

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAITRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

PAR
Olaf GAGNON

LA DÉTECTION DE CHANGEMENT AU SERVICE DE LA GESTION DE
CATASTROPHE

MONTREAL, LE 18 JUIN 2013

©Tous droits réservés, Olaf Gagnon, 2013

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Richard Lepage, directeur de mémoire
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Tony Wong, président du jury
Génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Claude Codjia, examinateur externe
Département de géographie à l'Université de Montréal

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 17 MAI 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

J'aimerais prendre un instant pour remercier quelques personnes qui m'ont inspiré et m'ont soutenu tout au long de mon cheminement. En premier lieu, je voudrais souligner l'effort considérable que mes parents, François Michel et Pierrette, ont su maintenir durant de nombreuses années avant d'arriver à m'inculquer le désir d'apprendre ainsi que la passion pour le savoir et la culture qui m'ont permis de me surpasser et d'arriver là où j'en suis dans ma carrière académique.

En second lieu, j'aimerais remercier toute ma famille ainsi que mes amis qui m'ont écouté pérorer patiemment pendant mon travail sur cette maîtrise. Sans vous mes chers, je sens que j'aurais perdu la raison et la force de poursuivre il y a déjà longtemps. Le soutien de mes proches m'a été d'un appui inestimable tout au long de cet exercice et je vous en remercie tous du fond de mon cœur. Je dois aussi souligner l'incroyable patience dont ma femme Stéphanie Aghbachian a fait preuve au cours de ce périple. Merci chérie, je ne sais pas comment tu as fait. J'aimerais aussi souligner l'énorme contribution de ma belle-sœur Sévan qui a accepté d'être ma correctrice.

Je tiens aussi à souligner l'exemple de dévouement aux sciences, à la culture et à notre société qu'ont été pour moi Jacob et Patricia Cohen. Depuis ma jeunesse ces deux êtres exceptionnels ont toujours été un phare brillant qui éclairait pour moi la forte relation qui existe entre tous les aspects de nos vies sociales et professionnelles. Ils m'ont permis de voir que les arts et les sciences sont bel et bien des choses que l'on peut poursuivre simultanément sans que l'un ou l'autre n'ait à souffrir de notre attention partagée.

Le soutien financier de Garth Jenkins et Jeff Scheckman, grâce à de nombreux travaux ainsi que de diverses fonctions qu'ils m'ont offerts au sein de leur équipe de verriers malgré mon emploi du temps contraignant et changeant, m'a essentiellement permis de compléter mon BAC ainsi que d'arriver à rencontrer mes obligations financières lors de ma maîtrise.

Messieurs, je vous remercie de votre patience et de votre dévouement pour vos collaborateurs.

Finalement, j'aimerais remercier M. Richard Lepage de m'avoir donné l'occasion de me rendre à Paris pour y réaliser un stage relié au thème de ce mémoire. Sans lui, je crois que je ne me serais pas encore rendu à l'évidence que la culture et le savoir ne sont que peu sans l'expérience vécue qui nous permet de mieux saisir le contexte ainsi que la signification réelle des choses que nous apprenons théoriquement.

LA DÉTECTION DE CHANGEMENT AU SERVICE DE LA GESTION DE CATASTROPHE

Olaf GAGNON

RÉSUMÉ

Depuis quelque temps, lorsque nous pensons à une catastrophe majeure, qu'elle soit d'ordre naturel ou de notre propre faction, nous pensons presque automatiquement à des images satellitaires des zones affectées. Ceci nous vient à l'esprit en partie à cause de la couverture médiatique qui utilise de plus en plus les mêmes sources de données que celles qui sont utilisées pour aider à la planification des efforts de secours. Le traitement d'images satellitaires est un outil précieux dans ce contexte-ci car nous pouvons extraire de nombreux types d'information pertinents aux diverses étapes de la planification des secours. Les concepts reliés à la télédétection ainsi que les outils et les techniques d'analyse qu'ont développé les chercheurs, les analystes et les photo-interprètes pour traiter et analyser des images satellitaires sont utilisés à bon escient afin de réaliser le traitement et l'analyse rapide d'images lors de catastrophes majeures pour aider à réaliser les produits cartographiques requis par la planification des efforts de secours. Ce document porte sur l'un des aspects techniques qui pourraient être particulièrement judicieux dans ce contexte, la détection de changement. Nous comprenons que l'exercice d'analyse que sous-tend l'usage d'images satellitaires dans un contexte de gestion de catastrophe est essentiellement la comparaison de ce qui « était » avant un événement de ce type à ce qui « est » après une catastrophe majeure. Conceptuellement, cette famille de techniques semble tout à propos, mais qu'en est-il réellement? Pour répondre à cette question, nous nous pencherons sur la question en analysant la chaîne de traitement sous-jacente ainsi que les contraintes fonctionnelles s'y rapportant et tenterons de remettre le tout en contexte en fonction de la détection de changement et de la difficulté reliée à son utilisation dans un contexte de gestion de catastrophe. Nous nous pencherons aussi sur la question de l'établissement des éléments techniques, fonctionnels et conceptuels requis pour permettre d'accroître le potentiel d'utilisation de la détection de changement dans un contexte de gestion de catastrophe.

Mots-clés : détection de changement, images satellitaires, gestion de catastrophe, télédétection, contraintes fonctionnelles, chaînes de traitement composées, connaissances indexées.

CHANGE DETECTION AS A SUPPORT FOR DISASTER MANAGEMENT

Olaf GAGNON

ABSTRACT

In recent times, when we think of major disasters, whether they are natural or a result of our activities, we often think of satellite images of the affected areas. This comes in part from the media coverage of such events that uses more and more the same data sources that we use to help plan and manage relief efforts. The processing and analysis of satellite images, in such contexts, is of great assistance because of the numerous types of information we can glean from them and the diverse uses we can put them to during the different steps involved in disaster management. To this effect, the various techniques and tools used in remote sensing, that were developed by research teams, analysts and photo interpreters, are used efficiently to help in the rapid treatment and analysis of satellite images as well as the creation of value added cartographic products that are likely to help in relief management. This paper deals with one of the many technical aspects that is particularly well suited to the analysis of crisis images, change detection. It is easily understandable that the analysis, entailed by the use of satellite images in the context of disaster management, is essentially the comparison of what “was” before the catastrophe with what “is” after it has happened. In light of this, it seems that change detection is the most appropriate tool to use in such situations, but is this truly the case? To answer this question, we will present the sequence of operations entailed by the use and analysis of satellite images as well as the technical constraints and pitfalls that must be considered as pertains to the context of disaster management and the problems associated with the use of change detection. We will underline the pertinent conceptual, technical and functional concepts that must be taken into consideration to increase the usability of change detection in disaster management.

Keywords: change detection, satellite images, disaster management, remote sensing, functional constraints, complex image analysis, indexed knowledge.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 LES IMAGES SATELLITAIRES ET LA GESTION DE CATASTROPHE	11
1.1 Les types d'images et de données utilisées en télédétection.....	16
1.1.1 Les images panchromatiques	19
1.1.2 Les images multispectrales	21
1.1.3 Les images rehaussées par fusion	22
1.1.4 Les images RADAR	24
1.1.5 Les différentes résolutions spatiales des images satellitaires	28
1.1.6 Les données provenant de système d'information géographique, SIG.....	30
1.1.7 Les séries temporelles d'images satellitaires	32
1.2 Les points communs aux images utilisées en télédétection.....	34
1.3 L'accès aux données utilisées en télédétection et de leur disponibilité	37
CHAPITRE 2 LE TRAITEMENT D'IMAGES SATELLITAIRES.....	43
2.1 Les applications de la télédétection reliées aux efforts humanitaires	44
2.2 La séquence de traitement et d'analyse typique d'images satellitaires.....	45
2.3 Le prétraitement des images	49
2.4 L'extraction de caractéristiques	55
2.4.1 Le problème d'identification des caractéristiques pertinentes à utiliser	62
2.4.2 Les caractéristiques communes aux images utilisées	67
2.4.3 La modélisation de la relation entre ces variables	70
2.5 La classification du contenu des images	72
2.5.1 La classification supervisée	73
2.5.2 La classification non supervisée	75
2.5.3 La classification semi-supervisée	77
2.6 L'identification et de la représentation des phénomènes d'intérêt	82
2.7 Exemple de traitement de classification de l'usage du territoire	84
CHAPITRE 3 LA DÉTECTION DE DIFFÉRENCE ET DE CHANGEMENT EN TÉLÉDÉTECTION	93
3.1 La différence et le changement	93
3.1.1 La différence	94
3.1.2 Le changement	95
3.2 Les types de changements et de leur caractérisation	97
3.3 Les combinaisons d'images sources et leurs contraintes fonctionnelles	102
3.4 L'imagerie satellitaire et la comparaison de leur contenu	104
3.4.1 Le cas d'analyse idéal	106
3.4.2 Le recalage d'image et son impact sur la détection de changement	108
3.4.3 Les cas moins qu'idéaux	116

3.4.4	La description du contenu et de la détection de changement.....	121
3.5	La détection de différence/changement et les techniques usuelles	127
3.5.1	Les contraintes fonctionnelles inhérentes à la détection de changement....	128
3.5.2	Les types de changements traitables	132
3.5.3	Les techniques usuelles de détection de changement	137
3.5.4	Cas d'utilisation de détection de changement en télédétection	166
CHAPITRE 4 UNE INTERVENTION DE GESTION DE CATASTROPHE À GRANDE ÉCHELLE		173
4.1	Le contexte général de l'intervention	175
4.2	D'un cas réel de traitement d'images satellitaires	176
4.3	Constatations fonctionnelles de l'intervention.....	182
CHAPITRE 5 LA DÉTECTION DE CHANGEMENT ET LA GESTION DE CATASTROPHE		187
5.1	Le traitement d'image et de la détection de changement académique.....	189
5.2	Le traitement d'image et de la détection de changement pratique.....	191
5.3	L'évolution des images et du cycle de la problématique	195
5.3.1	Les métadonnées de classification et de contenu.....	208
5.4	La problématique du support de traitement	214
5.4.1	L'accès aux images sources et transformées.	228
5.4.2	Le traitement distribué et de l'accès aux ressources algorithmiques	236
5.4.3	La réutilisabilité des modèles de traitement et de classification	257
5.4.4	La programmation graphique des modèles de traitement et de classification	260
5.5	Les éléments conceptuels à retenir pour l'élaboration du support de traitement.....	269
CONCLUSION.....		273
RECOMMANDATIONS		283
ANNEXE I TABLEAU DES TECHNIQUES DE DÉTECTION DE CHANGEMENT		291
ANNEXE II BIBLIOGRAPHIE SUR LA DÉTECTION DE CHANGEMENT DU CHAPITRE 3		303
BIBLIOGRAPHIE		307

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Longueurs d'onde usuelles utilisées par les imageurs passifs.....17
Tableau 1.2	Longueurs d'onde usuelles en imagerie RADAR26
Tableau 1.3	Formats d'images satellitaires disponibles avec GeoDataDownload.....41
Tableau 3.1	Combinaisons d'images et de contraintes et la détection de changement104
Tableau 3.2	Impact d'erreurs de recalage résiduelles (simulé)114
Tableau 4.1	Images d'Haïti pour l'analyse des édifices endommagés par Tiede et al.....177
Tableau 5.1	Nomenclature CORINE land cover213

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Image panchromatique de la ville de Boumerdes20
Figure 1.2	Image multispectrale d'Haïti après le tremblement de terre de 2010.....21
Figure 1.3	Images panchromatique, multispectrale et rehaussée24
Figure 1.4	Image RADAR à synthèse d'ouverture de la région Gonaïves d'Haïti25
Figure 1.5	Image composite RADAR de la ville de San Francisco27
Figure 1.6	Exemple de données SIG augmentées31
Figure 2.1	Chaîne de traitement typique d'images satellitaires49
Figure 3.1	Images de test et de différence sans décalage ou différence111
Figure 3.2	Images de test et de différence sans décalage avec des différences111
Figure 3.3	Images de tests et de différence d'un cas de différence avec erreur de recalage113
Figure 3.4	Exemple du toron et de la sphère124
Figure 3.5	Exemple du toron et de la sphère décrit différemment125
Figure 3.6	Exemple 2D du concept de l'analyse CVA161
Figure 3.7	Effet de la réduction de résolution sur l'erreur de recalage résiduelle.....164
Figure 5.1	Séquence de traitement typique217
Figure 5.2	Modèle d'accès et structure des ressources224
Figure 5.3	Interface de configuration des requêtes image.....230
Figure 5.4	Interface de sélection d'images.....232
Figure 5.5	Interface de sélection des composantes de l'image233

Figure 5.6	Interface de téléchargement d'image	234
Figure 5.7	Interface de travail GeOnAs	240
Figure 5.8	Interface de travail GeOnAs avec module de recherche d'image.....	242
Figure 5.9	Interface de travail GeOnAs avec module de sélection de composantes d'image.....	243
Figure 5.10	Interface de travail GeOnAs avec bandes d'information image.....	244
Figure 5.11	Interface de travail GeOnAs avec fonction de classification non supervisée.....	245
Figure 5.12	Interface de travail GeOnAs avec le résultat de la classification non supervisée.....	246
Figure 5.13	Interface de travail du logiciel KAOS	249
Figure 5.14	Image Browser en format liste de KAOS	250
Figure 5.15	Image Browser en format empreinte au sol de KAOS	251
Figure 5.16	Image Browser en format empreinte au sol de KAOS	253
Figure 5.17	Affichage d'une classe extraite d'une STIS en fonction du temps.....	254
Figure 5.18	Modules Manager de KAOS.....	256
Figure 5.19	Exemple de séquence d'actions modélisée avec SIMULINK sous MATLAB.....	263
Figure 5.20	Interface de travail du logiciel de traitement d'image du logiciel NUKE	265
Figure 5.21	Interface du module <i>FEP Desingner</i> du logiciel KAOS	268

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ACP	Analyse par Composante Principales
ANOVA	<i>Analysis of Variance</i>
BPEL	<i>Business Process Execution Language</i>
CCE	<i>Categorical Change Extraction</i>
CMD	<i>Change Mask Developement</i>
CNES	Centre National d'Études Spatiales, (France)
CORINE	Coordination de l'information sur l'environnement
CVA	<i>Change Vector Analysis</i>
DLR	<i>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</i> , agence spatiale Allemande
EM	<i>Expectation-Maximization</i>
ETM et ETM+	<i>Enhanced Thematic Mapper</i>
HDDS	<i>Hazards Data Distribution System</i>
HH	Horizontale Horizontale, mode de polarisation RADAR
HR	Haute Résolution
HSI	<i>Hue Saturation Intensity</i>
HV	Horizontale Verticale, mode de polarisation RADAR
IRT	Infrarouge thermique
ITK	<i>Insight Tool Kit</i>
KT	Kauth-Thomas
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LIDAR	<i>Light Detection and Ranging</i>
MIR	Moyen infrarouge
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MODIS	<i>Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer</i>
MSS	<i>Multispectral Scanner</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OTB	Orfeo Toolbox

XVIII

OWL	<i>Web Ontology Language</i>
PIR	Proche infrarouge
RADAR	<i>Radio Detection and Ranging</i>
RSO	Radar à synthèse d'ouverture
RVB	Rouge Vert Bleu
SAVI	<i>Soil-Adjusted Vegetation Index</i>
SDA	<i>Stepwise Discriminant Analysis</i>
SIFT	<i>Scale-Invariant Feature Transform</i>
SIG	Système d'Information Géographique
STIS	Série temporelle d'images satellitaires
SOFM	<i>Self-Organizing Feature Map</i>
SONAR	<i>Sound Navigation and Ranging</i>
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SVM	Séparateurs à Vaste Marge
THR	Très Haute Résolution
TM	<i>Thematic Mapper</i>
UNOSAT	<i>United Nations Operational Satellite applications program</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
VIS	Spectre lumineux visible
VH	Verticale Horizontale, mode de polarisation RADAR
VV	Verticale Verticale, mode de polarisation RADAR
WSDL	<i>Web Service Definition Language</i>

INTRODUCTION

Dans notre monde dynamique et continuellement changeant nous devons fréquemment nous réunir pour faire front commun à différentes situations qui sont précaires ou dangereuses. Qu'il s'agisse de guerres, de crises économiques ou de catastrophes majeures, il est indéniable que, bien souvent, nous arrivons collectivement à résoudre des problèmes que nous ne pourrions traiter seuls. Notre histoire en est remplie d'exemples, comme les Nations Unies ou encore la coalition d'alliés qui nous a permis de mettre un terme à la Deuxième Guerre mondiale. Nous sommes capables, lorsque la situation le requiert, de travailler ensemble en faisant fi de nos différends pour arriver à un but commun qui est dans l'intérêt de l'ensemble de notre communauté. Nous pouvons voir des exemples de regroupement de ce type autant à des échelles « macroscopiques », comme les Nations Unies que nous venons de mentionner, que « microscopiques » comme des regroupements de voisinage ou de communautés qui travaillent collectivement pour améliorer leur bien-être commun.

