst mode*) pour le mode AP (ainsi que les modes WS et GM). Les produits moyenne résolution sont réalisés avec la seconde méthode pour disposer d'une chaîne unique de traitement quel que soit le mode de fonctionnement du capteur. Lorsque l'acquisition est réalisée en continu (IM), les éléments (*bursts*) sont extraits et traités comme tels.

L'algorithme Range-Doppler est le plus couramment utilisé pour traiter des données acquises en continu. Il présente l'avantage de préserver l'information de phase, permettant de générer des produits mono-vue complexes (IMS) adéquats pour l'interférométrie. Une version modifiée a été développée pour les données acquises en *burst mode* (AP) et générer le même type de produits complexes (APS).

L'algorithme SPECAN est spécialement développé pour traiter les données en *burst mode* et recomposer une image continue, en séparant les différents échos provenant de la cible. Contrairement au Range-Doppler, il n'est pas adapté à une bonne conservation de l'information de phase.

	ID	Résolution (m)	Pixel	Couverture	ENL	Polarisation	Bruit équivalent (dB)	Stabilité radiométrique (dB)	Précision radiométrique (dB)	Ratio d'ambiguïté sur une cible ponctuelle (dB)	Ratio d'ambiguïté sur une cible distribuée (dB)
Image Precision	IMP	30x30	12.5	56-100x100	3.9	HH ou VV	-19,6 à -22,1	0,32 - 0,40	1,17 - 1,38	az. : 26 - 30 dist. : 32 - 46	az. : 23 - 25 dist. : 17 - 39
Image Single Look	IMS	9slantx6	-	56-100x100	1						
Image Geocoded	IMG	30x30	12.5	100x100	3.9						
Image Medium Resolution	IMM	150x150	75	56-100x100	40						
Image Browse	IMB	900x900	225	56-100x100	80						
Alt. Pol. Precision	APP	30x30	12.5	56-100x100	1.9	HH/VV, HH/HV, VV/VH	-19,4 à -21,9	0,50 - 0,55	1,62 - 1,81	az. : 19 - 28 dist. : 26 - 41	az. : 18 - 25 dist. : 17 - 39
Alt. Pol. Single Look	APS	9slantx12	-	56-100x100	1						
Alt. Pol. Geocoded	APG	30x30	12.5	100x100	1.9						
Alt. Pol. Medium Resolution	APM	150x150	75	56-100x100	50						
Alt. Pol. Browse	APB	900x900	225	56-100x100	75						
Wide Swath Medium Resolution	WSM	150x150	75	400x400	12	HH ou VV	-20,9 à -26,2	0,32 - 0,42	1,20 - 1,45	az. : 22 - 29 dist. : 25 - 34	az. : 20 - 25 dist. : 17 - 31
Wide Swath Browse	WSB	1800x1800	900	400x400	57-62						
Global Monitoring Image	GMI	1000x1000	500	400x400	12	HH ou VV	-31,5 à -35,0	0,46 - 0,53	1,54 - 1,74	az. : 27 - 29 dist. : 25 - 32	az. : 25 - 28 dist. : 17 - 31
Global Monitoring Browse	GMB	2000x2000	1000	400x400	18-21						

TAB. A.7 – Caractéristiques des différents mode d'imagerie d'ENVISAT

A.2.4 Les autres systèmes et les futurs systèmes

Parmi les autres systèmes radar spatiaux, on retiendra le japonnais J-ERS qui a fonctionné de février 1992 à octobre 1998. Ce système combinait un RSO, opérant en bande L et polarisation HH, et un capteur optique, similaire au HRVIR de SPOT, capable d'acquisitions stéréoscopiques. Les images radar d'archives sont toujours accessibles, à une résolution spatiale de 18 m, sur une fauchée de 75 km.

De plus, de nombreux systèmes micro-ondes, actifs et passifs, sont actuellement à l'étude et notamment :

- **COSMO-SKYMED**, composante radar du système franco-italien ORFEO qui opérera en bande X avec toutes les polarisations. La résolution spatiale annoncée est métrique pour une fauchée de 10 à 200 km. La définition du système, comme une constellation de satellites, devrait permettre un temps de revisite inférieur à 24 h.
- **ALOS**, radar japonais qui opérera en bande L, offrira une gamme très large de polarisations, d'angles d'incidence, de résolutions spatiales et de fauchées.
- **RADARSAT 2/3**, radar canadien qui doit prochainement prendre la suite de Radarsat 1. Ses capacités sont augmentées sur la polarisation, la fauchée, les résolutions spatiale et temporelle.
- **TerraSAR**, système européen mettant en œuvre un radar polarimétrique en bande L et un radar à polarisations jumelles en bande X. Il devrait disposer de résolutions de 1 à 30 m pour une fauchée de 10 à 200 km et une fréquence de revisite de 2 jours.
- **la roue interférométrique** (Massonnet, 2001), emploie des satellites radar passifs en configuration constante. Un satellite radar actif, utilisé comme source d'illumination, permettrait d'atteindre une modélisation métrique du terrain.
- **SMOS**, système passif européen en bande L à basse résolution (35-50 km). Il mesurera l'émission micro-ondes terrestre grâce à des capteurs positionnés sur trois bras en étoile.
- **Almaz**, système russe qui a fonctionné en 1991, en bande S. Des projets combinant trois radars (bandes X, S et L) ont été élaborés (Almaz-T) mais les restriction budgétaires les ont repoussés.

Les caractéristiques générales de ces différents systèmes sont synthétisées dans le tableau 2.5 du chapitre 2. Les spécifications des systèmes futurs ne sont pas encore définitives pour plusieurs des capteurs cités et sont susceptibles de changer d'ici au lancement effectif.

A.3 Bibliographie

Altmaier A., Kany C., 2002, Digital surface model generation from CORONA satellite images, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 56, 221-235.

Baghdadi N., Bernier M., Gauthier R., Neeson I., 2001, Evaluation of C-Band SAR data for wetlands mapping, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (1), 71-88.

Bonn F., Rochon G., 1993, *Précis de Télédétection - Vol. 1 Principes et méthodes*, Presses de l'Université du Québec / AUPELF, 485.

Bracaglia M., Ferrazoli P., Guerriero L., 1995, A fully polarimetric multiple scattering model for crops, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 54 (3), 170-179.

Burgess-Allen P., Bird P., 1999, An assessment of ASAR for crop determination in Europe using ERS-2 and Radarsat data, *Proceedings of IGARSS'99*, Vol. 2, 928 -930.

Clandillon S., Meyer C., de Fraipont P., 2002, EO social and environmental monitoring of a UNESCO biosphere reserve. Case study over the Vosges du Nord and Pfalzerwald parks, *Actes du Colloque UNESCO-EURISY World Heritage Conservation*, Strasbourg, 5-8 novembre.

Desnos Y.-L., Laur H., Lim P., Meisl P., Gach T., 1999, The ENVISAT-1 Advanced Synthetic Aperture Radar processor and data products, *Proceedings of IGARSS'99*, Vol. 3, 1683 –1685.

ESA, 1992a, ERS-1 Product specification, ESA SP-1149.

ESA, 1992b, ERS-1 User Handbook, ESA SP-1148.

ESA, 1992c, ERS-1 System, ESA SP-1146.

ESA, 1997, ENVISAT-1 product summary overview, No. PO-TN-ESA-GS-00701.

ESA, 2002, ASAR Product handbook (http ://envisat.esa.int).

Ferrazzoli P., Guerriero L., Quesney A., Taconet O., Wigneron J.-P., 1999, Investigating the capability of C-band radar to monitor wheat characteristics, *Proceedings of IGARSS '99*, Vol. 2, 723-725.

Kraus K., Waldhäusl P., 1998, *Manuel de photogrammétrie*, Traduction de P. Grussenmeyer et O. Reis, Hermès, Paris, 407.

Lillesand T.M., Kieffer R.W., 1987, Remote sensing and image interpretation, 2nd edition, John Wiley and Sons Inc., 721.

Louet J., 2001, The ENVISAT mission and system, *ESA Bulletin*, No. 106, 10-25.

Mac Donald R.A., 1995a, CORONA : Success for Space Reconnaissance, A Look into the Cold War and a Revolution for Intelligence, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61 (4), 689-719.

Mac Donald R.A., 1995b, Opening the Cold War Sky to the Public : Declassifying Satellite Re-

connaissance Imagery, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61 (4), 385-390.

Maitre H., 2001, *Traitement des images de RSO*, Hermès, Paris.

Massonnet D., 2001, The interferometric cartwheel : a constellation of passive satellites to produce radar images to be coherently combined, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 22 (12), 2413-2430.

Marquaille C., 1999, Analyse de l'occupation du sol à partir d'images SPOT, Apport à l'étude de l'environnement des zones humides du Baden-Württemberg, Cas de la Federsee, Mémoire de Soutenance de Diplôme d'Ingénieur ENSAIS, Spécialité Topographie, 59.

Monti Guarnieri A., Desnos Y.-L., 1999, Optimizing performances of the ENVISAT ASAR ScanSAR modes, *Proceedings of IGARSS'99*.

Neusch T., 2000, Multi-Frequency and Multi-Polarization Synthetic Aperture Radar Data for Modelling Hydrological Parameters, Aachen : Shaker (Geodäsie ; Bd. 5), Zugl. : Karlsruhe, Univ., Diss.

Nghiem S.V., Liu W.T., Tsai W.-Y., Xie X., 2000, Flood mapping over the Asian continent during the 1999 summer monsoon season, *Proceedings of IGARSS'00*, Vol. 5, 2027-2028.