Lorsque nous avons à faire face à des situations de crise d'envergure, comme des guerres ou des catastrophes majeures, il est inévitable que les regroupements d'acteurs appelés à aider soient plus grands et qu'ils soient même souvent déployés de par le monde. Par exemple, l'implication de la communauté internationale d'intervenants œuvrant en télédétection qui contribue au traitement et à l'analyse d'images satellitaires lors de catastrophes majeures en vue de fournir aux gestionnaires des efforts de secours les produits cartographiques dérivés nécessaires pour planifier les différentes actions qui peuvent être requises pour venir en aide aux populations affectées par ces événements imprévisibles.

Les efforts de l'ensemble des acteurs mis en cause lors d'interventions reliées à des catastrophes majeures sont supervisés par différents regroupements privés et gouvernementaux, mais sont chapeautés par la *Charte internationale : Espace et Catastrophes Majeures*¹, qui supervise l'acquisition et la distribution d'images satellitaires pertinentes ainsi que la distribution des produits cartographiques dérivés aux gestionnaires

¹ <http://www.disasterscharter.org/home>, consulté le 6 juin 2013.

qui planifient les efforts de secours. Tout ceci est bien sûr réalisé le plus rapidement possible afin de permettre de minimiser l'impact que ces situations peuvent avoir sur les populations locales.

Nous comprenons que le cycle de production des produits cartographiques requis doit être aussi court que possible pour nous permettre d'atteindre ce but. Pour réaliser ceci, le traitement et l'analyse des images sont menés à l'aide des concepts et des techniques utilisées en télédétection. Cette discipline est consacrée à l'analyse de phénomènes distants en utilisant des mesures sans contact. Les images satellitaires sont des sources de données de ce type qui nous permettent d'analyser de grandes surfaces terrestres d'un seul coup, minimisant de la sorte la quantité de temps qui serait requis pour réaliser la même tâche en utilisant des images aéroportées qui couvrent beaucoup moins de surface terrestre par image. La télédétection et les images satellitaires sont des outils tellement pertinents pour réaliser des analyses à grande échelle de différents phénomènes que les Nations Unies ont une sous-division, l'UNOSAT², qui leur est dédiée.

La télédétection est un outil que nous utilisons depuis longtemps pour analyser des phénomènes météorologiques, de déforestation ou de progression de la désertification de différentes régions du globe, d'agriculture de précision ainsi qu'une large panoplie d'autres phénomènes importants qui seraient difficiles à suivre et à analyser si nous devions les mesurer au sol. Les concepts de base de cette discipline peuvent être adaptés pour traiter un grand nombre de contextes d'analyse différents moyennant certains ajustements des concepts de bases et des paramètres fonctionnels des différents algorithmes et techniques de traitement qui ont été développés par les chercheurs et acteurs du domaine de la télédétection et des autres domaines de recherches qui sont mis à contribution par le traitement et l'analyse d'images satellitaires.

Il est important de retenir que la télédétection est une discipline à la croisée de plusieurs domaines de recherche distincts. Pour réaliser l'analyse d'une image satellitaire nous avons

² <http://www.unitar.org/unosat/fr>, consulté le 22 janvier 2013.

souvent recourt à des concepts qui proviennent des domaines de la classification, du traitement d'images, de la reconnaissance de forme, de la détection de changement et des statistiques pour n'en mentionner que quelques-uns.

Nous pouvons illustrer ceci clairement en utilisant un exemple du milieu industriel, par exemple une entreprise qui œuvre en injection plastique utilise des outils, qui sont développés par des compagnies qui conçoivent et fabriquent des machines, sans qu'elle ne soit obligée de concevoir les machines qui sont utilisées pour réaliser les produits qu'elle fabrique.

Il en est de même avec la télédétection. Les concepts qui sont utilisés par les différents intervenants qui mènent les analyses ne sont pas nécessairement le fruit de leurs travaux, bien que ceci ne soit pas absolument exclu, mais découlent des travaux de chercheurs qui œuvrent dans d'autres domaines et qui sont adaptés pour répondre aux besoins des analystes d'images satellitaires. Nous comprenons ainsi qu'afin d'être en mesure d'utiliser les techniques et algorithmes pertinents dans un contexte de traitement et d'analyse d'images satellitaires efficacement, il faut avoir une certaine familiarité avec des concepts issus d'autres domaines de recherche. Nous voyons ici que la polyvalence, la curiosité et le désir d'apprendre sont des traits de caractère importants pour tout analyste qui doit travailler avec les techniques reliées à la télédétection.

Le traitement complet d'une image satellitaire met plusieurs opérations en cascade permettant de transformer l'image brute en un produit dérivé à valeur ajoutée. Les opérations mises en œuvre par les différents paliers de traitement seront présentées dans les différentes sections de ce document, mais peuvent être représentées, encore une fois, en utilisant un exemple du milieu industriel.

Nous pouvons nous représenter les différentes étapes requises par la production d'un produit image à valeur ajoutée de la même manière que toute séquence d'opérations requises pour la production d'un bien matériel. Conceptuellement, nous avons des intrants, des matières

premières et des composantes préfabriquées pour la production industrielle et des images brutes pour la production de produits image à valeur ajoutée, des processus de transformation, des machines et des étapes de réalisation pour la production industrielle et des techniques de traitement et/ou des algorithmes pour le traitement d'images satellitaires, puis finalement des extrants, des produits manufacturés pour la production industrielle et des produits images ou cartographiques dérivés à valeur ajoutée pour le traitement d'images satellitaires.

En poursuivant avec l'analogie industrielle, nous pouvons aussi expliquer les différences fondamentales qui existent entre l'utilisation des concepts et des techniques utilisés en télédétection et en détection de changement sous la contrainte de l'urgence qui est caractéristique de tout contexte de gestion de catastrophe, par rapport à l'utilisation normale de ces mécanismes d'analyse d'images satellitaires. Si nous considérons la chaîne de traitement mise en cause par le traitement et l'analyse d'images satellitaires de la même manière que tout processus de transformation visant à produire des biens à valeur ajoutée, nous pouvons représenter les deux contextes d'analyse d'images satellitaires que nous venons de mentionner à l'aide de modèles de production connus.

L'analyse d'images satellitaires, avec ou sans détection de changement, réalisée dans un contexte normal où l'urgence de la situation ne prime pas, peut être représentée de la même manière que tout processus de production en continu. Ceci découle du fait que dans ce contexte nous connaissons d'avance ce que seront les intrants. Typiquement, les images sources sont choisies en fonction du but de traitement, de plus, nous connaissons aussi ce qui doit être réalisé comme produit à valeur ajoutée résultant du processus de transformation. Même si plusieurs types de produits sont réalisés il n'en demeure pas moins que les « matières premières » et les « produits à valeur ajoutée » sont connus et qu'il est donc possible de concevoir les mécanismes de production en sélectionnant les composantes du processus de transformation qui sont les plus appropriées en fonction de l'objectif. Nous pouvons donc considérer ce contexte d'utilisation des concepts et techniques de la

télédétection de la même manière qu'une entreprise qui réalise certains produits très spécifiques avec des méthodes préétablies et optimisées.

La situation est considérablement différente dans un contexte où l'urgence prime comme c'est le cas dans une situation de gestion de catastrophe. Dans ce cas de figure, nous comprenons qu'il y a un nombre de données sources qui peuvent avoir à être traitées, bien souvent sans que nous puissions prévoir ce qu'elles seront, pour créer un nombre de différents produits à valeur ajoutée dont les types sont dictés par la situation qui change elle aussi de cas en cas. Conséquemment, dans cette situation il est difficile de prévoir quels outils seront requis et donc de pouvoir concevoir à l'avance les mécanismes de transformation optimisés qui seront mis en œuvre pour résoudre un problème spécifique. Dans une telle situation, nous ne pouvons plus penser à comparer ce contexte d'utilisation à de la production en continu, il faut plutôt penser à un modèle de production de type juste à temps qui repose sur l'utilisation de processus de transformation flexibles et polyvalents utilisés dans un contexte de production à la pièce.

L'analyse du potentiel d'utilisation des techniques et algorithmes de détection de changement doit donc tenir compte du contexte d'utilisation mis en cause pour que nous soyons en mesure de comprendre ce qui est requis pour maximiser leur potentiel d'utilisation efficace. Il faut retenir que la détection de changement est l'une des étapes finales de l'analyse comparative d'images satellitaires et que pour avoir une appréciation réaliste de la complexité qui sous-tend l'ensemble des opérations requises pour permettre de réaliser une analyse de changement, il est capital de considérer le problème globalement.

Afin de bien expliquer le problème de la détection de changement dans le contexte de la gestion de catastrophe, nous procéderons à une description des différents éléments qui constituent la chaîne de traitement complète des images satellitaires. Un peu à la manière de l'analyse d'un processus de production, nous présenterons les concepts mis en cause par groupes en fonction de leur rôle dans la séquence de transformation et d'analyse des images en vue de créer des produits image à valeur ajoutée ou des produits cartographiques dérivés.

L'analyse que nous présentons dans ce document porte sur les différents éléments qui rendent l'utilisation de la détection de changement à l'aide de techniques usuelles plus difficile à justifier dans des contextes de gestion de catastrophe. Bien que, conceptuellement, nous soyons forcés d'admettre que l'exercice relié à l'analyse d'images satellitaire dans ce contexte est essentiellement d'identifier ce qui change entre deux, ou plusieurs, images d'une même région représentant la situation avant et après une catastrophe majeure, ce qui est donc essentiellement la détection des changements survenus, il n'est pas simple d'utiliser les concepts issus des recherches en détection de changement efficacement à cause du contexte temporel très court qui est disponible pour créer les produits cartographiques dérivés requis. Ce n'est pas le seul élément qui rend l'utilisation de ces techniques difficile, mais il s'agit tout de même du principal obstacle auquel nous devons faire face.

Nous tenterons de souligner les principaux éléments qui limitent le potentiel d'utilisation des techniques de détection de changement, dans un contexte de gestion de catastrophe, autant du point de vue de la détection de changement même que de celui de la chaîne de traitement et de l'impact que l'accumulation de l'incertitude issue des traitements intermédiaires peut avoir sur la qualité des résultats. Bien que la détection de changement soit un outil très à propos dans ce contexte, il faut être conscient que les algorithmes et techniques de traitement reliés à ce type d'analyse sont en général très sensibles et souvent difficilement généralisables. Il est donc inévitable qu'il soit nécessaire de développer une panoplie de séquences de traitement complètes qui nous permettent de résoudre différents scénarios d'analyse. En sommes, nous parlons de créer des outils dédiés au traitement et à l'analyse d'images satellitaires qui permettent de réaliser la détection des changements survenus aussi automatiquement que possible en fonction des types d'images disponibles et des produits cartographiques requis par les différents types de catastrophes que nous pouvons avoir à traiter.

La création d'outils de ce genre nous permettra de minimiser l'impact que peut avoir l'accumulation de l'incertitude sur la probité des résultats et libérera les analystes de la tâche complexe et ardue que représente l'accumulation de toutes les connaissances requises pour

être en mesure d'utiliser les techniques et algorithmes de détection de changement d'une manière efficiente. Il faut comprendre que le développement de techniques de traitement permettant de réaliser la détection de changement et l'utilisation de ces techniques ne met pas en jeu les mêmes connaissances.

Nous nous pencherons donc sur l'identification des éléments conceptuels sous-jacents au développement d'outils dédiés à ces analyses qui permettront aux chercheurs qui travailleront sur leur développement de pouvoir les réaliser d'une manière efficace et rapide tout en leur permettant, autant que cela soit possible, de créer des programmes exécutables et/ou des modules de traitement réutilisables. Ceci est bien sûr entièrement axé sur la création d'outils propices à être mis à la disposition des analystes qui mènent l'analyse d'images satellitaires et qui leur permettront de tirer profit des concepts et des techniques de traitement reliées à la détection de changement le plus efficacement possible.

Pour nous permettre de bien cerner les éléments conceptuels qui sont mis en œuvre pour réaliser une séquence de traitement complète, nous nous attarderons à l'analyse des différents paliers de traitement qui sont mis en cause pour effectuer l'analyse complète d'une image satellitaire et à la préparation de l'information qui sous-tend l'utilisation de la détection de changement. Il ne faut pas perdre de vue que cette étape est la dernière qui précède la création des produits cartographiques dérivés, conséquemment la qualité des résultats dépend de toutes les étapes qui la précèdent.

Au CHAPITRE 1, nous présenterons les images sources et donnerons certaines de leurs caractéristiques ainsi que certains des problèmes qui leur sont associés. Dans le CHAPITRE 2, nous présenterons les différents concepts qui sont reliés au traitement de ces images ainsi qu'à l'analyse de leur contenu qui précède la détection de changement proprement dite. Le CHAPITRE 3 est dédié dans son ensemble à la détection de changement ainsi qu'à certains des concepts qui sont reliés à la complexité d'utilisation de cette famille de techniques de traitement. Dans le CHAPITRE 4, nous présenterons des constations qui suivent l'intervention de la *Charte internationale : Espace et catastrophes majeures* qui a suivi le

tremblement de terre d'Haïti de 2010. Au CHAPITRE 5, nous présenterons, suite à une récapitulation des principaux concepts présentés dans les chapitres précédents, certains des éléments conceptuels et techniques que nous avons identifiés comme étant propices à permettre d'accroître le potentiel d'utilisation de la détection de changement sous la contrainte de l'urgence qui est inhérente à la gestion et à la planification des efforts de secours suite à une catastrophe majeure.

Nous présenterons aussi, dans le CHAPITRE 5, certains outils et logiciels qu'il pourrait être intéressant d'explorer pour mettre en œuvre certains des concepts présentés dans ce document. Nous ne prenons pas position ici en ce qui concerne les moyens qui seraient employés, si les concepts présentés dans ce document venaient à être mis en œuvre, nous incluons plutôt ces exemples pour expliciter ce qui selon nous permettrait de développer la structure de traitement qui est requise pour utiliser la détection de changement efficacement dans un contexte de gestion de catastrophe.

Bien d'autres options s'offrent à nous pour réaliser le traitement efficace d'images satellitaires et pour nous permettre d'utiliser les concepts reliés à la détection de changement. L'essence de ce document n'est pas de proposer une démarche ou une orientation de développement, mais plutôt de mettre de l'avant les concepts et les contraintes avec lesquelles nous devons travailler lorsque nous voulons utiliser les techniques et algorithmes de détection de changement pour créer des produits image ou cartographique pertinents et propices à permettre de mieux gérer les efforts de secours qui sont déployés suite à une catastrophe majeure.

Comme la nature de ce document est plus exploratoire, nous n'avons pas tenu compte des contraintes d'ordre politique ou économique qui peuvent être invoquées par une analyse de faisabilité plus pointue. Nous ne considérons ici que l'analyse du contexte qui permettrait de faciliter l'utilisation des concepts reliés à la détection de changement ainsi que la structure de développement qui serait propice à simplifier le développement et la mise en œuvre d'outils qui permettront d'arriver à maximiser l'utilisation des techniques et concepts reliés à la

détection de changement en soi. Par contre, l'utilisation des techniques de traitement reliées à la télédétection ainsi que l'analyse de leurs particularités et fonctionnalités individuelles reliées à des situations de gestion de catastrophe spécifiques est une chose distincte qu'il n'est pas nécessaire de traiter simultanément pour arriver à identifier les obstacles techniques que nous soulignerons dans ce document.

CHAPITRE 1

LES IMAGES SATELLITAIRES ET LA GESTION DE CATASTROPHE

Nous vivons dans un monde qui est en constante évolution. Qu'il s'agisse de changements qui proviennent de nos activités, de l'évolution naturelle de la planète et de ses écosystèmes ou encore d'événements soudains comme des catastrophes naturelles ou résultant de nos entreprises, nous utilisons des images satellitaires et/ou aéroportées pour nous permettre d'évaluer et d'analyser le déroulement et l'ampleur de ce type de changement.

L'augmentation du nombre de catastrophes majeures ainsi que leur ampleur nous force maintenant à développer des techniques de gestion des efforts de secours plus performantes et rapides que de par le passé. L'apport de la télédétection dans ce contexte est de fournir des informations pertinentes sur les événements au sol le plus rapidement possible pour nous permettre de planifier les efforts de secours le plus efficacement en ayant connaissance des conditions au sol. Idéalement nous obtenons ces informations avant d'arriver sur le site de la catastrophe pour nous permettre de planifier le déploiement des ressources de manière à rejoindre la population locale rapidement et subvenir à leurs besoins au moment opportun.

Pour nous permettre de mener ces analyses, nous avons à notre disposition de plus en plus de sources de données qui sont de plus en plus complexes et détaillées. Ceci est intimement lié aux développements technologiques en matière d'imagerie satellitaire. Ces images sont les sources d'information les plus utilisées pour effectuer l'analyse de la variation de l'utilisation et de l'occupation de la surface terrestre. Il s'agit, en soi, d'une partie importante de ce que la discipline de la télédétection englobe, soit la détection à distance, sans contact, que nous utilisons pour effectuer l'analyse de notre planète et de son atmosphère.

Tout d'abord, il y a un nombre imposant d'applications et de domaines de recherches qui sont directement liés à ce type d'analyses. L'article de (Radke et al., 2005) donne une bonne vue d'ensemble de ce que ces analyses sont et de ce qu'elles permettent de quantifier à l'aide

d'images satellitaires. Qu'il s'agisse du suivi de l'évolution d'un écosystème, qui est bien détaillé dans la revue de l'état de l'art de (Coppin et al., 2004), de l'étalement urbain, de la désertification ou encore de l'agriculture de précision, nous utilisons de plus en plus d'images satellitaires, ou aéroportées, pour effectuer l'analyse des changements affectant notre environnement.

Comme chacune de ces représentations n'utilise pas les mêmes variables pour encoder ce que la surface sondée contient, nous avons forcément à utiliser des méthodes de transcodage et d'interprétation qui nous permettent de mettre le contenu des images en relation. C'est pour cette raison qu'il est souvent recommandé d'utiliser des images provenant d'un même capteur pour éliminer la tâche nécessaire de transcription des données telles que mentionnées dans l'article de (Lu et al., 2004a) traitant de la détection de changement.

Toutefois, même sans cette contrainte reliée aux capteurs, il y a une foule de facteurs qui peuvent introduire des différences considérables entre des images provenant d'un même capteur telles que les variations d'angle de visée, de conditions climatiques, d'ensoleillement ou de l'impact de variations saisonnières, ce qui est souligné par (Coppin et al., 2004) comme étant un des éléments inévitables avec lequel il faut travailler lorsque nous nous intéressons au suivi et à l'analyse de l'évolution d'écosystèmes.

Nous comprenons qu'il ne s'agit pas d'un problème simple à résoudre et qu'il comporte de nombreux volets différents pour chaque combinaison d'images que nous pouvons avoir à traiter. De nombreux travaux de recherches se penchent sur différents aspects de cette problématique à l'heure actuelle. Pour plus de détails sur ces travaux de recherche, le lecteur peut consulter les documents suivants : (Coppin et al., 2004), (Lu et al., 2004a) et (Radke et al., 2005), qui sont des revues de littérature qui traitent de la détection de changement, dans un contexte de télédétection, qui font ressortir différents aspects de ce problème.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons plus particulièrement à un contexte spécifique de l'analyse de changement, celui de la gestion de catastrophe. Dans ce contexte, nous devons

composer avec une contrainte supplémentaire, non négligeable, celle de l'urgence temporelle de l'analyse et de la production de cartes thématiques des changements détectés entre les images utilisées comme sources.

Pour commencer, nous n'avons qu'à penser aux tremblements de terre qui ont secoué Haïti en 2010 et plus récemment le Japon le 11 mars 2011. Lors d'un tel contexte d'urgence, relié à la santé et la sécurité de nos semblables, il est indispensable de pouvoir utiliser toutes les sources de données disponibles, et ce, le plus rapidement possible, pour permettre de créer des cartes géographiques thématiques qui pourront être utilisées afin d'aider à la planification et à la gestion des efforts de secours.

Plusieurs éléments rendent l'analyse d'images satellitaires compliquée dans ce contexte spécifique. Le premier est évidemment qu'il n'y a pas moyen de prévoir l'événement avant qu'il ne se produise. Ceci implique que la ou les images de référence, celles antérieures à l'événement, qui seront utilisées pour effectuer l'analyse de changement, doivent être traitées le plus rapidement possible si cela n'a pas déjà été fait. Idéalement il faudrait que cette étape du traitement puisse se faire entièrement pendant l'attente reliée au délai d'acquisition des premières images de la zone sinistrée après l'événement si des images déjà traitées n'existent pas ou ne sont pas disponibles pour diverses raisons.

Le deuxième problème qui fait surface est relié aux images de la zone sinistrée qui deviendront disponibles pour effectuer l'analyse des changements étant survenus. Bien que nous connaissions la position de tous les satellites qui peuvent être utilisés pour « photographier » une zone précise, nous ne pouvons cependant garantir la comparabilité des images acquises avec celles de références même si elles proviennent du même capteur. Ceci peut provenir, entre autres, de variations des angles de visée du satellite qui peuvent être nécessaires pour permettre d'obtenir les images de la zone d'intérêt. Ces différences d'angles de visée provoquent des déformations d'ordre géométriques, du point de vue des objets présents dans la scène et de leurs positionnements relatifs les uns par rapport aux autres, qui peuvent rendre une comparaison directe des images difficile. Cependant, il est impératif de

pouvoir utiliser toutes les images qui seront à notre disposition pour être en mesure de suivre le développement de la situation autant au moment d'apporter des secours à la population que durant la phase de reconstruction qui suivra le retour à la normale, si nous pouvons parler d'une situation normale dans ce contexte.

Il y a un nombre imposant de techniques qui peuvent être considérées pour effectuer la détection de changement entre deux ou plusieurs images d'une même zone géographique. Ces techniques sont par contre toutes soumises à des contraintes techniques qui les rendent plus ou moins utilisables en fonction de la contrainte d'urgence que nous avons mentionnée. Nous reviendrons sur ces techniques au CHAPITRE 3 qui est consacré à ce thème.

Sans nous soucier de la mécanique de résolution en soi, nous pouvons tout de même énoncer les éléments suivants qui seront théoriquement toujours présents dans ce contexte de traitement d'image et de création de cartes thématiques relié à des catastrophes majeures :

- Des photo-interprètes d'expérience et/ou des experts en télédétection seront responsables de mener le traitement des images, de réaliser les analyses contextuelles pertinentes et de classifier les changements identifiés en fonction du type d'événement et des produits cartographiques requis,
- Ces photo-interprètes et/ou les experts en télédétection sont des spécialistes de ce type d'analyse et sont en mesure de choisir les combinaisons de variables et de techniques d'analyse et de classification pertinentes en fonction des images disponibles et des catégories d'occupation du territoire d'intérêt,
- Les étiquettes conceptuelles, qui seront associées aux classes d'occupation du territoire que les photo-interprètes utiliseront pour décrire le contenu des images obtenues par les étapes de classification et/ou de segmentation, proviendront de systèmes de classification couramment utilisés dans ce milieu : urbain, rural, agricole, forestier, etc.,

- Il n'y aura que très peu de temps, typiquement nous parlons d'environ une, ou de quelques, douzaine d'heures entre l'événement et l'acquisition des premières images représentant la situation après une catastrophe,
- Il n'y a aucune garantie que les images représentant une région avant et après un événement de ce type soient directement comparables, que ce soit à cause des types d'images, de leurs résolutions ou de variations des angles de visée, de condition climatique ou temporelle.

D'autres éléments fonctionnels sont incontournables lorsque nous parlons de classification de l'usage du territoire et de détection de changement reposant sur l'utilisation d'images satellitaires. Il s'agit de la chaîne de traitement typique reliée à ce type d'images. Les étapes suivantes sont incontournables lorsque l'on utilise des images satellitaires dans ce contexte tel que souligné dans l'article de (Lu et al., 2004a). La séquence de traitement typique est composée des étapes suivantes:

- Les images brutes doivent subir des transformations d'ordre géométriques pour corriger les défauts de représentation reliés aux effets de perspective et de distorsion géométrique, nous parlons de l'orthorectification de l'image, cette étape est presque incontournable,
- La correspondance géographique de la zone imagée doit être établie et associée à l'image, nous parlons du géoréférencement de l'image,
- Les images doivent être calibrées pour garantir la correspondance radiométrique des variables,
- Des corrections radiométriques supplémentaires sont souvent nécessaires pour permettre de compenser les variations d'illumination pour que les jeux de données utilisées puissent représenter les mêmes phénomènes d'une manière aussi similaire que possible,
- Pour que plusieurs des techniques de détection de changement couramment utilisées à l'heure actuelle puissent être mises en œuvre, il est impératif que les images soient parfaitement recalées, ou presque, comme il est souligné dans (Dai et Khorram,

1998b) il est donc souvent nécessaire de réaliser cette étape bien qu'elle ne soit pas toujours essentielle.

À la suite de ces traitements initiaux, nous pouvons aussi avoir à effectuer des filtrages supplémentaires pour éliminer des détails inutiles, comme des petits objets, qui ne sont en soi présents dans ces images que de manière aléatoire. Nous pouvons penser ici à des éléments comme des piétons, des voitures ou d'autres objets de cette taille qui sont visibles dans des images ayant une résolution métrique ou submétrique, mais qui n'ont, en soi, aucune signification du point de vue de la classification et de l'analyse de l'utilisation du territoire. Ce filtrage est relié à l'échelle de représentation qui est la plus propice pour extraire certains types d'informations.

D'autres traitements peuvent aussi être nécessaires, comme des changements de résolution par exemple, pour remettre les images dans un même référentiel dimensionnel. Par contre, plus nous effectuons de transformations, soit d'échelle ou suite à des filtrages, moins il est probable que les images ne subissent pas de distorsion, que nous qualifions habituellement d'artéfacts, ou de dissipation d'information qui peuvent provoquer plus de fausses détections de changement qu'il n'y en aurait eu sans ces traitements.

Dans le reste de ce chapitre, nous donnerons le détail des éléments les plus importants de chacun des types d'images ainsi que de certains détails concernant les différentes résolutions qu'ont ces images.

1.1 Les types d'images et de données utilisées en télédétection

Comme nous l'avons mentionné précédemment, il y a un grand nombre de types et de formats d'images qui sont couramment utilisées en télédétection. Cette variété est riche en potentiel d'analyse, mais elle implique aussi une grande complexité du point de vue du choix des variables et de traitements judicieux ainsi que de la compréhension de ce que peut représenter chacune de ces sources d'information. Il est difficile de bien cerner ce qui est

probant à utiliser pour la classification et l'analyse de ces images, car leurs différences intrinsèques, de représentation et d'échelle de résolution, font que ce qui est une combinaison de variables, de descripteurs et de méthodes de classification efficace pour un type d'image n'est pas forcément probant dans d'autres contextes d'analyse.

Toutefois, toutes les images qui sont utilisées en télédétection proviennent de deux familles de capteurs. Nous retrouvons les imageurs passifs d'une part et actifs d'une autre (Nicolas, 2008-2009) qui sonde les cibles de différentes manières. Les cibles en télédétection sont habituellement la surface terrestre.

Les capteurs dits passifs enregistrent le rayonnement incident réfléchi ou émanant des cibles, d'où le nom passif. La représentation la plus simple, mais non exhaustive, de ce que ce type d'imageur encode est le spectre électromagnétique visible émis par le Soleil. D'autres portions du spectre électromagnétique peuvent être enregistrées par certains de ces capteurs, tels les rayonnements infrarouges ou, plus exceptionnellement, ultra-violets.

Tableau 1.1 Longueurs d'onde usuelles utilisées par les imageurs passifs

Acronyme	Nom	Longueur d'onde μm
VIS ou PAN	Spectre visible	0,4 à 0,8
PIR	Proche infrarouge	0,8 à 1,5
MIR	Moyen infrarouge	1,5 à 5
IRT	Infrarouge thermique	8 à 15

Les capteurs actifs quant à eux produisent le rayonnement qu'ils émettent vers la cible puis ils enregistrent le signal qui est rétrodiffusé par la cible pour former l'image finale. Nous parlons ici principalement d'imageurs RADAR à synthèse d'ouverture (RSO) ou autre, mais plusieurs types de sources peuvent être utilisés comme le LASER dans le cas du LIDAR par exemple.

Ces deux types d'imageurs ont plusieurs configurations de capteurs permettant d'obtenir de nombreuses combinaisons de représentation. Certains permettent l'acquisition d'images panchromatiques et/ou multispectrales ou hyperspectrales simultanément. D'autres satellites ont des configurations de capteurs permettant d'obtenir des images de point de vue différent, habituellement il s'agit d'une image prise avec un angle de visée orienté vers l'avant et une autre avec un angle de visée vers l'arrière. Cette configuration permet donc d'avoir accès à une paire d'images qui forment une représentation quasi stéréoscopique, ce qui nous permet d'évaluer plus facilement le relief de la zone ciblée en utilisant les deux images.

Cette particularité de configuration s'applique aussi aux imageurs RADAR. Ces derniers ont aussi une variété de modes d'acquisition qui leur sont propres. Nous reviendrons sur cet aspect à la section 1.1.4 traitant de l'imagerie RADAR.

Une différence importante entre les capteurs passifs et actifs est que les capteurs passifs ne peuvent acquérir d'images sans que le rayonnement incident soit présent. Nous parlons en général du Soleil dans le cas des images optiques. Donc, il est impossible d'utiliser ces capteurs la nuit, à part dans certains contextes spécifiques où nous nous intéressons au rayonnement infrarouge thermique ou à la distribution des sources lumineuses au sol. De plus, ils sont très sensibles aux conditions atmosphériques. S'il y a des nuages dans le champ de visée, la portion du sol sous ces derniers ne sera pas visible sur l'image acquise ou du moins sera déformée du point de vue radiométrique. La présence de nuées, de brume au sol ou de particules dans l'atmosphère a aussi un impact similaire sur la fidélité de la représentation obtenue. Ceci vient du fait que les propriétés de transmittance de l'air en seront affectées et conséquemment le signal capté par l'imageur sera filtré « accidentellement ». Ceci implique que les valeurs d'intensité assignées à chaque pixel pour un même phénomène subiront une distorsion qu'il faudra corriger pour que la correspondance entre les variables de deux images soit valide.

Les capteurs actifs ne sont pas affectés par les problèmes de source, comme la lumière incidente pour les imageurs optiques, étant donné qu'ils sont leurs propres sources

« d'illumination ». Par contre, en fonction de la longueur d'onde utilisée, il y a une variété de phénomènes atmosphériques qui peuvent modifier la réponse qu'obtiendra le capteur. Ici aussi, il peut arriver que le signal capté subisse une distorsion qui vienne affecter la comparabilité de cette image avec d'autres images provenant du même capteur pour lesquelles les facteurs ayant provoqué la distorsion ne sont pas présents.

Il est donc important de tenir compte de ces particularités lorsque nous faisons un choix d'images à utiliser en fonction d'une application donnée. Nous concevons assez vite que dans un cas de catastrophe naturelle, comme une inondation, qui est une conséquence d'une tempête par exemple, il ne sera pas toujours possible d'utiliser un format d'image spécifique. Dans le cas d'une tempête importante, il est fort probable que le ciel demeure couvert pendant un certain temps après l'événement et donc il ne sera probablement pas possible d'obtenir d'images optiques de la zone affectée immédiatement. Par contre, dans ce contexte, si nous utilisons un imageur RADAR avec une longueur d'onde appropriée nous pourrions obtenir une image à travers les nuages. Nous mentionnons la longueur d'onde car celles qui sont utilisées par les imageurs RADAR ne sont pas nécessairement toutes propices à sonder la surface terrestre sous certaines conditions atmosphériques.

Dans les sections qui suivent, nous donnerons plus de détails concernant les différents types d'images qui proviennent de ces capteurs.

1.1.1 Les images panchromatiques

Les images panchromatiques comme celle de la Figure 1.1 sont composées de tons de gris et représentent la totalité du spectre lumineux visible comprise entre deux bornes et proviennent d'imageurs passifs. Les bornes varient légèrement d'un capteur à l'autre. En général, les satellites qui permettent l'acquisition d'images de ce type prennent aussi des images multispectrales des mêmes cibles simultanément, mais à une résolution moindre.



Figure 1.1 Image panchromatique de la ville de Boumerdes³

Comme ces images n'ont qu'une couche de variables, les techniques d'analyse et de classification de leur contenu couramment utilisées reposent souvent, mais pas uniquement, sur l'utilisation de mesures de texture conjointement aux valeurs des pixels. Ceci est bien sûr réalisé en vue d'étoffer la description des phénomènes représentés et d'augmenter la séparabilité des pixels représentant différentes informations pour permettre d'effectuer leur classification en classes d'occupation de territoire qui soient conceptuellement homogènes.

Les résolutions auxquelles nous pouvons obtenir des images panchromatiques vont de moins d'un mètre pour les dernières générations de capteur à environ un kilomètre pour les plus anciennes. Par exemple, on peut obtenir des images panchromatiques avec une résolution de 0,61 m avec le satellite QUICKBIRD ou de 10 m pour les satellites SPOT 1-4. Ces satellites n'ont toutefois pas exactement la même plage de sensibilité radiométrique.

³ Image panchromatique de la ville de Boumerdes en Algérie prise le 25 mai 2003 avec la satellite Quickbird, CNES.

1.1.2 Les images multispectrales

Cette catégorie d'images comporte deux principaux types de représentation de l'information. La première est celle que nous connaissons tous, les images de type RVB, que l'on qualifie de multispectrales comme celle de la Figure 1.2 qui a été prise après le tremblement de terre d'Haïti de 2010, bien que la composante bleue ne soit pas exactement la même qu'en photographie conventionnelle. Les composantes spectrales de ces images ne sont pas nécessairement le rouge, le vert et le bleu, mais il s'agit d'images qui comportent plusieurs bandes, pas nécessairement seulement trois, qui représentent chacune une portion spécifique du spectre lumineux. Pour les visualiser nous les affichons en RVB en sachant bien que les couleurs qui sont représentées ne sont pas forcément réalistes. Le deuxième type d'image de ce groupe est ce que nous nommons des images hyperspectrales. La différence entre ces deux types de représentation est liée à la largeur et au nombre de bandes du spectre lumineux qui sont utilisées par les capteurs pour représenter une scène.