Tappan G.G., Hadj A., Wood E.C., Lietzow R.W., 2000, Use of Argon, Corona and Landsat imagery to assess 30 years of land resource changes in west-central Senegal, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66 (6), 727-735.

Wheelon A.D., 1995, Lifting the veil on CORONA, *Space Policy*, Vol. 11 (4), 249-260.

Xia Z.G., 1996, Applications of multi-frequency, multi-polarization and multi-incident angle SAR systems in urban land use and land cover mapping, *Proceedings of IGARSS'96*, Vol. 4, 2310-2314.

Zhou G., Jezek K., Wright W., Rand J., Granger J., 2002, Orthorectification of 1960s satellite photographs covering Greenland, *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, Vol. 40 (6), 1247-1259.

Références Internet

(CCRS@), http ://www.ccrs.nrcan.gc.ca.

(CHAART@), http ://geo.arc.nasa.gov/cgi-bin/chaart/_dbsetup.

(CNES@), http ://www.cnes.fr.

(DIGITAL GLOBE@), http ://www.digital-globe.com.

(DLR@), http ://www.dlr.de.

(ENVISAT@), http ://envisat.esa.int.

(ESA@), http ://www.esa.int.

(EURIMAGE@), http ://www.eurimage.com.

(GIRS@), http ://cgi.girs.wageningen-ur.nl/cgi/projects/bcrs/multisensor/report1/14.htm.

(NASA@), http ://www.nasa.gov.

(NASDA@), http ://www.eorc.nasda.go.jp.

(NRO@), http ://www.nro.gov.

(ORBVIEW@), http ://www.tec.army.mil/tio/ORBVIEW.htm.

(SOVINFORM@), http ://www.sovinformsputnik.com.

(SPOT IMAGE@), http ://www.spotimage.fr.

(SPACE IMAGING@), http ://www.spaceimaging.com.

Annexe B

Projets et programmes

B.1 Le programme PACTES

Lors de la journée "Espace et Société" du 19 mai 1999 consacrée aux Risques Naturels, la Direction de la Défense et de la Sécurité Civile (DDSC) a demandé par la voix de son Directeur si l'industrie spatiale serait à même de mettre à profit les nouvelles technologies pour améliorer l'efficacité de ses missions, en particulier :
– des localisations géographiques plus précises des forts événement pluvieux à venir,
– un allongement de la période de prévision et d'alerte,
– une estimation au plus tôt de l'étendue et de la nature des dégâts.

C'est dans ce cadre que le programme PACTES (Prévention et Anticipation des Crues au moyen des TEchniques Spatiales) est élaboré, sous financement du Réseau Terre et Espace (RTE) et maîtrise d'ouvrage du CNES. L'objectif du projet est d'impliquer les laboratoires de recherche et l'industrie dans la mise au point, sur une période de 18 mois, de produits d'information et de démonstrateurs permettant une amélioration réelle des possibilités de prévision et de gestion de situations de crise liées à des catastrophes naturelles.

Ce projet valorise l'utilisation de la donnée satellitaire, en la mettant en conjonction avec tout type de donnée exogène susceptible d'apporter une réelle valeur ajoutée. Un axe entier du projet est consacré à l'étude de l'apport actuel du spatial dans la gestion des risques ainsi qu'à des recommandations pour les systèmes futurs.

Les impacts socio-économiques du risque d'inondation, aussi bien en cas de crues éclair conséquences de pluies torrentielles, qu'en cas de crues de plaine, sont unanimement reconnus. Si les impacts économiques directs sont en général chiffrables, les effets indirects économiques ou sociaux, plus difficilement mesurables, soulignent la criticité de ce type de risque. Le choix du risque d'inondation comme pierre angulaire du projet PACTES répond donc bien à une préoccupation immédiate et prioritaire.

B.1.1 Objectifs

L'objectif principal du projet est de contribuer à l'amélioration des moyens existant dans le domaine de la gestion des risques naturels d'inondation grâce à la mise en place d'approches intégrées (informations et outils), incluant l'utilisation complémentaire des technologies spatiales et capables d'offrir de réels progrès dans les domaines de la prévention, de la gestion de crise et de l'analyse des dégâts. Pour cela une coopération est établie d'une part entre les laboratoires de recherche et les industriels du spatial, au travers de la constitution d'équipes pluridisciplinaires, et d'autre part en étroite et constante association avec les utilisateurs concernés.

Trois principaux objectifs caractérisent le projet PACTES :
- participer à l'amélioration du service public dans le domaine de la gestion des risques, de la phase de prévention à la gestion des secours ;
- accélérer la mise en pratique opérationnelle des résultats issus de la recherche ;
- évaluer l'intérêt de l'utilisation des techniques spatiales pour la gestion du risque d'inondation.

Pour répondre à ces objectifs, la sélection des données d'observation de la Terre s'est faite selon trois critères principaux :
- **un critère temporel :** qui regroupe les possibilités de suivi de l'évolution de l'occupation du sol, l'analyse des variations de l'humidité du sol (incluant un monitoring continu pendant l'année hydrologique synchrone du projet), et les observations de crues historiques ;
- **un critère spatial :** défini par la résolution, l'emprise géographique et les possibilités d'exploitation sur la zone d'étude mosellane ;
- **un critère spectral :** dans les domaines optiques et infrarouges que pour les hyperfréquences, afin de tirer partie au mieux des systèmes d'observation de la Terre actuellement opérationnels et de préparer les programmes futurs.

B.1.2 Les zones test

Le caractère pré-opérationnel du projet est conforté par le choix de zones test répondant à des critères précis :
- **le bassin de la Moselle**, pour traiter du cas des inondations de plaine et envisager une ouverture ultérieure à une dimension transnationale,
- **le bassin du Thoré** qui, suite à la crue catastrophique en novembre 1999, présente un intérêt indéniable pour la collecte d'un besoin réel exprimé et de témoignages récents,
- enfin le **bassin de l'Hérault** qui, toujours dans le domaine des crues éclair, présente un intérêt particulier pour l'analyse de l'impact des eaux souterraines couplées aux ruissellements de surface.

Les deux bassins méditerranéens du Thoré et de l'Hérault sont plutôt voués au développement de modèles hydrologiques et hydrauliques pour conforter les dispositifs de prévision et d'anticipation. Par contre, le bassin de la Moselle mieux connu et mieux équipé est destiné à améliorer la prévention par l'intégration des données spatiales et leur couplage à toute source d'information pertinente et exploitable.

B.2 Le projet TecSpIn

L'observation en temps réel de multiples variables hydro-météorologiques est une condition indispensable à une meilleure compréhension de la genèse des crues et inondations, tout comme elle permet la calibration des modèles hydrologiques de prévision des crues. Tout site d'observation étant par définition à caractère ponctuel, le choix des sites doit répondre à des critères de représentativité par rapport au fonctionnement général de l'hydrosystème. Pour certaines variables hydro-météorologiques des méthodes d'interpolation plus ou moins sophistiquées aboutissent à une information spatialisée, indispensable dans la plupart des outils de prévision et de gestion des crues et inondations (SIG, modèles hydrologiques et hydrauliques).

Les systèmes d'observation de la Terre, en couvrant de larges étendues à intervalles réguliers, permettent une saisie à large couverture spatiale de multiples variables biophysiques. Même si les systèmes d'observation de la Terre opérationnels sont encore insuffisants pour répondre à l'ensemble des besoins de la gestion des inondations, il est important et nécessaire d'approfondir la valorisation de l'existant et notamment de débuter l'intégration et l'exploitation des

nouveaux systèmes d'observation de la Terre (tels que ENVISAT ou SPOT5, lancés en 2002) pour améliorer la contribution des techniques spatiales dans la gestion des inondations.

B.2.1 Le projet

Le projet prend la suite de PACTES (juin 2002), qui a permis en 18 mois d'initier le transfert des résultats de recherche vers les utilisateurs pour la Prévention et l'Anticipation des Crues (crues éclair et crues de plaine) au moyen des Techniques Spatiales. L'amélioration de la gestion des inondations à l'aide des techniques spatiales d'observation de la Terre nécessite à présent des compléments de recherche, méthodologiques d'une part et thématiques d'autre part, visant à :

- prendre en compte les potentialités des nouveaux et futurs systèmes d'Observation de la Terre dans une approche multi-capteurs pour préparer leur intégration avec les moyens existants,
- améliorer et consolider les méthodes d'extraction et de suivi de paramètres bio-géophysiques déterminants pour la compréhension et la gestion du phénomène et pouvant servir d'indicateurs précoces du risque d'inondation, tels que l'humidité des sols, l'évolution de leur saturation, afin d'en préparer le couplage puis l'intégration dans les modèles scientifiques existants,
- développer des méthodes d'évaluation à une échelle globale des zones potentiellement vulnérables par l'exploitation conjointe de données statistiques (socio-économiques, climatiques, hydrologiques et hydrauliques) et de données spatiales.

Depuis le milieu des années 1990, le Centre de Recherche Public – Gabriel Lippmann (CRPGL) a mis en place, en collaboration avec les autorités publiques du Grand-Duché de Luxembourg, un réseau d'observation en temps réel des conditions hydro-météorologiques ; réseau couplé à un système de préalerte des crues et inondations. L'observation simultanée à des résolutions spatio-temporelles très fines des débits des cours d'eau, des apports pluviométriques et des niveaux piézométriques dans la plaine alluviale de l'Alzette a permis de mettre en évidence le rôle clef des niveaux de la nappe en terme d'indicateur de l'état de saturation du système bassin-versant.