Figure 1.2 Image multispectrale d'Haïti après le tremblement de terre de 2010⁴

⁴ Image multispectrale de la région de Port au Prince à Haïti prise le 13 janvier 2010 avec la satellite GeoEye.

Le spectre lumineux visible est constitué de rayonnement allant de 0,4 à 0,8 μm . Ce rayonnement est divisé en trois plages de valeurs continues pour ce qui est des images RVB, une pour chaque couleur. Les imageurs hyperspectraux, quant à eux, utilisent une quantité beaucoup plus considérable de divisions du spectre lumineux.

Une image hyper spectrale peut couvrir la même plage de fréquences que celle qui viennent d'être soulignées mais dans ce cas spécifique le nombre de bandes qui sont utilisées est considérablement plus élevé. La portion rouge du spectre lumineux visible, allant de 0,62 μm à 0,8 μm , peut être divisée en plusieurs dizaines de couches pour créer une image hyperspectrale tandis que cette même plage de longueurs d'onde ne forme qu'une seule bande dans une image multispectrale.

Les bandes résultantes sont par contre beaucoup plus étroites. Ceci entraîne nécessairement une représentation plus lourde de la scène qui, par contre, permet, dans bien des cas, d'isoler des phénomènes d'intérêt plus facilement que si nous utilisions une représentation multispectrale. Il ne faut tout de même pas perdre de vue que l'identification de la bande appropriée à utiliser pour identifier un phénomène spécifique est souvent une tâche complexe.

Les satellites qui offrent la possibilité d'acquérir des images multispectrales et panchromatiques simultanément ne peuvent pas les représenter à la même résolution. C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développées les images avec rehaussement par fusion d'images panchromatiques et multispectrales, *pansharpening* en anglais.

1.1.3 Les images rehaussées par fusion

Les images qui font partie de cette catégorie sont des représentations composites créées en fusionnant l'information géométrique d'une image panchromatique qui est utilisée pour rehausser la résolution d'une image multispectrale prise simultanément à une résolution moindre. Un exemple de ce type de transformation est présenté à la Figure 1.3. De

nombreuses techniques existent pour effectuer ce type de transformation comme nous pouvons le constater en consultant l'article (Thomas et al., 2008) qui résume les grandes lignes de cette famille de transformation ou encore les résultats de la compétition internationale de fusion d'images satellitaires présentés dans (Alparone et al., 2007) qui présente quelques méthodes de fusion ainsi qu'une évaluation de leurs performances individuelles.

Il faut retenir que la représentation créée par cette combinaison de données, bien que supérieure du point de vue de la résolution de la représentation couleur, est tout de même une transformation qui peut, dans certains cas, induire une certaine marge de distorsion de l'information dans la représentation finale fusionnée. Cette distorsion peut affecter les résultats d'opérations subséquentes comme la détection de changement, par exemple, ce qui a été évalué par (Bovolo et al., 2010). Ils ont constaté par leurs analyses que, bien que la qualité de la fusion obtenue soit très élevée, il n'est pas garanti que ceci améliore les résultats de détection de changement reposant sur l'analyse de ces représentations rehaussées.

Les différences de contenu entre les images panchromatiques, multispectrales et rehaussées sont dues à la méthode de transcription et d'approximation de l'information couleur à compléter qui est calculée avec des estimations basées sur la variation des tons de gris de l'image panchromatique tel que souligné dans (Thomas et al., 2008). De plus, il n'est pas garanti qu'un modèle de transcription qui est développé pour une combinaison d'images satellitaires spécifique pourra être appliqué à d'autres combinaisons d'images de la même manière et avec la même efficacité. Nous retrouvons dans (Ranchin et al., 2003) des spécifications techniques portant sur l'évaluation de la performance des algorithmes utilisés pour effectuer cette fusion ainsi que sur la qualité de l'image fusionnée résultante.

Sommairement, nous pouvons dire que, bien que dans plusieurs situations cette combinaison d'information permet d'obtenir une représentation propice à une utilisation dans un contexte de télédétection, il n'y a, pour le moment, aucune méthode permettant une fusion parfaite de ces données comme le démontre les résultats présentés dans (Massip, Blanc et Wald, 2011).

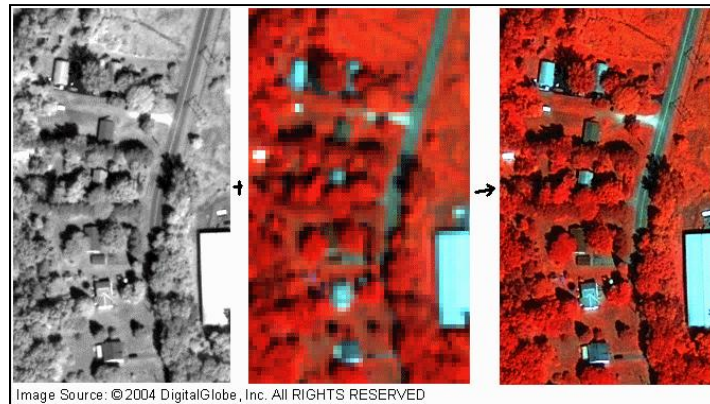


Figure 1.3 Images panchromatique, multispectrale et rehaussée⁵

1.1.4 Les images RADAR

Les images RADAR constituent une autre source de données qui sont d'usage courant en télédétection. Le concept est essentiellement le même que pour toutes les applications utilisant le RADAR. Une source émet un train d'impulsions continu ayant une longueur d'onde définie vers une cible. En fonction du type de matériel et de la géométrie de la surface de la cible, une certaine portion du signal incident sera retournée vers la source par rétrodiffusion. Ce signal est capté et des valeurs sont calculées à partir de ce dernier qui permettent de caractériser ce qui a été rencontré en chemin.

Les variables qui sont obtenues de ces capteurs expriment : la force du signal retourné, la phase de ce dernier et le temps de parcours aller-retour entre l'émission et la réception du train d'impulsions. De ces informations on peut déduire le type de surface réflective rencontrée, la géométrie de cette cible (qui peut être caractérisée dans certaines situations par les rebondissements qui provoquent des changements de phase du signal), ainsi que la distance séparant la cible de la source. Cette distance est mesurée à l'aide du temps de retour du signal en fonction de la vitesse de propagation de l'onde dans un milieu fluide. Nous parlons bien sûr de l'atmosphère dans cette situation, mais la technique d'estimation de la

⁵ Images Quickbird panchromatique et multispectrale ainsi que l'image rehaussée par fusion des deux source, obtenu de <http://www.geosage.com/highview/gallery2.html> le 15 juin 2013.

distance reliée à ce type de signal est analogue à celle de l'écholocalisation qu'utilisent les chauves-souris et les cétacés et qui est la base conceptuelle du SONAR⁶.

Les images RADAR ont un détail particulier qui les différencie des images optiques en ce qui concerne leur représentation visuelle résultante. Tandis que les images optiques sont essentiellement lisses, du point de vue de la transition entre les valeurs des variables au niveau du voisinage d'un pixel, les images RADAR sont affectées par un chatoiemment qui est inhérent à la technique de transmission du signal et à sa rétrodiffusion. Nous pouvons constater ce phénomène sur la Figure 1.4 ainsi que la différence entre les images RADAR et optique en comparant cette image à celle d'Haïti de la Figure 1.2.

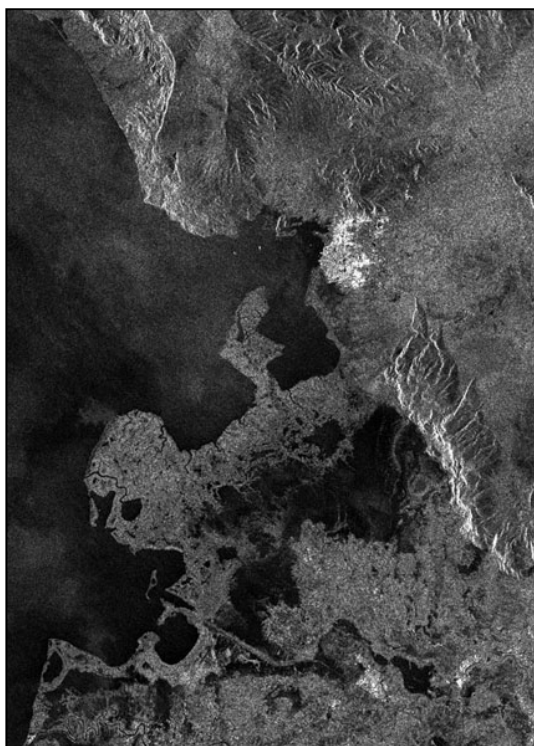


Figure 1.4 Image RADAR à synthèse d'ouverture de la région Gonaïves d'Haïti⁷

⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/Sonar> consulté le 4 octobre 2012.

⁷ Image Radarsat-1 prise le 13 juin 1999 en mode standard-5 obtenue de <http://www.asc-csa.gc.ca/fra/satellites/radarsat1/image-vedette/vedette-amerique-du-nord.asp> le 15 juin 2013.

Plusieurs différentes longueurs d'onde sont utilisées par ce type d'imageur. Celles qui sont le plus utilisées vont de 1 à 10 GHz. Les longueurs d'onde utilisées n'ont cependant pas toutes la même utilité, car, en fonction de différentes conditions d'utilisation, il peut arriver que ce qui est ciblé ne puisse être atteint par l'onde émise. Ceci provient du fait que plus la longueur d'onde utilisée est courte, moins elle aura la capacité de pénétrer le sol ou le feuillage d'arbres par exemple (Nicolas, 2008-2009). Le Tableau 1.2 donne le détail des longueurs d'onde usuelles qui sont utilisées en imagerie RADAR.

Tableau 1.2 Longueurs d'onde usuelles en imagerie RADAR

Bande	Fréquence	Longueur d'onde en cm
P	0,225 à 0,390 GHz	133 à 76,9
L	0,390 à 1,55 GHz	76,9 à 19,3
S	1,55 à 4,20 GHz	19,3 à 7,1
C	4,20 à 5,75 GHz	7,1 à 5,2
X	5,75 à 10,90 GHz	5,2 à 2,7
K _u	10,90 à 22,0 GHz	2,7 à 1,36
K _a	22,0 à 36,0 GHz	1,36 à 0,83

Les imageurs RADAR offrent, tout comme les imageurs optiques, de nombreuses résolutions ainsi que différents modes d'acquisitions. Nous pouvons aussi utiliser différents modes de polarisation du signal pour faire ressortir différents types d'information. Les types de polarisations utilisées sont : horizontale/horizontale (HH), verticale/verticale (VV), horizontale/verticale (HV) et verticale/horizontale (VH). Il est aussi possible dans certains cas d'utiliser une polarisation circulaire. Ces modes d'acquisition permettent entre autres d'obtenir de nombreuses représentations d'une même cible en jouant avec la configuration du signal et de son traitement.

La Figure 1.5 est une image de la ville de San Francisco composée de trois images ayant des polarisations différentes, des bandes C et L, qui ont été prises de la navette spatiale

Endeavour à l'aide d'un imageur RADAR à synthèse d'ouverture. La composante rouge de cette image est l'image RADAR en polarisation HH de la bande L, la composante verte est de polarisation HV de la même bande et la composante bleue provient de la polarisation HV de la bande C. Nous remarquons que chacune de ces combinaisons de bande et de mode de polarisation permet de capturer différents aspects d'une même scène tout comme les différentes portions du spectre lumineux visible dans le cas des images multispectrales.

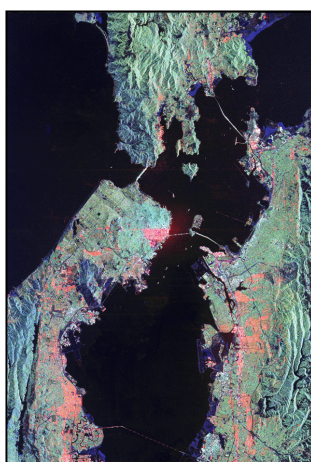


Figure 1.5 Image composite RADAR de la ville de San Francisco

Les imageurs RADAR ont, tout comme les imageurs passifs, une grande diversité de modes d'acquisition, de configuration de capteur et, comme nous venons de le souligner, de polarisations différentes. Comme les satellites optiques, certains satellites imageurs RADAR sont conçus de manière à permettre l'acquisition simultanée d'images de points de vue légèrement différents. Comme c'est le cas pour les paires d'images optiques, ces images peuvent être utilisées pour créer des modèles d'élévation de terrain et/ou pour aider à la correction de déformations géométriques provenant des effets de perspectives reliées aux angles de visée ainsi qu'aux déformations locales de la croûte terrestre. Alternativement, deux satellites complémentaires se suivant de près sur la même trajectoire orbitale sont utilisés pour effectuer la saisie des images. Cette configuration est ce que réalise le tandem de satellites TanDEM-X qui est en orbite à l'heure actuelle et qui relève de l'agence spatiale allemande, le DLR.

Ces tandems d'images RADAR peuvent aussi être utilisés pour créer des modèles interférométriques qui permettent d'obtenir des niveaux de précision dimensionnelle considérablement plus élevés que ce qui est possible avec d'autres types d'images.

En fonction des différentes configurations des modes d'acquisition disponibles avec certains de ces satellites, il est possible de créer des images monovues, qui sont un genre de cliché instantané d'une zone circonscrite par le champ de vision de l'appareil, et multi-vues, qui sont réalisées en effectuant le calcul de la moyenne de la portion intensité du signal de plusieurs prises de vues séquentielles (Nicolas 2009). Ces images multivues ont une résolution moins grande que les images monovues, mais l'utilisation de la moyenne de plusieurs images permet de diluer l'effet de chatoiement, mentionné plus tôt, et de rendre le traitement de ces images plus simple.

Les satellites imageurs RADAR qui sont en fonction à l'heure actuelle offrent différentes combinaisons des éléments que nous venons d'énoncer.

1.1.5 Les différentes résolutions spatiales des images satellitaires

Les images satellitaires qui sont utilisées en télédétection ont de nombreux niveaux de résolution. La résolution de ces images va de quelques kilomètres à moins d'un mètre par pixel. Nous les regroupons en classes d'images ayant des résolutions similaires. Par exemple, les derniers développements technologiques dans le domaine des satellites imageurs optiques ont donné naissance à la classe d'images à Très Haute Résolution, THR, qui ont une résolution métrique ou moindre.

Ce que ceci signifie est que la surface au sol, correspondant à un pixel, peut varier de manière significative en fonction de la configuration matérielle du capteur, de l'altitude d'orbite et de l'angle de visée du satellite ou du mode d'acquisition utilisé qui sont les paramètres principaux qui affectent la résolution de l'image. Par contre, la valeur assignée à chaque pixel est la portion prédominante de l'onde incidente qui est réfléchiée vers le capteur par la surface

au sol correspondant à un pixel du capteur. Donc, plus le pixel correspond à une surface au sol importante plus la valeur du pixel représente une moyenne des phénomènes qui sont présents au sol pour cette même surface. Conséquemment, plus la résolution croît, plus ce que les pixels représentent est limité et essentiellement devient de plus en plus descriptif de phénomènes quasi uniques. Des pixels voisins peuvent toujours être membre d'un même objet collectif, mais il y a de moins en moins de corrélation statistique entre des pixels voisins de part la variabilité intra classe croissante.

Nous comprenons de ceci que plus la résolution augmente plus la différenciation des phénomènes perceptibles augmente aussi. Mais, en même temps, l'homogénéité de l'image, elle, tend à diminuer. C'est en partie pour cette raison qu'il devient de plus en plus difficile de traiter les images THR car il y a une prolifération d'objets qui deviennent discernables dans ces images qui ne sont pas utiles en fonction du contexte d'analyse relié à la télédétection. De plus, avec des images à résolution moindre, il y a une variation plus graduelle des valeurs des pixels qui est modélisable d'un point de vue statistique. Ceci n'est plus le cas avec les images THR car les petits objets qui sont omniprésents dans ces images sont ponctuels et ne suivent pas de modèles statistiques prévisibles.

Chacune des classes de résolutions d'images a son utilité et sa pertinence en fonction des différents scénarios d'analyse reliés au domaine de la télédétection. Si nous voulons suivre des phénomènes à l'échelle planétaire, comme le retrait des glaciers, nous n'utiliserons pas les mêmes types d'images que si nous volons mesurer l'étalement urbain ou encore la propagation d'une inondation.

Cette constatation a donné naissance à une branche de recherche qui se penche sur la question de l'analyse d'images à différents niveaux de résolution. Nous parlons dans cette situation d'analyse multirésolution. L'idée directrice de ces méthodes d'analyse est que dans une image il y a certains niveaux de résolution qui sont plus propices que d'autres pour permettre de détecter certains phénomènes. De nombreux travaux de recherche provenant de

tous les domaines d'application du traitement d'image traitent des différents aspects de ce concept.