La plaine alluviale de l'Alzette se prête à une étude des possibilités offertes par la télédétection spatiale en vue de la saisie rapide des niveaux de saturation du bassin-versant. Le lien étroit existant entre les niveaux piézométriques et le stock en eau du système bassin-versant, ayant déjà été démontré dans le cadre de projets de recherche précédents (CRUES, INRA), le projet analyse la possibilité de détecter grâce aux images radar (obtenues par satellite) les divers niveaux de saturation. Le réseau d'observation dense dans le bassin-versant de l'Alzette fait office de moyen de calibration et de validation de la méthode.

Collaboration entre le SERTIT et la Cellule de Recherche en Environnement et Biotechnologies (CREBS) du CRPGL, ce projet de recherche teste de nouvelles méthodes de détermination de l'état de saturation du système bassin-versant, basées sur les techniques spatiales d'observation de la Terre, en vue d'une intégration ultérieure des résultats obtenus dans les systèmes de préalerte aux crues et inondations existants. Une analyse statistique de données climatiques, hydrologiques, hydrauliques, socio-économiques et d'occupation du sol, basée largement sur l'utilisation des techniques d'observation de la Terre et des systèmes d'information géographiques servira à évaluer l'évolution de l'aléa inondation et de la vulnérabilité dans la plaine alluviale de l'Alzette.

B.2.2 Objectifs

Les objectifs du projet sont :
- l'évaluation de la capacité de stockage du système bassin-versant grâce au calcul de bilans hydrologiques et un couplage avec les niveaux piézométriques (sur la base d'observations actuelles et de modélisations d'évènements antérieurs),
- la détermination de l'évolution temporelle de l'extension des champs d'inondation en vue d'une analyse statistique portant sur d'éventuels changements de l'aléa inondation en réponse à des changements climatiques et ou anthropiques,
- le couplage entre les observations in-situ (nappe, bilan hydrologique) et les modélisations hydrauliques (champs d'inondation) avec les informations issues de l'imagerie spatiale (humidité, saturation, champs d'inondation instantanés observés),
- le développement d'une nouvelle méthodologie de ventilation de données socio-économiques dans les informations issues de l'observation de la Terre, en vue d'une évaluation de la vulnérabilité,
- l'évaluation d'une solution "tout spatial" pour des zones non équipées de mesures terrain.

B.2.3 Méthode

Un lien très fort entre les niveaux de la nappe et la capacité de stockage restante du système bassin-versant au cours des mois hivernaux a pu être mis en évidence. Observations des niveaux piézométriques d'une part et calculs d'un bilan hydrologique d'autre part ont permis d'établir le rôle d'indicateur de l'humidité générale du système bassin-versant. L'évolution des niveaux de nappe et du stock d'eau dans le système bassin-versant sont très similaires, indépendamment du site d'observation piézométrique. Après d'importants apports pluviométriques une résurgence de nappe se généralise dans la plaine alluviale de l'Alzette, tout comme le bilan hydrologique révèle la saturation quasi complète du système bassin-versant. Tout apport pluviométrique supplémentaire à ce stade se traduit par une augmentation très rapide des débits de l'Alzette, voire par des débordements. Un lien très fort entre surfaces avec résurgence et coefficients d'écoulement de crue a pu être déterminé. Pour tout niveau de nappe, il est donc possible d'anticiper la quantité d'eau qui peut encore être stockée par le système bassin-versant, tout comme l'apport pluviométrique nécessaire à la saturation totale peut être évalué.

Les techniques radar de télédétection spatiale constituent un moyen rapide et systématique pour évaluer et suivre le niveau de saturation du système bassin-versant ainsi que pour détecter et cartographier les champs d'inondation. Le signal radar évoluant en fonction de la teneur en eau des sols, la télédétection spatiale doit permettre la mise au point d'un outil d'aide à la décision efficace. L'imagerie spatiale permet de couvrir intégralement la plaine alluviale, contrairement aux observations ponctuelles réalisées actuellement au moyen des sites d'observations piézométriques.

B.3 Le programme EOMD

Le programme *Earth Observation Market Developpment* est un élément de l'activité de l'ESA, au sein de l'*Earth Observation Envelope Program* (EOEP). L'objectif principal de l'EOMD est de stimuler la création et de viabiliser une offre européenne de services exploitant les données d'observation de la Terre, à destination d'utilisateurs publics et privés (EOMD@). La proposition faite par le SERTIT et la société allemande Vista GmbH s'intéresse aux inondations de plaine et à la mise en place d'un service opérationnel fondé sur l'utilisation des données d'observation de la Terre.

B.3.1 Les utilisateurs visés

L'objectif général du projet doit répondre dans un premier temps aux exigences de la Sécurité Civile et des compagnies d'assurance. La société SPOT Image intervient dans le projet en tant que "guichet unique" pour l'obtention des données satellitaires.

B.3.1.1 Sécurité Civile

Lors d'événements de crues graves, la Sécurité Civile a besoin de disposer rapidement d'information sur l'étendue de l'inondation et de ses impacts. Le développement d'un système de fourniture rapide d'information dérivée de l'observation de la Terre constitue un des objectifs majeurs à destination de cet utilisateur. Les résultats et expériences acquises au cours des actions menées dans le cadre de la Charte y sont largement mises à contribution.

Deux produits ont été identifiés et doivent être développés pour prendre en compte les nouvelles possibilités offertes par ENVISAT. Le premier produit, présentant l'extension du champ d'inondation, est appelé "*Rapid flood mapping product*" et est délivré à la Sécurité Civile sous 6 heures après réception de la donnée source. Le second produit, baptisé "*Rapid impact mapping product*", se base sur une cartographie d'occupation du sol à jour et décrit le paysage affecté par la crue. Ce produit fait l'objet, sous un angle un peu différent, d'une analyse détaillée dans le chapitre 6. Il est délivré sous 12 heures après réception de la donnée source.

Avec un service d'astreinte opérationnel 24h/24, le service de cartographie rapide doit s'intégrer directement aux prodédures actuelles de la Sécurité Civile. Il doit être capable de répondre à toute requête fournissant des informations pertinentes sur le risque de crues, les prévisions hydrologiques et hydrauliques ou la gestion de crise et post-crise.

B.3.1.2 Compagnies d'assurance

En parallèle, le marché des compagnies d'assurance est investigué en Allemagne par Vista GmbH. Les produits dérivés de l'observation de la Terre sont notamment des cartographies de zones inondables et inondées, pour estimer des niveaux de risque et quantifier les dommages après une crue. Ainsi, les deux produits de cartographie rapide à destination de la Sécurité Civile trouvent ici un écho favorable, complétés par des cartographies de durée et de fréquence de submersion. Grâce à ces nouvelles informations, les compagnies d'assurances pourront optimiser leurs dispositifs actuels.

B.3.2 Résumé des objectifs

Les grands objectifs du projet EOMD peuvent être résumés par les éléments suivants :
- définition d'un service de gestion des crues de plaine à partir de données d'observation de la Terre,
- développer la chaîne de traitement des données spatiales pour exploiter pleinement les capacités d'ENVISAT,
- implémenter et tester le service,
- conforter le marché chez les premiers clients visés (Sécurité Civile et compagnies d'assurance),
- et promouvoir le service chez d'autres utilisateurs, sur d'autres zones géographiques et d'autres risques.

Annexe C

Documents cartographiques

Cette annexe rassemble les productions cartographiques de la seconde partie pour faciliter la lecture des chapitres et la consultation simultanée des documents. Elle comporte notamment des cartes localisant les trois zones d'études (Alzette, Elbe et Moselle), ainsi que des versions en grand format des extraits présentés dans le corps de texte.