Dans le contexte de la télédétection ce concept est mis à profit pour permettre d'établir l'échelle caractéristique à associer à différents types d'objet par (Luo et al., 2007) parmi d'autres. Dans cet article ils arrivent à identifier et à classer les éléments urbains présents dans deux images SPOT, ayant une résolution de 5 m, et dans une image Quickbird, ayant une résolution de 0,61 m. Le traitement qu'ils ont développé permet de codifier les objets présents dans une scène en fonction de leur taille respective. Ces valeurs découlent de l'analyse de l'échelle à laquelle ils sont les plus contrastés par rapport à leur entourage. Cette méthode d'analyse permet donc non seulement d'identifier les échelles de représentation pertinentes pour permettre d'extraire différents types d'objets d'intérêt, ce qui en soi est un outil précieux dans ce contexte d'analyse, mais aussi de fournir une autre variable de traitement qui peut être utilisée pour la classification du contenu d'une image lors de paliers de traitement ultérieurs.

1.1.6 Les données provenant de système d'information géographique, SIG

Il est possible, dans certaines situations, qu'il n'y ait pas d'image satellitaire, optique ou RADAR, qui soit disponible, pour une région donnée, représentant la situation avant une catastrophe. Il y a peu de chance que ceci se produise, mais il faut tout de même souligner que dans cette situation il faudra trouver d'autres sources d'information qui permettront d'effectuer une analyse, aussi sommaire soit-elle, de l'état initial d'une zone géographique affectée par une catastrophe majeure.

Nous pourrions possiblement trouver des cartes géographiques ou des données provenant de logiciels de Système d'information géographique (SIG), qui permettraient au moins d'établir une classification de l'usage du territoire qui pourrait être utilisée comme référence géographique de base pour une analyse de changement.

Les logiciels SIG permettent de créer des cartes thématiques en fonction des différentes données qui sont accessibles dans les bases de données qu'utilisent ces logiciels pour stocker l'information concernant différentes régions de notre planète. Nous pourrions donc créer des cartes d'utilisation du territoire pertinentes qui pourraient être utilisées comme référence de base ou comme sources d'informations supplémentaires utiles à l'aide de ces outils.

Ces logiciels nous permettent d'avoir accès à d'autres types d'informations, qui ne sont pas disponibles lorsque nous n'utilisons que des images satellitaires. Entre autres, nous pourrions nous intéresser à la distribution démographique d'une région, des réseaux routiers existants, de la topographie ou encore de l'information météorologique sur les vents dominants d'une région qui pourraient provoquer des changements de direction de propagation d'incendies de forêt par exemple.

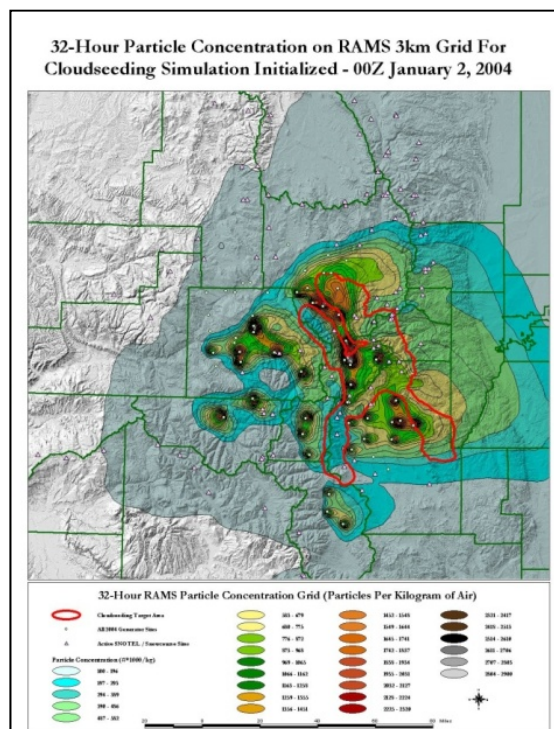


Figure 1.6 Exemple de données SIG augmentées⁸

⁸ Image obtenue de http://rams.atmos.colostate.edu/clseeding/images/gis_maps/RAMS-GIS-concen2-map.jpg consulté le 15 juin 2013.

La Figure 1.6 est un exemple de données géographiques augmentées. Nous voyons sur cette image le relief d'une section du centre des États-Unis avec les divisions politiques des états présents dans cette zone. Sur cette image apparaît aussi une échelle donnant une estimation de la densité de particules reliées à l'ensemencement de nuages ainsi que leur distribution géographique 32 heures après l'ensemencement. Cette image provient d'une simulation, mais elle représente bien le type d'informations supplémentaires que nous pouvons surimposer à des images satellitaires à l'aide de logiciels SIG ainsi que la représentation de l'information en format vectoriel qui est typique de ces sources de données.

Il faut souligner que dans un contexte de gestion de catastrophe, comme le but est de créer des cartes thématiques qui seront fort probablement des représentations augmentées de la réalité géographique, il faut prévoir qu'il soit nécessaire de les comparer à des données provenant de logiciels SIG. Il est donc nécessaire de prévoir l'utilisation de ces formats de données, matricielle et vectorielle, autant en entrée, en tant que sources d'information, que de prévoir leur écriture à la sortie du système d'analyse et de traitement comme fichiers de résultats à valeur ajoutée.

1.1.7 Les séries temporelles d'images satellitaires

Tous les types d'images qui viennent d'être mentionnés peuvent être assemblés en ce que l'on appelle des séries temporelles d'images satellitaires (STIS). Comme le nom le laisse présager, ces dernières sont un assemblage d'images prises à différents moments qui sont indexées en fonction de leur date d'acquisition. Typiquement les STIS ne sont composées que d'images au sens propre, mais le concept peut être étendu pour inclure des données provenant de logiciel SIG.

Il est assez évident que dans un contexte d'analyse de longue haleine ces séries sont une source de données idéales pour permettre le suivi et la quantification de phénomènes se déroulant lentement comme l'urbanisation par exemple. Mais dans un cas de gestion de catastrophe aussi ces données pourraient être un atout précieux. Une STIS bien étoffée

permettrait de trouver rapidement des images de références pertinentes d'une zone géographique donnée en fonction de différents critères. Comme nous l'avons souligné, il est essentiel dans bien des contextes d'analyse, reliée à la gestion de catastrophe, de pouvoir utiliser des images très récentes pour permettre de quantifier de réels changements survenus à la suite d'un événement spécifique. Nous concevons que dans ce cas l'accès à une STIS de la région nous permettrait de cibler la ou les images les plus récentes rapidement.

Cette même STIS nous permettrait aussi de tenir compte de la contrainte saisonnière que nous avons soulignée au début de ce chapitre. La STIS pourrait très bien être classée soit en ordre chronologique annuel ou encore en fonction des mois d'acquisition. Ceci nous permettrait entre autres de pouvoir modéliser les variations internes d'une saison pour établir ce qui est en moyenne normal pour une classe d'occupation du territoire pour une saison donnée, ce qui aiderait à exclure certains types de changements qui ne sont en fait que cycliques et donc peu probablement issus d'un événement catastrophique ponctuel.

Un autre avantage considérable des STIS est de permettre de créer les vecteurs de changements cycliques que nous venons de souligner. Comme dans ces séries les images sont acquises avec le mode d'acquisition standard d'un satellite donné, il va de soi que l'exercice de recalage des images est considérablement plus simple que ce à quoi nous avons à faire face dans une situation de gestion de catastrophe qui présuppose qu'il sera fort probablement nécessaire de changer les conditions d'acquisition des images. Les STIS nous donnent donc accès à une « pile » d'images recalées que l'on peut utiliser pour modéliser les tendances de changement cycliques, comme les variations saisonnières par exemple, ainsi que les tendances de variation progressives comme l'étalement urbain entre autres. À l'aide de ces modèles nous sommes en mesure d'analyser les changements en utilisant des critères de filtrage des changements détectés plus étoffés que si nous n'avons qu'une ou quelques images de référence avec lesquelles travailler et de la sorte d'exclure de considérations ultérieures des changements qui ne sont en soi pas significatifs.

De plus, comme la création de STIS est une action qui est réalisée sans contrainte temporelle critique il est donc possible de contempler l'indexation de plusieurs types et formats d'images en fonction de la possibilité de les recaler entre elles. Dans certaines situations il ne serait pas surprenant que pour certaines combinaisons d'images nous arrivions à inclure des images optiques de différents capteurs à certaines images RADAR avec une qualité de recalage suffisamment grande pour que la modélisation des tendances de changement puisse inclure différents types d'information et de nous offrir une séquence d'images de référence très flexible et pertinente pour de nombreux cas d'analyse reliée à la gestion de catastrophe.

1.2 Les points communs aux images utilisées en télédétection

Toutes ces images ont quelques points en communs qu'il faut détailler pour nous permettre d'expliquer certains des prétraitements qui sont nécessaires pour que les images satellitaires puissent être utilisées d'une manière efficace. Le point le plus important à retenir est que les effets de perspective qui sont reliés aux conditions d'acquisition, surtout aux angles de visée et au relief topographique de la zone ciblée, ont un impact considérable sur la fidélité géométrique de l'image. C'est de cette caractéristique que découle la nécessité d'effectuer l'orthorectification et le géoréférencement de ces images. Ce sont les premières étapes des traitements standards qui sont requis pour permettre d'utiliser ces sources de données efficacement dans un contexte de gestion de catastrophe et de création de produits cartographiques dérivés.

Les effets de perspectives ont tendance à fausser la position des objets présents dans l'image autant à cause de leur position dans le champ visuel que de leur hauteur relative les uns par rapport aux autres. La position dans le champ visuel de l'imageur a un impact à cause de la variation de la taille de la cellule de résolution au sol. Cette variation est de plus en plus prononcée plus nous nous éloignons du nadir. Le nadir, dans la terminologie associée à l'imagerie satellitaire, est le point au sol qui est directement sous le capteur au centre de la travée scrutée. À cet endroit le pixel et la taille de la surface correspondent à la résolution citée de l'image. Plus nous nous éloignons de ce point, plus les pixels tendent à représenter

une taille de cellule de résolution au sol pour lesquelles une ou les deux dimensions croissent. Mais, étant donné que les paramètres d'acquisition, ainsi que la configuration physique du satellite sont connus, il est possible de corriger les images pour remédier à cette déformation dimensionnelle.

Les effets de perspectives reliés à la hauteur des objets les uns par rapport aux autres et au relief topographique local sont beaucoup plus difficiles à traiter. Nous ne connaissons pas, en général, la hauteur des objets présents dans une scène à moins d'avoir accès à un modèle numérique de terrain, MNT, correspondant à la zone ciblée ou d'être en mesure de les estimer en utilisant une paire d'images stéréoscopique. Il est donc très difficile de garantir que la fonction de transformation que nous pouvons estimer pour corriger cet effet de perspective soit judicieuse en tout point de l'image.

Dans plusieurs situations, il est possible d'utiliser certains éléments qui sont visibles dans une image, comme des édifices ou des caractéristiques topographiques connues, pour lesquels nous disposons d'informations concernant leurs hauteurs respectives ainsi que des données de positionnement relatif à d'autres éléments de la scène, pour permettre d'effectuer des corrections d'ordre géométriques à l'image. Par contre, comme nous pouvons nous en douter, dans ce type de situation il persiste toujours une certaine mesure d'incertitude en ce qui concerne la qualité globale de la rectification de l'image, car la correction est calculée pour certains points précis de l'image et ne devrait pas nécessairement être utilisée pour traiter le reste de l'image.

Ces détails sont d'autant plus importants dans un contexte de gestion de catastrophe. Comme le mode d'utilisation de ces satellites est planifié de manière à toujours utiliser les mêmes angles de visée nous sommes donc en mesure d'effectuer les corrections d'ordre dimensionnelles que nous venons de mentionner en utilisant des modèles de transformation préétablis. Ceci tient tant et aussi longtemps que les paramètres d'acquisition ne changent pas. Nous comprenons que l'acquisition et la diffusion d'images satellitaires est une activité économique à valeur ajoutée et qu'il est donc inévitable que dans un contexte d'utilisation

normal qu'il y ait des techniques de transformation automatisées qui aient été développées pour permettre aux compagnies qui opèrent les satellites de maximiser leurs profits.

Il faut cependant retenir qu'une zone géographique donnée ne pourra être revisitée qu'après un certain nombre d'orbites, nous parlons ici du temps de revisite d'un satellite donné. La périodicité d'acquisition varie d'un satellite à l'autre et dépend de leurs orbites respectives. Il y a, cependant, toujours un délai d'acquisition incontournable relié à cette contrainte fonctionnelle qui doit être respecté si nous voulons pouvoir conserver la configuration de base de l'imageur pour laquelle le modèle de correction est connu.

Lorsque nous effectuons l'acquisition d'images dans un contexte de gestion de catastrophe, par contre, nous n'avons pas la liberté d'attendre le moment de revisite de la zone ciblée par un satellite donné. Pour pallier ceci, plusieurs satellites offrent la possibilité de changer leurs angles de visée en modifiant la configuration du capteur, en changeant légèrement la trajectoire du satellite ou encore en combinant ces deux possibilités. De plus en plus nous parlons de satellites agiles pour décrire cette fonctionnalité.

Ces changements de paramètres nous permettent d'obtenir des images d'une zone spécifique à l'aide d'un satellite donné beaucoup plus souvent que si nous avons à attendre que la période de revisite ne s'écoule. Par contre, cette possibilité technique entraîne une modification de la relation de la configuration du sol et du plan focal de l'imageur. Cette variation cause des effets de perspectives et/ou de parallaxe différents qui ne peuvent plus être corrigés sans avoir à redéfinir le système de transformations géométriques requis.

De tout ceci nous devons retenir que, dans un contexte de gestion de catastrophe, bien que nous ayons accès à des images satellitaires de la zone sinistrée, rien ne garantit qu'il soit possible d'effectuer la classification et l'analyse de leur contenu d'une manière simple et directe. La seule réelle certitude que nous ayons dans ce contexte est que les photo-interprètes qui analyseront ces images assigneront les mêmes types d'étiquettes conceptuelles aux différentes catégories d'occupation du territoire extraites des différentes images par les étapes de classifications de leur contenu. Il nous semble donc pertinent de miser sur cette

représentation pour définir des procédures de comparaison des images qui pourront être utilisées dans ce type de contexte d'analyse spécifique.

Nous reviendrons sur ceci plus en détail un peu plus loin, mais à ce point il convient de mentionner que ce que nous venons de proposer est appelé de la comparaison post classification. Cette approche fait partie des méthodes de détection de changement couramment utilisé en télédétection ainsi que dans plusieurs autres contextes de reconnaissance de forme et d'analyse de données. L'article de (Alboody, Sedes et Inglada, 2008) présente ce concept dans un contexte d'utilisation de données provenant de logiciels SIG mais le lecteur intéressé peut aussi consulter (Lu et al., 2004b) pour avoir une vue plus générale du concept.

1.3 L'accès aux données utilisées en télédétection et de leur disponibilité

Nous comprenons qu'établir quel sont les types d'images pertinents à utiliser dans un contexte donné ainsi que leur sélection sont les premiers éléments qui doivent être pris en considération dans la séquence des traitements que sous-entend la classification de l'usage du territoire et la détection de changement. La disponibilité de ces images est donc un élément primordial qui permet de faire évoluer la masse de connaissances reliée à l'analyse et à l'utilisation efficace et efficiente de ces sources de données. C'est la consultation et l'utilisation de ces images qui permettent aux intervenants mis en cause d'acquérir les connaissances et l'expertise nécessaire pour leur permettre d'effectuer un choix probant d'images en fonction de différents contextes d'analyse.

Comme chaque nouvelle plateforme d'acquisition d'images satellitaire à ses propres particularités techniques, nous comprenons donc qu'elles doivent être analysées pour permettre de caractériser les images qui en proviennent et d'établir ce à quoi elles sont le plus utiles. Ce sont ces informations qui nous permettent d'analyser, d'établir et de cataloguer les types de traitements requis pour arriver à extraire différents types d'informations en fonction des différentes images satellitaires qui sont disponibles à l'heure actuelle.

La disponibilité d'exemples des nouveaux formats d'images est, par contre, très limitée. Ceci peut être en partie attribué à l'optique commerciale des entreprises, et autres intervenants, détenant les droits d'exploitation des satellites imageurs qui sont en orbite autour de notre planète. Cette contrainte économique est presque incontournable et a un impact incontestable sur la disponibilité de ces images jusqu'à ce que la dominance commerciale d'un nouveau produit ne soit échue.

N'oublions pas que nos gouvernements, qui sont à l'heure actuelle parmi les seules entités sociales à avoir la capacité technique de mettre des satellites en orbite, le font pour le compte de compagnies privées, ou semi-privées, qui génèrent des profits par la vente des images obtenues de ces satellites. Par contre, nos gouvernements ne semblent pas imposer d'exigences fortes auprès de ces compagnies en ce qui concerne la création de banques d'images de références ouvertes à la communauté de recherche ayant à utiliser ce type de données dans leurs travaux, ce qui en aurait augmenté leur disponibilité actuelle.

Ce détail nous semble important et digne de mention surtout lorsque nous tenons compte des catastrophes naturelles qui mettent de plus en plus de gens en péril chaque année. La disponibilité de ces images permettrait aux chercheurs académiques et aux autres intervenants du domaine de la télédétection d'explorer les nouveaux formats d'images et de s'y habituer avant que ne survienne le besoin de les utiliser. Ceci aurait comme conséquence principale d'écourter le temps de traitement relié à des images provenant de plateformes d'acquisition connues, car le développement des connaissances sous-jacentes aux opérations de classification et de comparaison de leur contenu, requises par la majorité des techniques utilisées en télédétection, serait au moins partiellement entamé et documenté.

La gratuité, jumelée à un accès rapide aux données images, nous semble être un élément essentiel pour aider au développement des techniques et méthodes d'analyse qui permettent d'effectuer les travaux qui relèvent du domaine de la télédétection. Un élément important qui devrait être mis à la disposition de la communauté de la télédétection est une base de données composée d'images, ortho rectifiées, géo référencées et, autant que cela est possible, recalées

provenant de chaque satellite et de chaque capteur couvrant, au minimum, la totalité de la surface terrestre de notre planète, si pas la surface totale incluant les océans, et ce, pour tous les niveaux de résolution disponibles.

Certains travaux de recherche commencent à traiter de certaines portions de ce qui vient d'être mentionné ici. Ces travaux portent en général sur une partie ou sur quelques éléments de ce que cette structure de traitement devrait incorporer plutôt que de l'ensemble du support requis pour simplifier ce type d'analyse comme nous pouvons voir dans (Deng, 2009) ou dans (Datu et al., 2007). Ceci est tout à fait compréhensible étant donné la complexité élevée reliée à la simulation de l'ensemble de ce que nous allons souligner dans ce mémoire.

Dans (Bielski, Gentilini et Pappalardo, 2011) nous retrouvons une analyse qui traite de certains aspects de l'accessibilité aux données d'images satellitaires et du traitement de ces images à l'aide d'une infrastructure de calcul distribuée et de ressources algorithmiques centralisées. Ces éléments font partie de ce que nous considérons être des blocs essentiels qui permettront d'accroître l'efficacité des analyses reliées à la classification de l'usage du territoire et à la détection de changement qui sont les bastions principaux de la création de cartes thématiques dédiées à la gestion de catastrophe. Dans cet article l'emphasis est surtout mise sur la protection des données et la gestion des accès lors de la sélection des images sources, la configuration des traitements et l'acheminement des résultats, sur l'analyse des solutions de traitement distribué pertinentes ainsi que de l'accessibilité à distance à des ressources algorithmiques centralisées. Les traitements qu'ils ont utilisés pour les essais qu'ils ont menés sont simples, mais leur permettent tout de même de présenter le concept d'une manière convaincante.

Le concept de l'accessibilité est aussi traité dans (Perez, 2008) avec la différence importante de ne pas mettre l'emphasis sur les protocoles de sécurité, mais plutôt, sur l'accessibilité des données image et sur la facilité de découverte de ces dernières par des usagers divers. Des essais ont été menés avec des utilisateurs qui possédaient les connaissances géographiques pertinentes reliées à l'imagerie satellitaire et à la télédétection en général d'une part et

d'utilisateurs expérimentés en informatique d'autre part. Les deux groupes ont réussi à utiliser le prototype d'interface de consultation et de téléchargement d'images satellitaires pour s'acquitter de quelques tâches d'exploration et d'importation de données sans grandes difficultés. Les concepts présentés dans cette thèse ont été implantés par les membres du groupe de recherche et peut être utilisé à l'aide de l'interface d'exploration et de téléchargement GeoDataDownload⁹ ou encore en tant que module d'entrée de la plateforme projetée de traitement intégré GeOnAS¹⁰. Les images qui sont disponibles à l'aide de ces deux outils sont présentées dans le Tableau 1.3.

Nous remarquons, par contre, que les images qui sont disponibles en utilisant cette interface de consultation et d'importation ont toutes des résolutions spatiales de 30 m par pixel ou plus. Ceci est probablement relié au fait qu'il s'agit d'un prototype qui est en cours de développement en partenariat avec l'USGS et la NASA qui ont fourni les images qui sont accessibles avec cet outil. Pour inclure d'autres formats et résolutions d'images il faudrait réussir à obtenir l'appui d'autres acteurs du domaine, comme le Centre national d'études spatiales (CNES) par exemple, qui pourraient fournir des données images qui deviendraient par la suite accessibles à l'aide de cet outil.

Un élément très intéressant de l'optique de gestion préconisée de cette interface est d'utiliser des références d'accès pour être en mesure de retrouver les données plutôt que de stocker les images localement. Ceci permet de limiter la quantité de ressources informatiques requises pour gérer et entreposer les données d'une part, et est propice à favoriser le développement d'une infrastructure d'indexation qui permettrait de mettre en relation les images sources originales avec les produits images ou cartographiques dérivés résultant de leur analyse.

⁹ <http://geobrain.laits.gmu.edu/GeoDataDownload/> consulté le 20 jan 2012

¹⁰ <http://geobrain.laits.gmu.edu/OnAS/> consulté le 20 jan 2012

Tableau 1.3 Formats d'images satellitaires disponibles avec GeoDataDownload¹¹

CSISS/GMU registered data		Platform	Instrument	Sensor	Coverage	Size	Scenes	Data format
LandSat	ETM	Landsat-7	Landsat-7	ETM+	Global	6.1 T	8751	GeoTIFF
	TM	Landsat-5 Landsat-4	Landsat-5 Landsat-4	TM	Global	2.9 T	7007	GeoTIFF
	MSS	Landsat-5 Landsat-4	Landsat-5 Landsat-4	MSS	Global	16 G	236	GeoTIFF
SRTM	SRTM 30m US	SRTM (OV-105 Endeavor Space Shuttle)	SRTM	SRTM	US	56 G	1158	GeoTIFF
	SRTM 90m Global				Global	40 G	14272	GeoTIFF
	SRTM 90m Global with nodata value filled				Global	59 G	872	GeoTIFF
ASTER	L1B	TERRA	ASTER	VNIR SWIR TIR	Near Global	162 G	1295	GeoTIFF
ASTER DEM	L3	TERRA	ASTER	VNIR	Global	1.1 T	22604	GeoTIFF
The Blue Marble	Composite from MODIS data	TERRA	MODIS		Global	8.8 G	16	GeoTIFF
Earth's City Lights	Generated from DMSP data (Defense Meteorological Satellite Program)	DMSP	DMSP		Global	525 M	4	GeoTIFF
EO1	ALI (Advanced Land Imager)	EO-1	ALI		San Diego	3.9 G	1	GeoTIFF
	Hyperion		Hyperion				2	
WindSat	Soil Moisture Retrievals	WindSat	WindSat	WindSat	Global	14 G	984	Binary
	Land Surface Temperature							
	Land Type							
	Vegetation Water Content							
	Observation Time							
NOAA-GOES	Imager	GOES-11	Imager	Imager		220 M	21	netCDF
		GOES-12						

Ceci est très à propos lorsque nous remettons tout ceci dans un contexte de gestion de catastrophe associée à la *Charte internationale : espace et catastrophes majeures*, car dans cette situation nous aurons affaire à des intervenants dispersés à la grandeur de la planète travaillant à l'analyse des images satellitaires de la zone sinistrée. Ces intervenants auront tous besoin d'avoir accès aux dernières images disponibles, le plus rapidement possible, pour effectuer les analyses requises. Par la suite, les produits cartographiques dérivés doivent être

¹¹ <http://geobrain.laits.gmu.edu/datareg.html>

acheminés vers les utilisateurs visés pour aider à la planification des efforts de secours. Ceci pourrait aussi être mis œuvre en utilisant le même mécanisme.

Si une interface centralisée d'indexation et de référencement des images venait à être utilisée dans ce contexte, tous les intervenants pourraient être tenus au courant de ce qui est disponible en fait d'images source, de ce qui a déjà été traité pour extraire quelles informations par qui, comment, à l'aide de quelles images et quand, ainsi que de permettre d'annoncer à l'avance la prochaine modalité d'image qui sera disponible et quand elle le sera. Il s'agirait donc non seulement d'une interface de recherche et de téléchargement d'images, mais aussi d'une interface de communication qui permettrait de gérer les besoins de produits dérivés ainsi que de permettre de voir les travaux en cours menés par les différents intervenants impliqués ce qui aiderait, entre autres, à éliminer les dédoublements d'efforts d'une part et les doublons de fichiers de l'autre.

Toutefois, une fois que les images qui seront utilisées pour effectuer une analyse de l'utilisation du territoire, ou encore de détecter la différence entre deux images d'une même zone géographique, ont été identifiées et obtenues, la prochaine étape sera nécessairement le traitement de chacune de ces images. Il y a plusieurs différents éléments qui entrent en considération sous cette rubrique et il s'agit de ce qui sera traité dans le prochain chapitre.

CHAPITRE 2

LE TRAITEMENT D'IMAGES SATELLITAIRES

Depuis quelque temps, nous constatons une croissance notable des phénomènes naturels qui, de notre point de vue humain, sont catastrophiques. Nous n'avons qu'à penser à l'augmentation du nombre de tornades, d'inondations ou de tremblements de terre qui peuplent les nouvelles que nous obtenons chaque jour pour nous en convaincre. De plus en plus, il est évident qu'il y a un changement majeur de notre environnement à l'échelle planétaire qui nous force à déployer des efforts de plus en plus considérables pour venir en aide à des populations qui, de par le passé, n'étaient que rarement ébranlées par ce type d'événements catastrophiques.

Dans cette foulée a été créée la *Charte internationale : espace et catastrophes majeures* qui a pour but premier de permettre de réagir rapidement à des événements catastrophiques en permettant un accès ainsi qu'une distribution plus rapide des images satellitaires pertinentes (Bessis, Béquignon et Mahmood, 2004). Ces images sont utilisées par les analystes et photo-interprètes qui créent les produits cartographiques, à valeur ajoutée, à partir de ces images. Pour ce faire, plusieurs groupes de spécialistes du traitement d'image, d'analystes œuvrant en télédétection, de photo-interprètes, d'experts de la gestion des ressources de secours et de fournisseurs de données satellitaires œuvrent pour faire front commun à cette nouvelle situation.

Nous comprenons de ceci qu'en arrière-plan il y a aussi une cohorte importante de chercheurs académiques qui travaillent au développement d'outils et d'infrastructures de traitement qui permettront de réagir de plus en plus rapidement et efficacement à ces situations précaires. Qu'il s'agisse de protocole d'accès aux données pertinentes, de plateformes de travail intégrées ou encore d'algorithmes de traitement d'image hautement performants, nous constatons une volonté de développement de l'infrastructure requise pour permettre d'augmenter l'efficacité des analyses et de réduire le temps de traitement de ces

données qui devient de plus en plus important avec l'augmentation de la résolution des images satellitaires.

Cette volonté est, comme le veut l'expression classique, l'enfant de la nécessité. Ceci découle d'une part de l'urgence sous-jacente, qui est inhérente à la gestion de catastrophe, et d'autre part en réaction à la croissance de la taille des images et de la grande diversité de phénomènes qu'elles peuvent maintenant décrire. Ce qui était possible il y a dix ans ne l'est plus nécessairement, ou du moins pas aussi rapidement. Comme l'urgence est un élément incontournable dans ce contexte, nous ne pouvons nous permettre de ne pas arriver à des résultats utiles en de courts délais.

De ceci découle la recherche de techniques automatiques de réduction de la complexité du problème. Ici, il faut bien voir que la communauté de recherche en télédétection est divisée en deux grands groupes, ceux qui cherchent des techniques complètement automatiques et ceux qui travaillent sur le développement d'outils de travail performants qui tiennent compte du fait que des opérateurs humains peuvent guider les algorithmes développés vers les représentations désirées.

2.1 Les applications de la télédétection reliées aux efforts humanitaires

Nous retrouvons plusieurs avenues de recherche en télédétection qui sont associées à l'analyse du territoire à l'aide d'images satellitaires. Chacune de ces catégories de développement traite de différentes facettes du problème qui sont reliées aux divers paliers de traitement mis en œuvre pour permettre l'utilisation efficace d'images satellitaires. Ces images satellitaires sont des sources d'information riches, mais complexes, qui doivent être préparées avant même de pouvoir concevoir de les utiliser efficacement pour mener quelque analyse que ce soit.

Les premières étapes requises pour que nous puissions utiliser ces images sont la correction des déformations géométriques, nous parlons d'orthorectification, le positionnement

géographique réel des images, que l'on appelle le géoréférencement, et dans certains cas la composition de plusieurs images, pour en créer une d'une région spécifique, que l'on appelle des mosaïques d'images. Ces étapes ne sont pas encore reliées à l'analyse du contenu des images en soi, mais sont d'une importance critique si l'on veut pouvoir établir la relation entre le contenu des images et ce qui est réellement présent au sol en un lieu spécifique.

Dans un contexte d'efforts humanitaires, cette correspondance est capitale de par le fait que le résultat usuel du traitement de ces images est la création de cartes thématiques qui servent à organiser les efforts de secours et à planifier leur déroulement. Si la correspondance géophysique n'est pas fidèle, la capacité d'arriver à apporter de l'aide en un endroit donné d'une manière efficiente en sera affectée de manière négative, voire même complètement bafouée dans certaines situations.

Avec la croissance de la taille des images, et donc la diminution de la taille de la cellule de résolution au sol, il faut revoir les techniques qui étaient employées pour effectuer ce conditionnement initial des données pour s'assurer qu'elles sont toujours valides et dans le cas contraire il devient nécessaire de développer de nouvelles techniques adaptées aux nouveaux formats d'images.

Il ne s'agit ici que de l'une des étapes du traitement relié à l'utilisation d'images satellitaires, mais il faut être conscient que cette même contrainte s'applique à tous les paliers d'analyse requis pour créer des cartes d'utilisation du territoire ou de changements qui sont à la base de la planification des efforts de secours.

2.2 La séquence de traitement et d'analyse typique d'images satellitaires

Le traitement complet d'images satellitaire peut prendre différentes voies, selon le cas en cours d'analyse, mais un certain nombre d'étapes sont essentielles et communes à presque toute analyse de ce type. Nous omettrons les corrections d'ordre géométriques et géographiques, qui ont été mentionnées précédemment, dans ce qui suit, car nous

considérons qu'elles relèvent plus des producteurs d'images que des intervenants travaillant à la classification et à l'analyse du contenu des images. Nous tenons à souligner que les photos interprètes et autres intervenants préfèrent réaliser ces opérations eux-mêmes pour qu'ils puissent avoir confiance en la qualité des corrections apportées aux images. Il est fort probable que dans certaines situations il soit nécessaire de réaliser ces corrections mais ceci ne devrait être qu'occasionnel. C'est la chaîne de traitement reliée à la production des cartes thématiques et la mise en œuvre de la détection de changements qui nous intéresse dans ce travail plutôt que de la production commerciale de produit image ou de la gestion administrative des secours.

En ce qui concerne l'analyse de ces images, nous retrouvons presque toujours la séquence suivante :

- Prétraitement des images,
- Extraction de caractéristiques descriptives,
- Classification du contenu des images,
- Identification et quantification du ou des phénomènes d'intérêts,
- Comparaison des résultats du traitement de deux images ou plus.

Plusieurs méthodes d'analyse peuvent être pertinentes à diverses situations en fonction des sources de données disponibles. Autant qu'il soit possible, l'analyse porte sur des images provenant des mêmes capteurs ou de capteurs de même type ayant une résolution au sol identique ou presque tel que mentionné au CHAPITRE 1. Ceci est directement lié à la difficulté de développer des algorithmes permettant de simuler ce que nous, êtres humains, sommes en mesure de faire automatiquement. Pour nous, il n'est pas difficile de trouver des objets de même nature dans une image couleur d'une part et dans une autre image en tons de gris de l'autre ou encore à des échelles différentes. Notre capacité d'abstraction et de représentation conceptuelle nous permet d'effectuer ce type de mise en correspondance automatiquement. Du point de vue de l'informatique, par contre, il est extrêmement difficile de reproduire cette mécanique analytique automatique.

Lorsque nous analysons des images satellitaires, il peut arriver qu'il soit nécessaire dans certaines situations, comme des catastrophes naturelles, ou autre, de comparer des données incompatibles du point de vue des variables ou de la résolution. Chose que nous faisons aisément, mais que nous n'avons pas encore réussi à programmer pour que cela puisse se faire automatiquement. Certains chercheurs se penchent sur cette question épineuse et tentent de développer des méthodes permettant d'établir la passerelle entre différents types de données (Chesnel, Binet et Wald, 2008), (Alberga et al., 2008). Les travaux de ces derniers traitent de certaines combinaisons spécifiques de données satellitaires et ne promettent en rien des méthodes applicables à toutes les situations possibles mais laissent plutôt entrevoir que cette possibilité de traitement est fonctionnelle et réalisable.