pdf file : carto generale alzette 3, format A3

Fig. C.1 – Plaine alluviale de l'Alzette

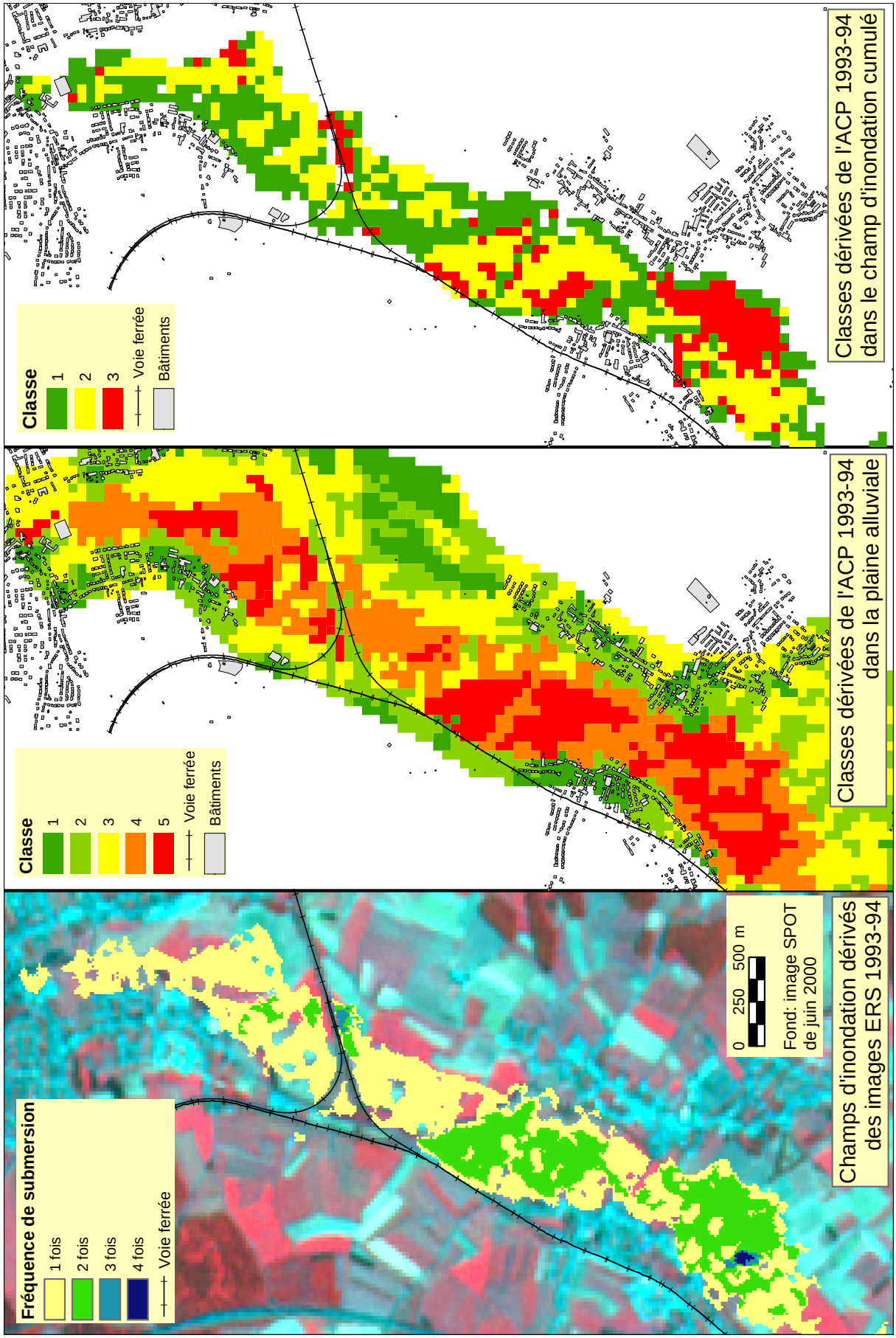


FIG. C.2 – Zones de comportements hydrauliques homogènes obtenues par segmentation de la plaine alluviale et du champ d'inondation maximal

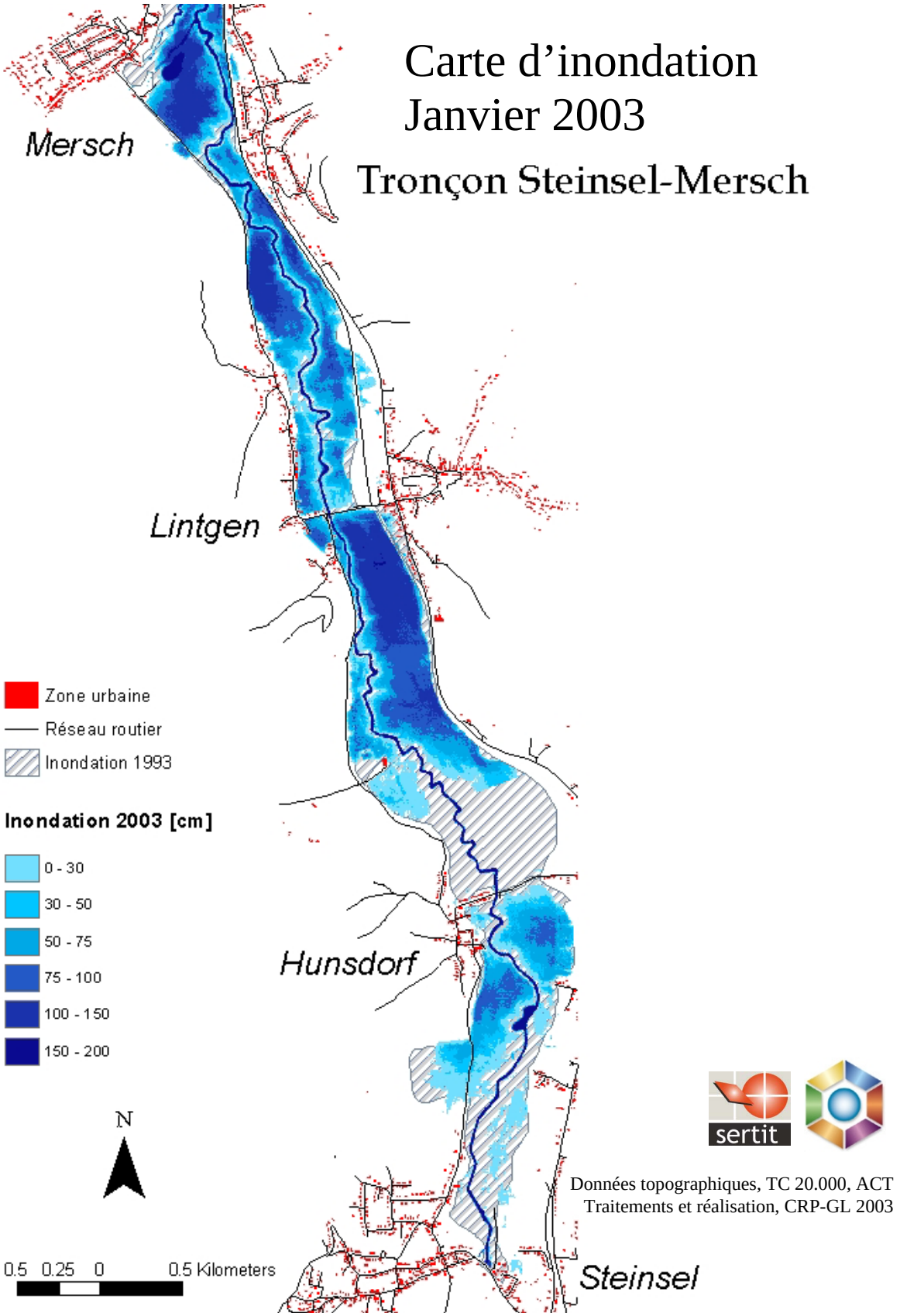


FIG. C.3 – Carte de l'inondation de Janvier 2003 sur le tronçon Steinsel-Mersch

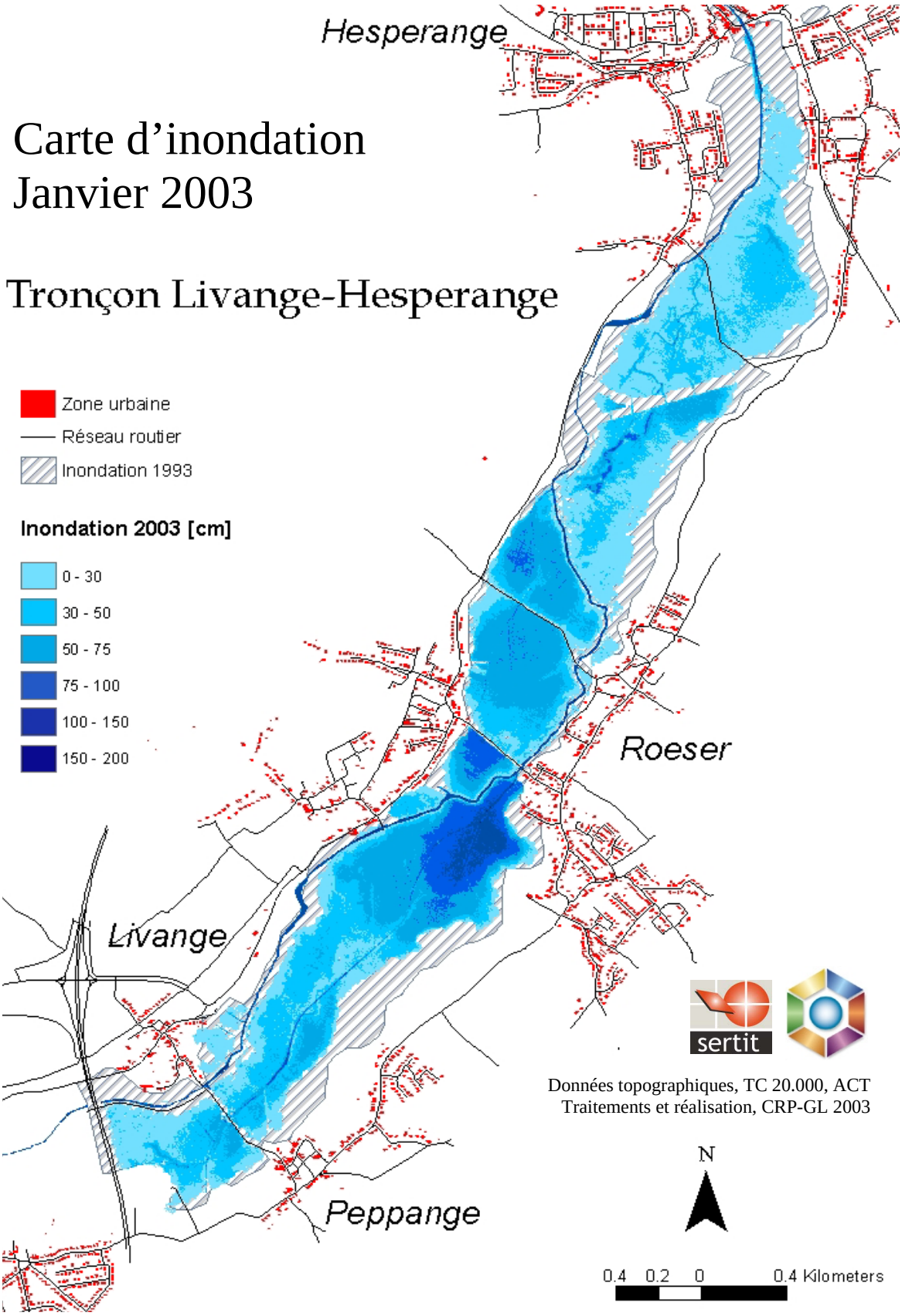


FIG. C.4 – Carte de l'inondation de Janvier 2003 sur le tronçon Livange-Hespérange

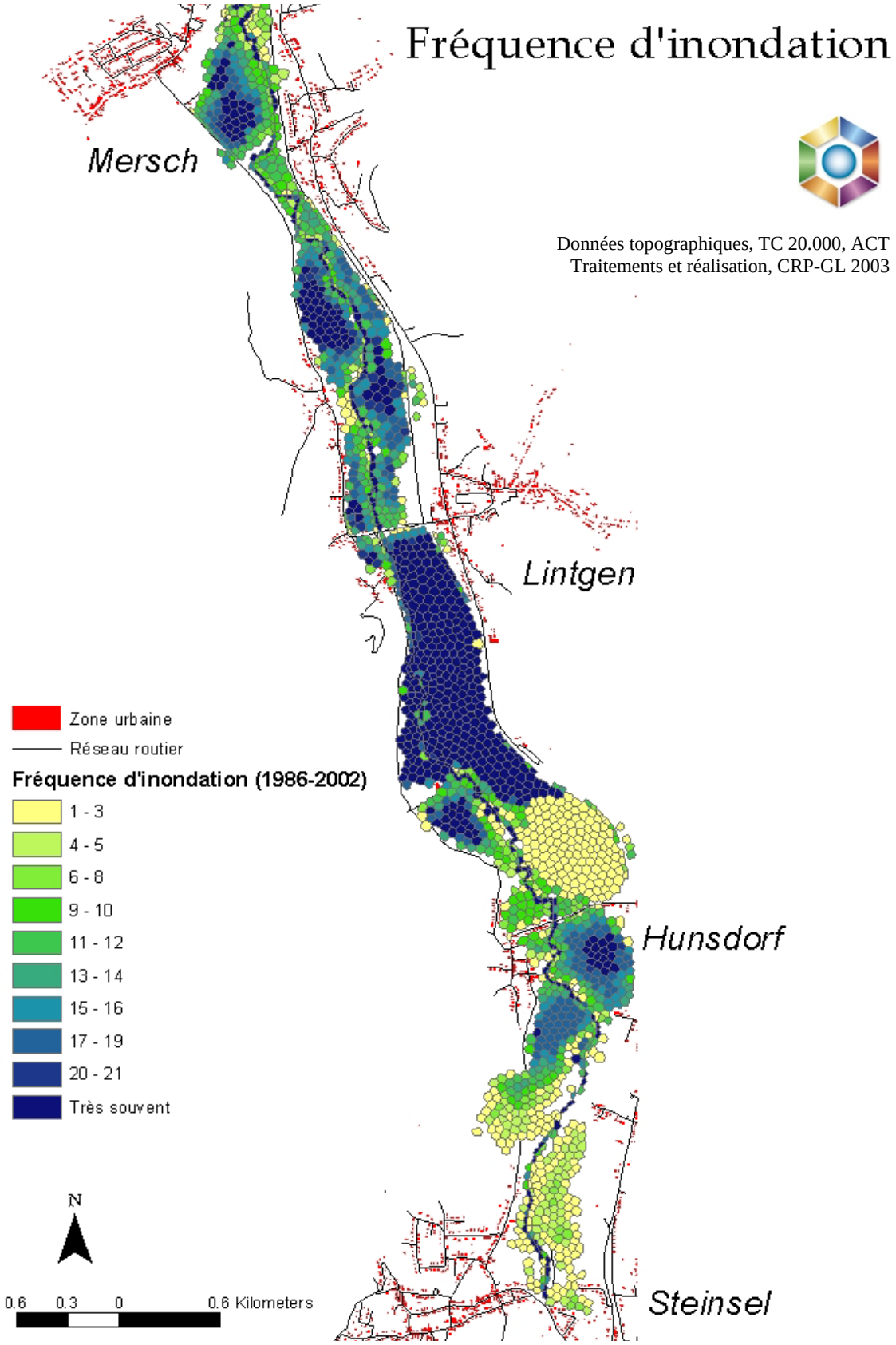


FIG. C.5 – Fréquence d'inondation du tronçon aval de l'Alzette

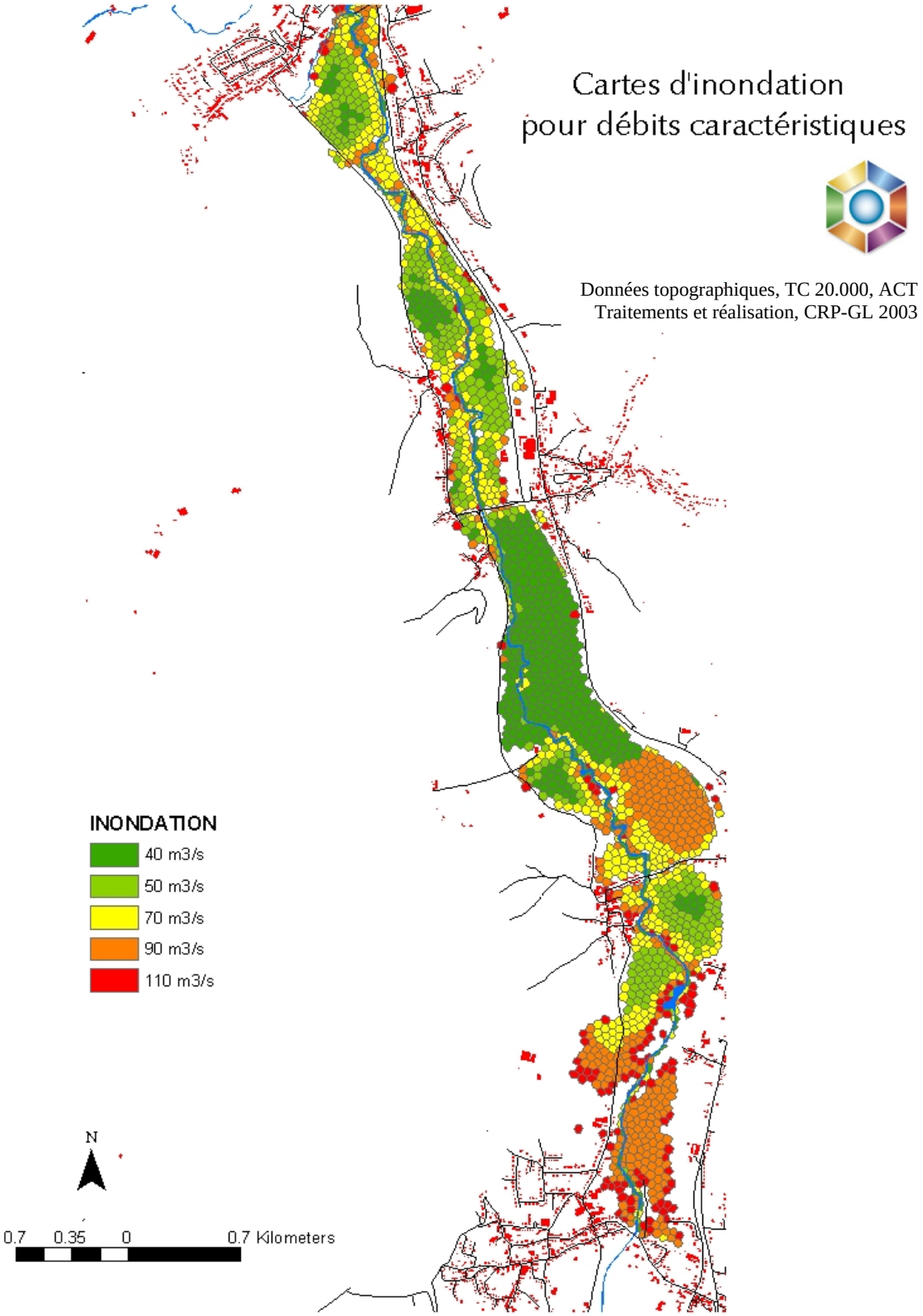
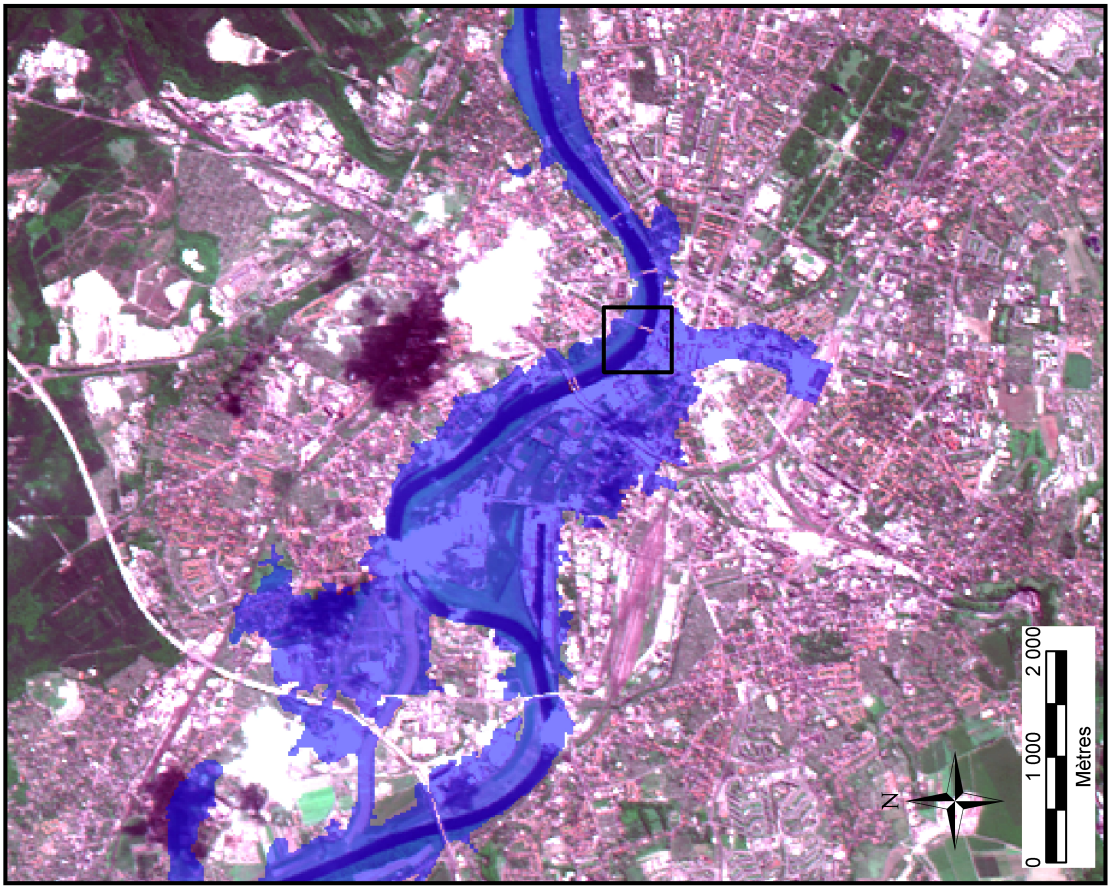