Les travaux de Chesnel, Binet et Wald utilisent un traitement à plusieurs pallier pour arriver à isoler les édifices dans des images Quickbird et Ikonos séparément puis de les mettre en correspondance en fonction de leur position relative. Ils arrivent à un taux d'identification correcte des édifices ayant été endommagés par un tremblement de terre qui est fonction de la différence d'angle de visée entre les images. Ils obtiennent des performances allant de 72% à 93% pour les images de leur scénario de développement.

Cette avenue de recherche est importante dans un contexte de gestion de catastrophe, car comme le mentionnent Chesnel, Binet et Wald :

« On one hand, the crisis image has to be acquired as soon as possible following the disaster, regardless to the acquisition modalities; on the other hand, the reference image has to be as recent as possible, to avoid additional major changes that are not related to damage. Hence there is little chance for the crisis image to be acquired in the same conditions, or even with the same sensor, than the reference image. »

Les outils qui sont à la disposition de l'ingénieur d'astreinte et du chargé de projet qui sont successivement en charge de la supervision des opérations de la Charte permettent de minimiser la probabilité que cette situation ne se présente, mais comme nous le savons tous, « Murphy » a toujours son mot à dire et nous ne pouvons prévoir quand il se prononcera.

La majorité des travaux de recherche reliés à la télédétection traite, la plupart du temps, de l'un ou l'autre des éléments d'une séquence complète, bien que certains travaux portent sur une procédure complète d'analyse allant du prétraitement à l'analyse quantitative de l'occupation du territoire ou de la différence existant entre deux ou plusieurs instances temporelles.

Nous développerons ici un peu les différents blocs de la chaîne de traitement générale mise en œuvre pour l'analyse d'images satellitaires pour aider à la compréhension de la problématique de la plateforme de traitement et de développement de procédures et d'outils d'analyse qui sera abordée par la suite.

La Figure **2.1** présente l'enchaînement d'opérations qui peuvent avoir à être mises en œuvre pour réaliser une analyse typique. Seulement certaines opérations sont présentées pour donner une idée générale de ce que les paliers de traitement peuvent comporter sans toutefois être exhaustivement explicités.

Il faut retenir que bien que cette représentation soit linéaire dans bien des cas il y a inévitablement bouclage entre certains de ces paliers de traitement. Par exemple, on peut obtenir après un premier passage une classification initiale d'une image qui sépare plusieurs types d'utilisation du territoire parmi lesquels on retrouve une classe spécifique qui englobe une sous-classe qui nous intéresse. Ceci implique donc la sélection d'un sous échantillonnage des points membres de la classe contenant la sous-classe d'intérêt suivi d'un nouveau traitement qui peut être basé sur d'autres variables ou encore sur d'autres méthodes de classification. Dans ce cas il y a donc forcément bouclage sur les étapes de la chaîne de traitement.

Les prochaines sections donnent un peu plus de détails sur les différents paliers de traitement dans un contexte de télédétection et de gestion de catastrophes.

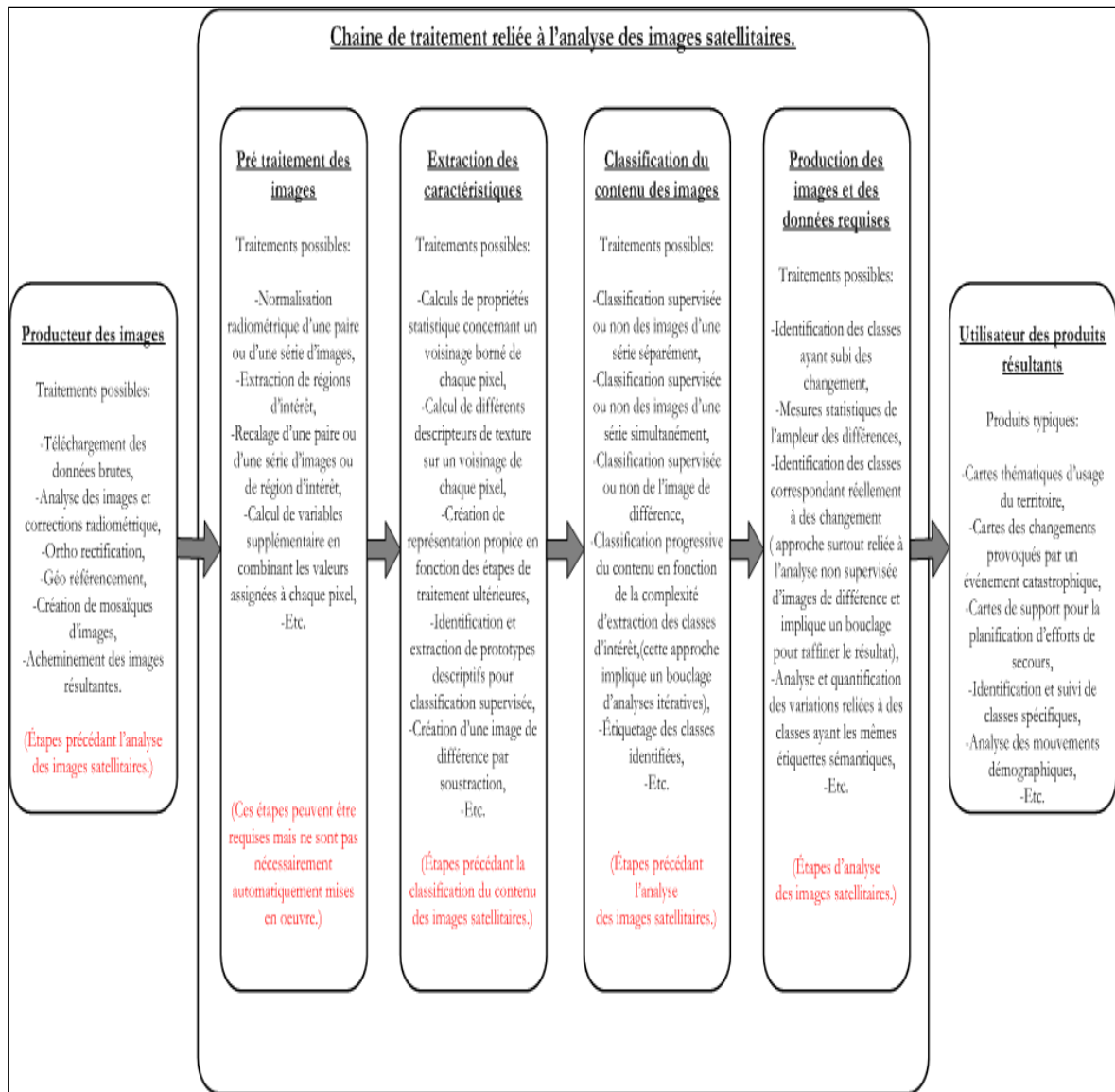


Figure 2.1 Chaîne de traitement typique d'images satellitaires

2.3 Le prétraitement des images

Comme nous l'avons mentionné à la section précédente, l'utilisation d'images satellitaires en vue d'effectuer la comparaison de leur contenu requiert bien souvent un certain nombre d'opérations qui permettent de les rendre comparables. Ceci peut provenir de plusieurs différentes particularités reliées aux images même ou encore à des variations de leurs conditions d'acquisition. Entre autres, il est fréquent que les conditions météorologiques

et/ou atmosphériques viennent affecter l'intensité relative du rayonnement lumineux capté par l'imageur entraînant de la sorte des différences entre des images qui autrement n'en auraient que peu.

Pour corriger ce type de problème, nous avons souvent recours à divers techniques de normalisation des images qui tentent de ramener les deux images vers un même référentiel en utilisant une gamme de mesures de stabilité et de variabilité pour établir la fonction de correspondance qui servira à transcoder les images. Sans cette normalisation, un bon nombre des techniques qui visent à détecter les différences entre deux, ou plusieurs, images donnent des résultats faussés par cette différence des données qui, en soi, n'est relié qu'à une variation d'éclairement de la scène, de présence de brouillard ou de variation de l'angle de visé du satellite. Nous reviendrons sur ceci au CHAPITRE 3 qui traite des méthodes de détection de changement proprement dites.

D'autres facteurs peuvent avoir un impact sur l'analyse de ce type d'image. Comme nous l'avons mis de l'avant en soulignant le commentaire dans l'article de Chesnel, Binet et Wald, il est probable que les images qui sont disponibles n'aient pas la même résolution ou le même type de représentation des informations. Dans ces cas, il faut procéder à des transformations encore plus complexes pour arriver à définir les fonctions passerelles qui permettront d'établir la correspondance de leur contenu et finalement d'arriver à comparer les images.

En général, la question de la résolution est traitée de manière à réduire celle de l'image ayant la meilleure résolution pour la remmener à celle de l'image qui est la moins précise. Pour ce faire, plusieurs techniques peuvent être utilisées. La classe de méthodes la plus communément utilisée est la réduction de résolution par décomposition pyramidale. Ces techniques sont d'ailleurs utilisées à plusieurs autres fins en télédétection, ce sur quoi nous reviendrons plus tard. Cette technique est aussi utilisée par plusieurs méthodes de calcul de descripteur comme les caractéristiques SIFT, *scale invariant feature transform*, qui reposent sur la représentation de l'information à plusieurs échelles et qui retient seulement les points d'intérêt qui sont présents et stables à plusieurs échelles.

D'autres transformations peuvent aussi être appliquées pour augmenter et étoffer la représentation initiale de l'image source. Nous avons souvent recours à des variables supplémentaires qui permettent de représenter différentes informations qui ne sont pas aussi bien définies par les variables de base d'une image donnée. En général il s'agit de combinaisons de bandes qui permettent de faire mieux ressortir certains types d'informations.

Nous pouvons penser, entre autres, à l'indice NDVI, *Normalised Difference of Vegetation Index*, qui est une variable calculée à partir des bandes rouges et proche infrarouge qui permet de mieux cerner la végétation ainsi que différentes particularités s'y rattachant. D'autres indices existent qui permettent de mieux décrire les zones arides, le ciment et les surfaces résilientes de ce type, l'humidité ainsi que plusieurs autres types d'objets en fonction des variables de bases de l'image. Cette description est évidemment dictée en grande partie par ce qui est le, ou les, type(s) d'objet(s) d'intérêt d'une analyse donnée.

Dans ce même esprit, il est aussi possible de calculer des ratios et différences de bandes qui permettent de faire ressortir différentes informations d'une image. Par contre, ces représentations s'éloignent de notre mécanisme de représentation de notre monde et la compréhension de leur signification n'est pas une tâche simple.

Nous mettons ces indicateurs dans la catégorie des prétraitements bien qu'ils pourraient être placés dans la catégorie suivante, l'extraction de caractéristiques, car s'il est probant d'utiliser ces mesures, on peut les considérer comme une couche d'information supplémentaire qui augmente la description de l'image d'un certain nombre de variables additionnelles. Il s'agit de mesures qui ont leur source au niveau du pixel tout comme les variables de bases. C'est de cette constatation que découle notre choix d'inclure ces mesures avec les prétraitements.

Les mesures que nous retrouvons dans la classe des caractéristiques proprement dites sont calculées à partir d'un certain nombre de pixels voisins du pixel d'intérêt plutôt que de ce pixel même. On doit comprendre de ceci que la complexité de calcul et de traitement est

beaucoup plus élevée pour ces caractéristiques que pour celles que nous laissons dans les prétraitements. Un script non paramétrique simple peut être suffisant pour extraire et stocker les mesures que nous associons aux prétraitements tandis que les autres mesures descriptives que nous venons de mentionner ont invariablement des paramètres qu'il faut ajuster. Ces caractéristiques sont très intéressantes d'un point de vue conceptuel car elles permettent de décrire une panoplie de phénomènes complexes qui sont très difficiles à extraire autrement. Par contre, si les paramètres que nous venons de mentionner ne sont pas ajustés adéquatement, il est fréquent que ces mesures ne représentent rien d'utile. C'est pour cette raison que nous voyons la pertinence de les diviser plutôt que de les traiter d'un bloc.

Un autre traitement qui mérite de se retrouver dans cette section est le recalage d'images. Ce terme s'applique à une famille de transformations qui ont pour but d'assurer la correspondance de position des pixels les uns par rapport aux autres entre les images d'une série comme une STIS par exemple. Ceci peut sembler trivial, mais il s'agit en fait d'une branche de recherche à part entière. Ces transformations sont utilisées dans plusieurs domaines autres que la télédétection, l'imagerie médicale en est un exemple.

Le recalage parfait, ou du moins presque, d'une série d'images permet d'utiliser d'autres variables qui dans bien des situations sont très utiles. En soustrayant une image de l'autre, si elles sont recalées, nous obtenons la différence existant entre les deux instants représentés en fonction de l'intensité de la différence. Cette approche est à la base de l'analyse des vecteurs de changement qui est l'une des techniques de détection de changement qui est très utilisée. La valeur de cette différence peut être considérée comme une variable de traitement supplémentaire qui peut être ajoutée à la représentation de chaque pixel et même quelquefois utilisée comme seule variable de traitement initiale. En utilisant cette valeur, lorsqu'elle est disponible, conjointement à celle des bandes, nous obtenons une représentation plus complète de ce qui se passe au niveau du pixel.

Lorsque l'on s'intéresse à comparer deux ou plusieurs images, on comprend que si les pixels correspondants sont tous superposés il y a de nombreuses méthodes qui permettent de

détecter ce qui change d'une image à l'autre. Ceci est surtout vrai lorsqu'il n'y a que très peu de variations exogènes, comme les différences d'éclairement, qui viennent affecter les images. Dans cette situation, une méthode simple qui peut être utilisée est la soustraction de l'arrière-plan. On procède à une modélisation de l'arrière-plan en effectuant une moyenne de la valeur de chaque pixel sur un nombre donné d'images de référence puis on soustrait cette image moyenne de la nouvelle image qui est en cours d'analyse pour faire ressortir les régions de l'image ayant subi des variations significatives. Une fois ces dernières trouvées, on procède à une analyse supplémentaire, restreinte à ces régions spécifiques, pour établir le type de changement étant survenu. Ceci est une approche qui est couramment utilisée par des applications simples de vidéo surveillance.

Quand on traite des images satellitaires, par contre, il est beaucoup plus difficile d'établir cette correspondance géométrique. Ceci vient de plusieurs facteurs reliés à la méthode d'acquisition de ces images. En premier lieu, il est difficile de garantir que deux images de la même zone aient exactement les mêmes paramètres d'acquisition. Que ce soit à cause de conditions climatiques ou atmosphériques ou de différences entre les angles de visées du satellite à deux moments différents, il n'est pas toujours aisé d'établir le modèle de correction approprié pour rapporter deux images dans le même référentiel géométrique.

Ceci est encore plus prépondérant avec les dernières générations de capteurs à très haute résolution, THR, qui amplifient un problème considérable lié aux effets de parallaxe et de déformations géométriques de la projection de la perspective 3D de la scène sur un support 2D. Dans ces cas, une petite différence des angles de visée peut avoir un impact considérable sur la correspondance des images du point de vue de la fidélité géométrique.

Plusieurs groupes de recherche se penchent sur cette question à l'heure actuelle, mais il est important de mentionner que le problème est loin d'être résolu et que dans bien des cas il est presque impossible de garantir la fidélité de la correspondance pour tous les pixels des images. À cet effet, on retrouve plusieurs travaux traitant de l'impact de ce que l'on appelle le bruit résiduel de recalage. Nous reviendrons plus en détail sur ce concept au CHAPITRE 3

de ce document qui traite des méthodes de détection de changements, car il y a un lien implicite entre plusieurs des techniques utilisées et la qualité du recalage des images utilisées pour l'analyse de changement.

Vient compliquer un peu plus le fait que dans certains cas il y ait des erreurs de fidélité géométrique dans une image qui proviennent de la précision du modèle de déformation relié aux lentilles et de facteurs reliés au positionnement du satellite par rapport à la surface terrestre qui ne sont pas enregistrés par les systèmes de veille de la trajectoire. Ces défauts de représentation entraînent un léger décalage des lignes de balayage de l'imageur les uns par rapport aux autres (Ayoub et al., 2008) et (Leprince, Muse et Avouac, 2008). Ces légers décalages peuvent être corrigés, tout comme les déformations géométriques reliées aux lentilles, mais doivent être détectés pour qu'ils puissent être éliminés avant la production de l'image finale qui sera utilisée par les paliers d'analyse subséquents. Ces articles ne traitent que de certain satellites de résolution moyenne, mais il n'y a aucune preuve que ce phénomène n'affecte pas d'autres satellites existant à l'heure actuelle compliquant de la sorte la tâche de recalage des images qui est déjà un exercice complexe. Nous n'avons cependant pas trouvé d'articles traitant de ceci en ce qui concerne les imageurs à haute et à très haute résolution lors de nos recherches documentaires.