FIG. C.6 – Cartes d'inondation pour les débits caractéristiques

pdf file : carto generale elbe A3

Fig. C.7 – Couverture ASAR de la vallée de l'Elbe en août 2002



Crue de l'Elbe
Situation à Dresde le 17/08/02

Fond, image SPOT4 du 20/06/02
Champ d'inondation du 17/08/02
Image IKONOS du 18/08/02, DLR

Traitements et réalisation, SERTIT 2002

FIG. C.8 – Crue de l'Elbe, situation à Dresde le 17/08/02

pdf file : carto generale moselle A3

Fig. C.9 – Cours de la Moselle entre Metz et Thionville - Secteur d'étude du programme PACTES

Principaux réseaux entre Metz et Thionville

Réseaux, BD Carto IGN
Fond, image SPOT4 du 27/06/00
Traitements et réalisation, SERTIT 2002

FIG. C.10 – Principaux réseaux entre Metz et Thionville

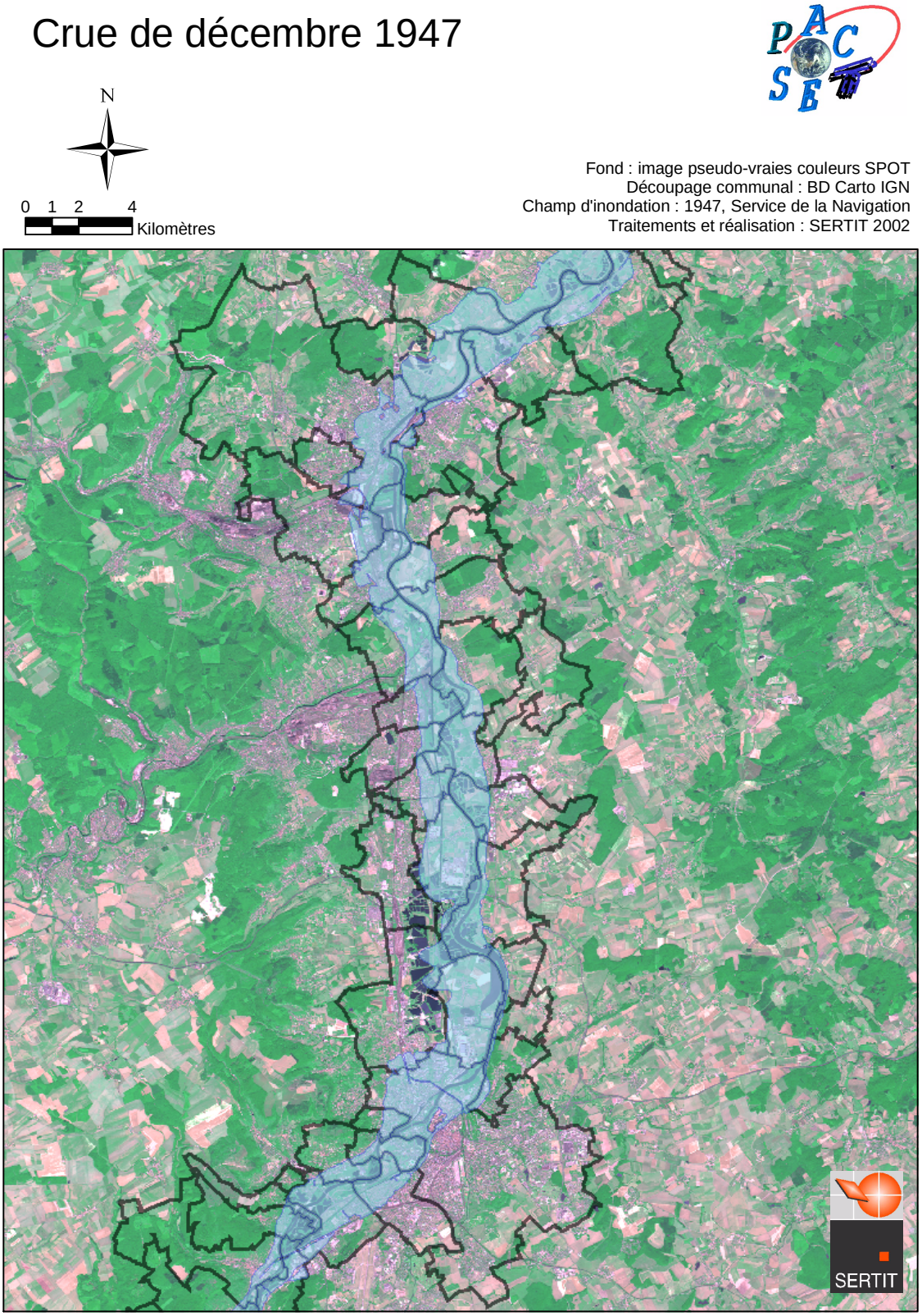


FIG. C.11 – Crue de 1947 de la Moselle

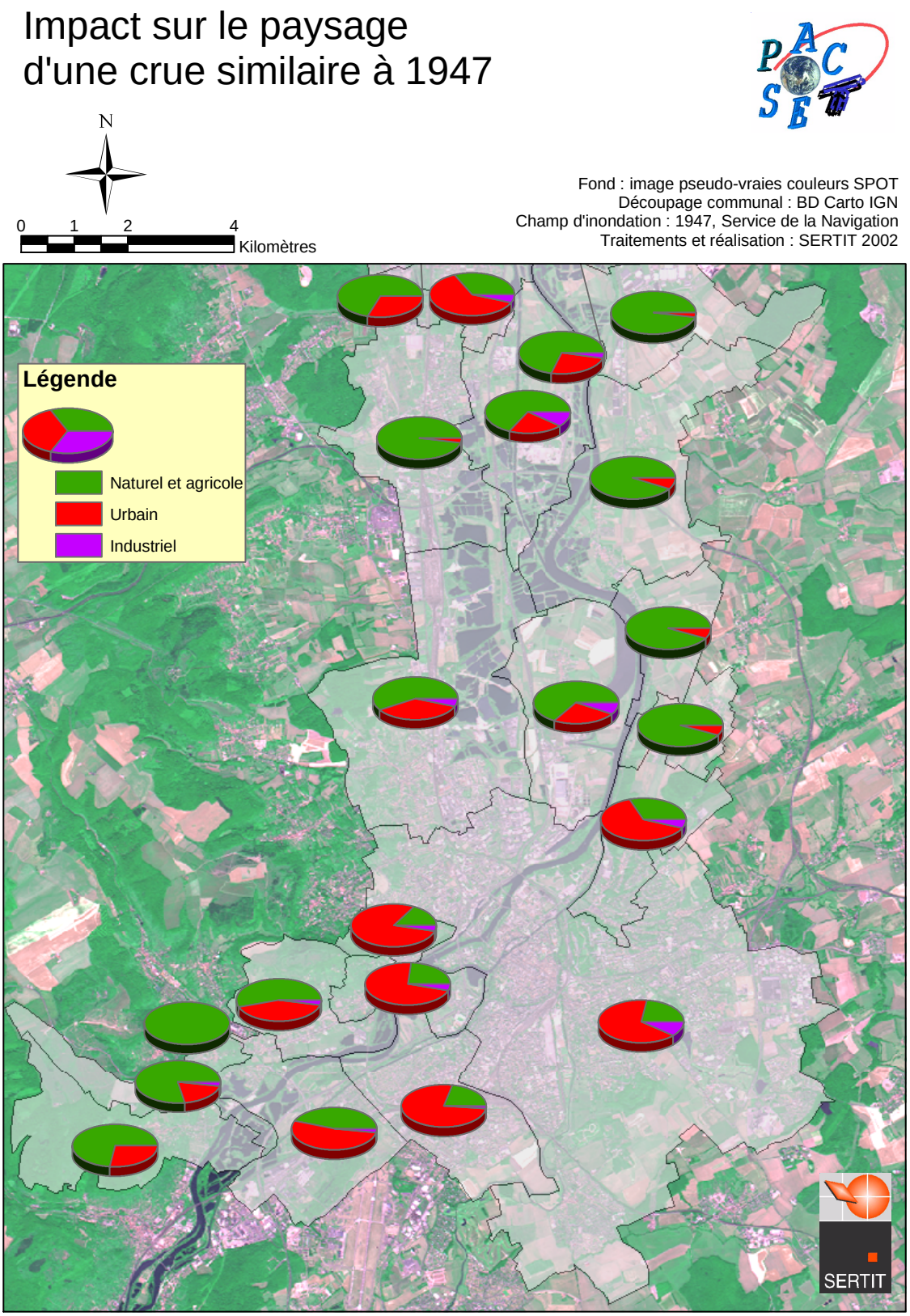


FIG. C.12 – Impact d'une crue similaire à 1947 sur le paysage de 2000

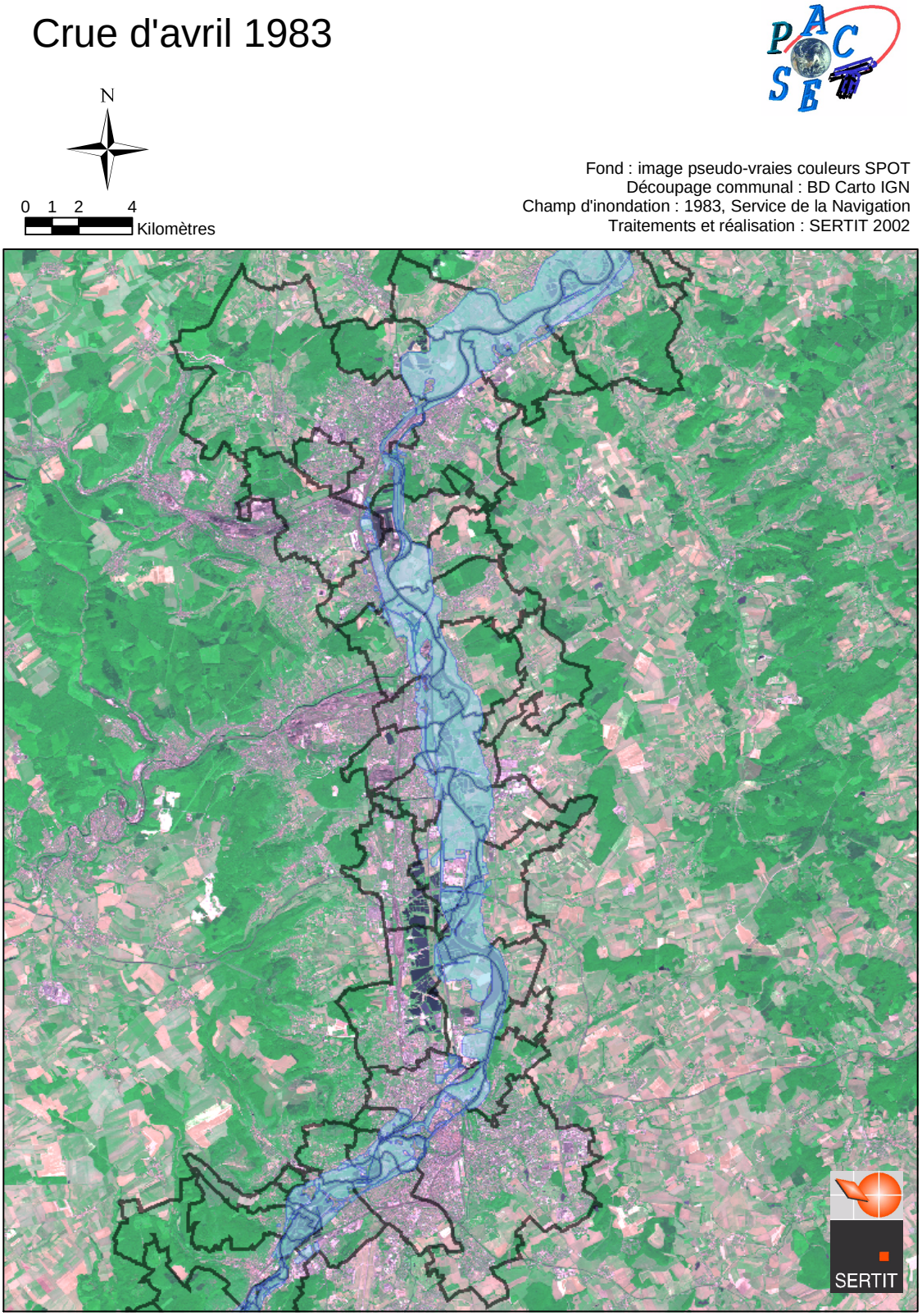


FIG. C.13 – Crue de 1983 de la Moselle

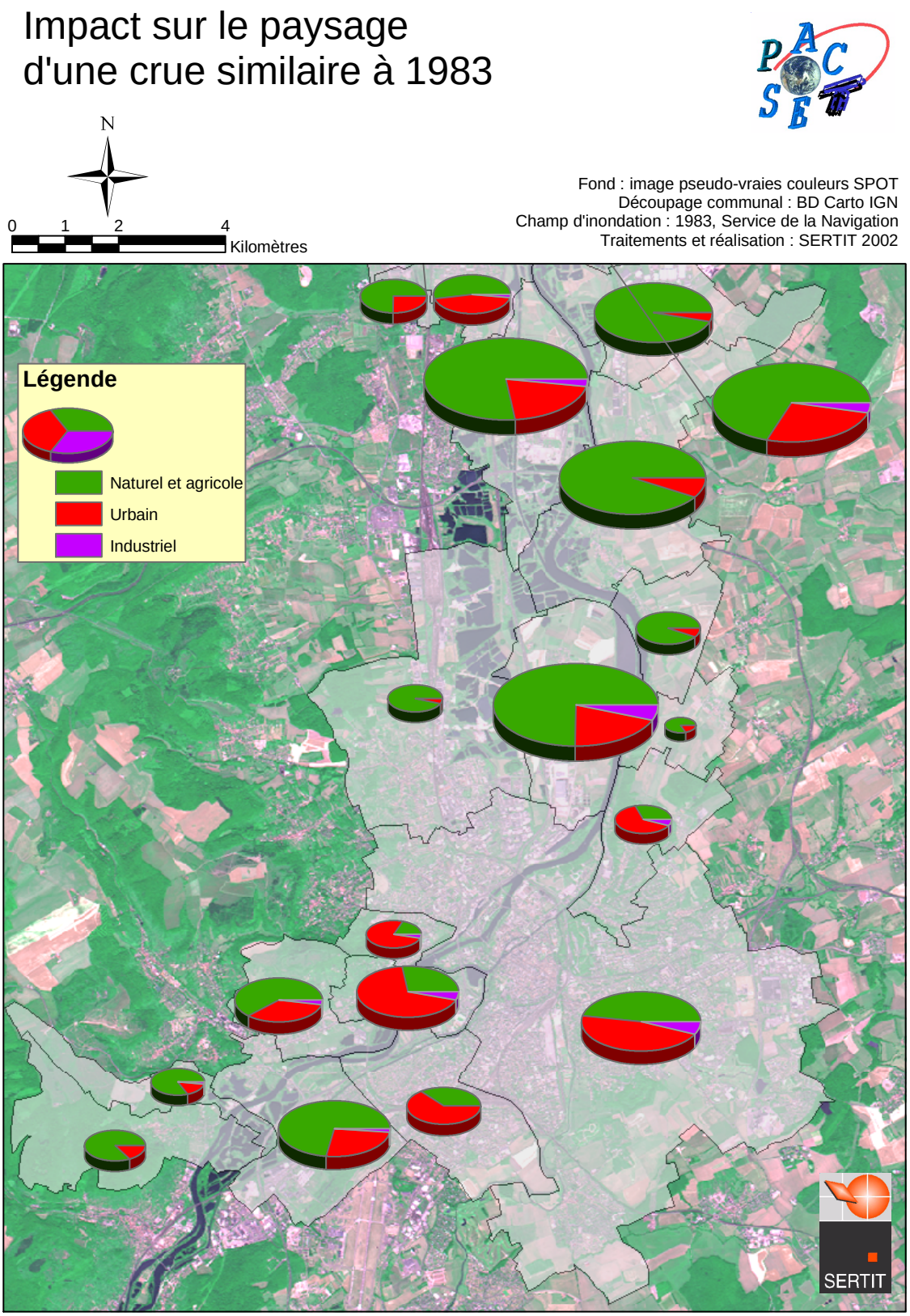


FIG. C.14 – Impact d'une crue similaire à 1983 sur le paysage de 2000

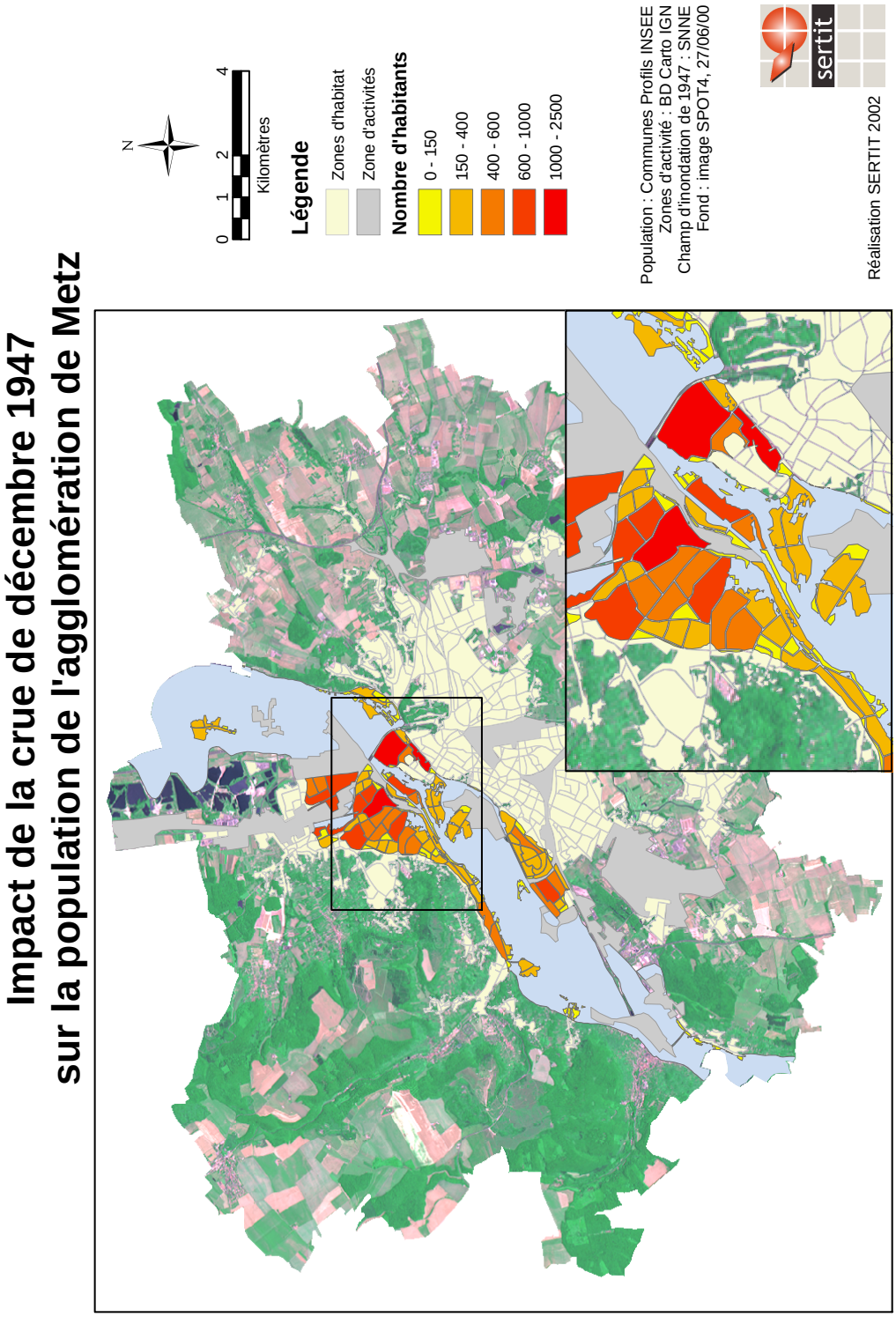


FIG. C.15 – Impact d'une crue similaire à 1947 sur la population recensée en 1999

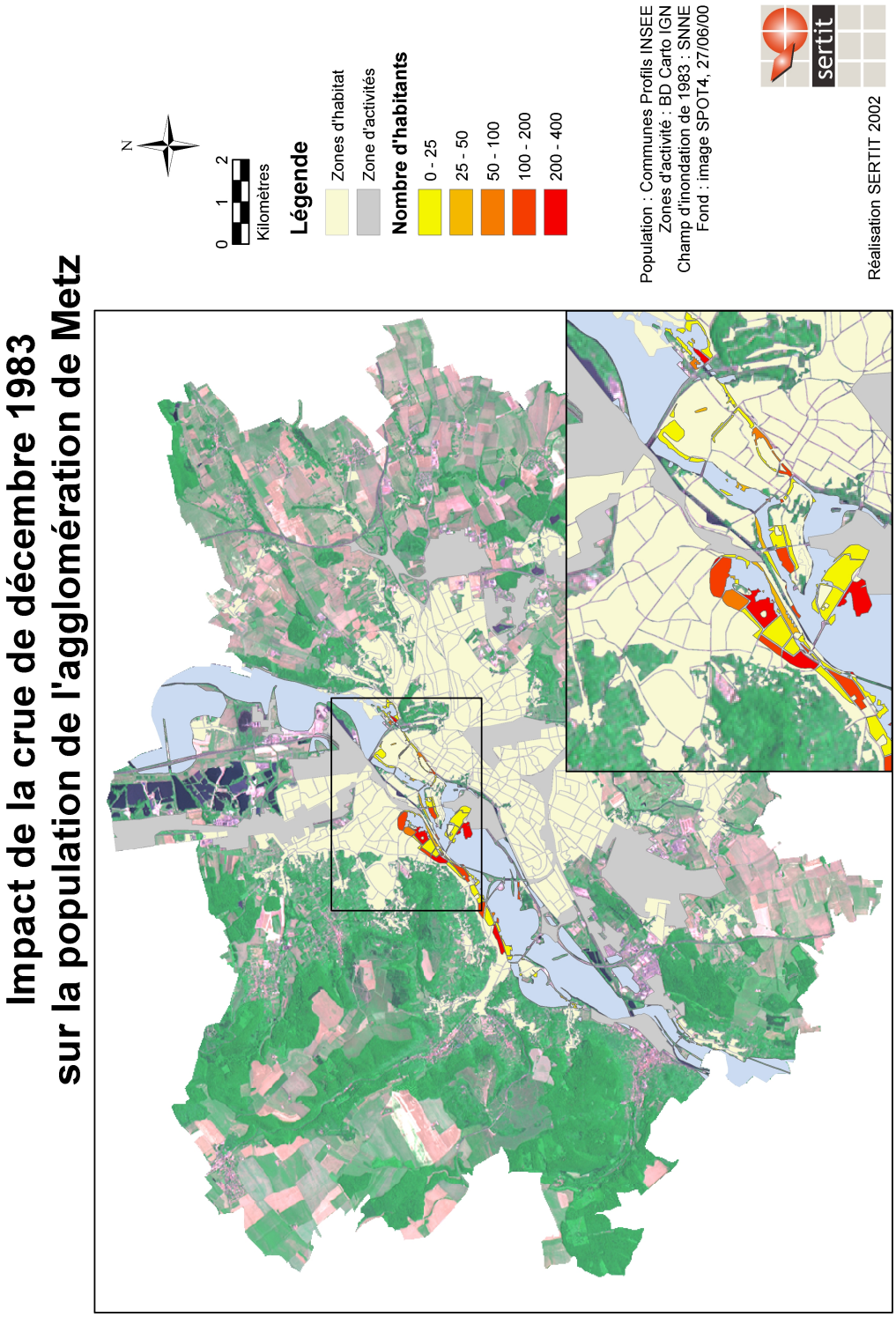


FIG. C.16 – Impact d'une crue similaire à 1983 sur la population recensée en 1999

Annexe D

Publications

Henry J.B., Matgen P., Tholey N., Pfister L., Hoffmann L., de Fraipont P., 2004, SAR PCA-based segmentation for hydraulic patterns identification, *CEOS SAR Workshop*, 25-28 mai, Ulm, soumis.

Henry J.B., Chastanet P., Fellah K., Desnos Y.L., 2004, ENVISAT Multi-Polarised ASAR data for flood mapping, *International Journal of Remote Sensing*, soumis.

Henry J.B., Matgen P., Tholey N., Pfister L., Hoffmann L., de Fraipont P., 2003, Vers une intégration des techniques spatiales pour la gestion des inondations, *Numéro Spécial du Bulletin de la SFPT*, accepté.

Henry J.B., Eburdy S., Lafue Y., Meyer E., Tholey N., de Fraipont P., 2003, Apports de l'observation de la Terre à l'évaluation des enjeux et de leur évolution face au risque d'inondation, dans la vallée de la Moselle entre Metz et Thionville, *Congrès de la SFPT 'Pixels et Cités'*, 26-28 novembre 2003, Paris.

Henry J.B., Chastanet P., Fellah K., Desnos Y.L., 2003, ENVISAT Multi-Polarised ASAR data for flood mapping, *Proceedings of IGARSS'03*, Toulouse.

Henry J.B., 2003, Techniques spatiales et systèmes d'information pour la gestion des inondations, Prix d'Honneur au Concours Jeunes Diplômés de l'Association Française de Topographie 2001, *XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie*, No. 93, pp. 36-41.

Henry J.B., Tholey N., P. de Fraipont, 2002, Multi-sensor flood crisis management and case-based database fulfil on River Moselle (France), *1st International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, 16-20 septembre, Torrent-Valencia.

Henry J.B., K. Fellah, S. Clandillon, B. Allenbach, P. de Fraipont, 2002, Earth Observation and case-based system for flood risk management, *Proceedings of IGARSS'02*, Toronto.

Henry J.B., Malet J.P, Maquaire O., Grussenmeyer P., 2002b, The use of small format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution DEMs in mountainous areas. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France), *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 27 (12), pp. 1339-1350.

Henry J.B., Grussenmeyer P., Malet J.P., Maquaire O., 2000, Génération de MNT par photogrammétrie aérienne de petit format : application au versant instable de Super-Sauze, *XYZ - Revue de l'Association Française de Topographie*, No. 87, pp. 42-50