À ce niveau de traitement, nous retrouvons aussi un autre type de transformation qui est d'usage courant. Nous parlons ici de la fusion d'images. Cette fusion de l'information provenant de plusieurs images permet d'augmenter la représentation qui est associée à chaque pixel d'information supplémentaire comme dans le cas des descripteurs simples, comme les valeurs des pixels ou encore l'indice NDVI par exemple, que nous avons mentionnés précédemment.

Un cas typique de ceci est la fusion d'une image panchromatique, qui est essentiellement une image en tons de gris, à une image multispectrale qui est prise en même temps. Les images multispectrales ont de moins bonnes résolutions que les images panchromatiques prises avec le même capteur. L'idée est de rehausser la résolution de l'image multispectrale en utilisant

l'image panchromatique pour estimer ce que les pixels manquants devraient avoir comme valeur. De nombreuses techniques existent pour réaliser cette fusion d'information, mais il faut retenir qu'il s'agit d'une estimation de ce qui devrait être et donc il faut tenir compte de la possibilité qu'il y ait déformation de la réalité « mesurée » par le capteur par l'introduction d'artéfacts créés par le calcul de complétion des valeurs manquantes.

Pour avoir une idée de ce que ce type d'erreur peut représenter d'un point de vue de la fidélité de la transformation le lecteur intéressé peut consulter (Wald, 1997) ou (Wald, 2000). Ces articles ne traitent que d'un certain type de fusion de l'information, celui d'images multispectrales et panchromatiques, mais font bien ressortir l'impact que peut avoir le choix d'une méthode de fusion sur la fidélité de la représentation synthétique créée. Ces articles contiennent aussi un survol des méthodes usuelles qui sont utilisées pour réaliser cette fusion ainsi qu'une comparaison de leurs performances sur des cas réels de traitement.

2.4 L'extraction de caractéristiques

L'analyse d'images satellitaires en télédétection a pour but premier d'identifier quelque chose de spécifique dans les images, comme une classe d'occupation du territoire par exemple, qui sont traitées et analysées pour nous permettre d'effectuer des mesures sur les objets que l'on y a trouvés. Il peut s'agir d'un seul type d'information qui est en cours d'analyse ou encore de la classification de toute une image en différentes catégories de contenu. Peu importe le contexte, il va de soi que pour être en mesure d'identifier un objet dans une image, il faut inévitablement utiliser les bonnes variables et descriptions. Sans ceci, comment pourrions-nous être en mesure d'y trouver, autrement qu'accidentellement, quoi que ce soit d'autre que des valeurs et des objets sans signification intelligible?

Conceptuellement, il faut comprendre que ce qui nous permet d'identifier un mur, par exemple, dans notre champ de vision est un ensemble d'indicateurs que nous utilisons de manière automatique. On cherche à trouver la couleur brique, la texture régulière de la maçonnerie ou encore la proximité d'indicateurs plus conceptuels et abstraits comme la

présence d'un toit ou de fenêtres. Notre cerveau tente de retrouver les indicateurs pertinents en fonction de ce que l'on cherche dans ce que l'on voit sans que ne nous sachions même, la plupart du temps, ce que ces indicateurs sont.

Il en est de même lorsque l'on cherche à analyser des images. Par contre, dans ce contexte, il nous faut trouver les bons descripteurs pour être en mesure d'extraire des images l'information qui nous intéresse. Cet exercice est très complexe et dépend de plusieurs éléments qui sont reliés aux images, à leurs types et résolutions ainsi qu'à ce qui est en cours d'analyse. Comme en télédétection nous avons affaire à une panoplie de formats d'images et de thèmes d'analyse, il n'est pas surprenant que le nombre de descripteurs qui peuvent être utilisés pour caractériser différents phénomènes soit assez imposant.

Nous ne ferons qu'un survol des classes de descripteurs et de certaines de leurs utilités pour faire ressortir la complexité de cette facette de la chaîne de traitement qui est mise en œuvre dans ce contexte d'analyse.

Nous regrouperons les différentes variables en trois classes de représentation. Ces catégories font intervenir deux concepts qui sont communs aux groupes de variables et qui relèvent d'une part de la méthode de calcul, de sa complexité algorithmique, de son coût de calcul ainsi que de ce qu'elle permet de représenter et, d'autre part, par le niveau d'abstraction sous-jacent qui peut être atteint.

Bien des travaux de recherche parlent de la représentation par régions ou par objets plutôt que par la valeur des pixels ou de leurs voisinages. Nous placerons ici à deux niveaux différents de représentation ces deux concepts de traitement de l'information. Ceci découle de la constatation que, la plupart du temps, les régions semi homogènes obtenues de divers traitements sont souvent regroupées pour former les objets qui sont utilisés pour le traitement ultérieur et l'analyse subséquente du contenu d'une image.

La classification des variables et des représentations de l'information que nous proposons ici est la suivante :

Variables du premier niveau (niveau d'abstraction minimale) :

- Valeurs de bandes, rouge, vert, bleu, proche infrarouge ou autre,
- Valeurs de combinaison de bandes, comme l'indice NDVI mentionné plus tôt,
- Différences de bandes, par bandes correspondantes entre images recalées rouges à rouges et ainsi de suite,
- Ratios de bandes, au sein de la même image.

Ces variables permettent essentiellement de classifier le contenu des images en fonction des pixels seulement. Ce niveau de représentation permet de classifier le contenu d'images ayant des résolutions moindres de manière satisfaisante pour un bon nombre d'applications.

Il est important de mentionner que plus la résolution des images augmente, plus il est difficile d'obtenir une bonne classification du contenu d'une image satellitaire en utilisant ces variables. En général, à haute ou à très haute résolution, les résultats de classification présentent un aspect « poivre et sel ». Ceci provient du fait que la variabilité interne des descripteurs reliés aux pixels appartenant à une classe augmente proportionnellement à la résolution et entraîne des classifications fracturées de certaines classes qui, à des résolutions moindres, auraient été groupées en une seule catégorie.

Il s'agit donc d'un groupe de variables de base qui sont presque primitives. On peut facilement se représenter que les animaux, même les plus primitifs, doivent percevoir le monde à l'aide de ce type de descripteurs simples et de leurs variations d'un moment à l'autre. Ceci fait part de ce que l'on appelle des réactions conditionnées par des quantités de mouvement. Bien qu'ils ne possèdent pas notre capacité d'abstraction, il est impératif pour la survie animale d'être en mesure de percevoir l'environnement pour établir les comportements

appropriés à adopter en fonction du niveau de danger perçu et de pouvoir reconnaître ces situations rapidement à d'autres moments et dans d'autres contextes.

Ces variables simples ont un contenu d'information très limité par rapport aux objets que l'on tente de retrouver dans les images satellitaires, car elles sont essentiellement reliées à des fractions de ces derniers. La majorité des phénomènes d'intérêt dans notre contexte de traitement sont composés de régions de pixels qui forment ensemble un objet donné que nous tentons d'isoler. Pour être en mesure de traiter ces objets il nous faut donc réunir les pixels appropriés, en fonction d'une certaine mesure de similitude, pour par la suite poursuivre l'analyse des régions conceptuellement homogènes obtenues et de les regrouper pour finalement arriver à la représentation des objets recherchés comme nous l'avons mentionné plus tôt.

Variables du deuxième niveau (niveau d'abstraction intermédiaire, toutes variables calculées en fonction d'un voisinage borné plus ou moins étendu) :

- Moyenne, variance et certains autres moments statistiques,
- Mesures d'énergie locale, l'entropie par exemple,
- Présence/absence d'arrêtes,
- Valeurs des gradients locaux, ici on parle des tendances de variation d'intensité et de leur orientation,
- Textures et leur orientation, fréquentielles, de cooccurrence ou autre,
- Mesures probabilistes, de la famille Markovienne ou autre,
- Concaténation des variables issues de plusieurs images pour créer des vecteurs descriptifs propices pour la classification simultanée et l'analyse de tendances de changements, pour utiliser cette catégorie de description les images doivent être recalées et faire part d'une STIS plus ou moins étoffée selon l'objectif de l'analyse,
- Régions homogènes, avec ou sans contraintes de connexité, souvent obtenues par segmentation du contenu de l'image.

Les variables du deuxième niveau tiennent compte du contexte englobant un pixel donné. En utilisant ces descripteurs, il est possible dans certains cas de diluer l'impact de la forte variabilité intra classe des descripteurs qui sont reliés à des images ayant une résolution fine. Les descripteurs de texture sont très utiles lorsque nous avons à traiter des images ne comportant qu'une seule bande d'information comme les images panchromatiques, bien que ces mesures soient aussi utiles dans plusieurs autres situations. Mais, en général, l'utilisation de ces variables est couteuse du point de vue du calcul.

Ici nous commençons à voir l'apparition des premiers blocs d'informations qui sont reliés aux analyses basées sur les régions et, par le biais, aux objets. Les régions dans ce contexte sont des blocs de pixels, souvent appelés « *blobs* » en anglais, qui sont suffisamment homogènes pour être regroupés par des procédures de segmentation ou encore d'agrégation. Les éléments résultants peuvent, dans certains cas, être directement considérés comme des objets, mais nous insistons sur la distinction entre les objets et les régions, car il faut souvent grouper des régions qui ont été identifiées pour obtenir les objets désirés.

Dans cette situation il faut donc avoir recours à un autre processus pour identifier les régions qu'il est probant de fusionner pour créer les objets. Ici encore, l'agrégation est une technique qui peut être considérée pour établir les classes de régions qui peuvent être réunies pour obtenir des objets pertinents à traiter par la suite. Leurs positions dans l'image deviennent donc importantes du point de vue de la description et du traitement pour être en mesure d'établir des règles de décision permettant d'exprimer une contrainte de connexité ou de proximité des régions à fusionner en fonction de leur homogénéité et de leur similarité.

Comme nous parlons de textures, de régions homogènes et de descripteurs permettant de décrire le contexte englobant un pixel, on voit que le niveau conceptuel que ce palier de description permet d'atteindre est plus abstrait. Nous nous fions souvent au contexte dans lequel nous nous trouvons pour guider notre analyse de ce que nous percevons. Plongés dans une forêt dense, nous ne chercherons pas à trouver un poteau téléphonique, et s'il y en a un de présent dans notre champ de vision, il est fort probable qu'à première vue nous ne le

remarquions pas. Ceci vient du fait que le contexte dans lequel nous nous retrouvons n'est pas conceptuellement propice à nous permettre de nous attendre à y voir un poteau. Nous verrons plutôt un arbre que, si nous nous y attardons, nous reclasserons après considération comme un poteau.

Cette mécanique de désambiguïsation est facile à observer lorsque l'on considère la compréhension qu'ont les enfants du monde qui les entoure. Le contexte est souvent l'indicateur principal qui leur permet de choisir entre différentes interprétations d'un concept, d'un thème ou encore du comportement à adopter face à leur environnement.

Variables du troisième niveau (niveau d'abstraction élevé) :

- Régions homogènes classifiées en fonction de leurs similitudes, de leur proximité ou des deux pour former des objets conceptuellement homogènes,
- Caractéristiques de formes des régions ou des objets,
- Propriétés statistiques des régions ou des objets,
- Caractéristiques de type structurelles comme la proximité d'autres régions ou objets associés ou encore de définition géométrique prédéfinie,
- Étiquettes conceptuelles, ceci est surtout relié à la post classification.

Ce niveau de description est beaucoup plus conceptuel et permet de traiter des objets qui sont dans l'image. Ces objets proviennent d'une structure de classification sous-jacente qui permet de les identifier dans les images traitées. Cette structure est souvent hiérarchique et repose sur l'utilisation des autres niveaux de représentation pour permettre leur extraction et leur regroupement. On peut se représenter le problème en pensant à la citation de Michel Ange, « J'ai vu un ange dans le marbre et j'ai seulement ciselé jusqu'à l'en libérer. »¹². C'est en sorte ce que la structure de classification qui est utilisée pour isoler un type d'objet nous permet de faire. On dégrossit l'information progressivement, selon une séquence spécifique, jusqu'à obtenir ce que l'on recherche.

¹² <http://www.evene.fr/citations/mot.php?mot=michel-ange>, consulté le 15 octobre 2012.

Nous incluons les étiquettes conceptuelles dans cette section bien qu'il ne s'agisse pas de variables au sens du traitement d'image proprement dit. Cette représentation de l'information qui est présente dans une image nous permet d'utiliser des méthodes de mise en correspondance des différentes classes de contenu qui ne reposent pas sur des mesures de distance classiques qui, dans certaines situations, ne peuvent représenter réellement les phénomènes de proximités qui se produisent dans un jeu d'échantillons ayant une description complexe comme il est mis de l'avant dans (Beyer et al., 1999). Nous posons donc que l'utilisation de variables nominales et numériques simultanément ou encore de variables qualitatives exprimées par des mots par exemple, nous permettraient d'arriver à réaliser efficacement une mise en correspondance des classes provenant de différentes images qui ne pourrait être découverte en utilisant que des mesures de distance classique.

De plus, l'utilisation d'étiquettes conceptuelles nous permet de nous affranchir de la difficulté d'effectuer la mise en correspondance du contenu d'images qui sont incompatibles du point de vue des variables et/ou de la résolution. Une fois les étiquettes associées aux différentes classes de contenu des images, nous ne sommes plus liés aux variables pour être en mesure de comparer le contenu des images et donc de passer à la comparaison des concepts présents dans ces images, ce qui est le réel élément d'intérêt dans ce contexte.

Chacun de ces niveaux de représentation est plus complexe que le précédent à calculer et à utiliser pour de nombreuses raisons. Nous comprenons assez aisément la relation entre ce que l'on perçoit visuellement et le premier niveau de représentation. Il s'agit en soi de ce que nous voyons, bien que les rapports et combinaisons de bandes soient plus abstraits. Par contre, de nombreux auteurs croient, et c'est notre opinion également, que notre cerveau procède automatiquement à certaines opérations de combinaisons et de substitutions pour nous permettre de « voir » certains types d'objets et de phénomènes. Par exemple, on peut penser à la complétion colorimétrique qui entraîne la perception de couleur inexistante dans une scène en fonction des autres couleurs présentes et de leur support contextuel optimal. N'oublions pas ici que nous ne possédons pas de capteurs permettant de voir la couleur jaune

par exemple, cette dernière est construite dans notre cerveau à partir d'une combinaison de rouge et de vert.

Tout comme nous analysons ce que nous percevons progressivement en raffinant nos descriptions en fonction de la complexité requise pour expliquer un concept donné, nous voyons qu'ici aussi il faut progresser par palier pour arriver à représenter un objet spécifique. Il s'agit d'une classification progressive qui peut être fondée sur plusieurs niveaux de description qui ne sont pas nécessairement utiles simultanément.

Les variables que nous utiliserons nous permettront d'obtenir différentes classifications du contenu d'une image. Ces classifications doivent cependant être faites pour nous permettre de parvenir par la suite à analyser les variations du contenu conceptuel des images, ce qui est la réelle essence de la télédétection. Il n'est pas tout le temps mentionné que cette comparaison de contenu est une étape du travail qui est réalisé, mais le concept est implicite à l'analyse du contenu d'images satellitaires.

2.4.1 Le problème d'identification des caractéristiques pertinentes à utiliser

Il y a un autre aspect de la problématique de la classification qu'il faut prendre en considération lorsque nous parlons de la structure de représentation propice à permettre d'accéder à des modèles de classification. Nous avons parlé des descripteurs qui peuvent être pertinents de considérer pour effectuer le regroupement de pixels en classes d'occupation du territoire, mais il faut être conscient que certains phénomènes sont plus faciles à identifier et à classer à différents niveaux de résolution.

Si nous avons à traiter une image THR par exemple, il est plus facile d'obtenir les zones rurales en utilisant une résolution moindre. Donc nous procédons en un premier temps à une réduction de la résolution par une procédure algorithmique, puis nous trouvons la position des zones agricoles comprises dans l'image. Une fois ces régions définies, nous pouvons revenir sur l'image originale et exclure ou inclure certaines portions de l'image, celles

correspondant aux zones agricoles dans notre exemple, des analyses ultérieures qui sont centrées sur d'autres thèmes d'intérêt.

Plusieurs chercheurs se penchent sur cette question de définir ce qui est l'échelle la plus appropriée pour permettre d'isoler les classes d'intérêt en classification de l'usage du territoire. Pour guider le choix de résolution en fonction des différents types d'objets d'intérêt, nous pouvons nous référer soit aux documents qui traitent directement de l'analyse de la représentation en fonction de la décomposition multispectrale ou encore à différents articles qui donnent les types d'images et leurs résolutions respectives à utiliser en fonction de ce qui est ciblé par une analyse donnée (Dekker et al., 2009).

Nous voyons ici qu'il y a un autre volet à prendre en considération lorsque nous pensons au format de donnée propice pour le stockage et la réutilisation des modèles de classification. Pour résumer, nous pouvons poser que pour différents types d'occupation du territoire, il faut non seulement être en mesure de mémoriser les variables et modèles de classification qui permettent d'isoler un phénomène donné, mais aussi à quelle résolution il est le plus simple de les trouver sans ambiguïté.

Le choix de variables « optimales » permettant d'isoler un type d'objet ou encore de réaliser la classification complète d'une image en classes d'occupation du territoire est une étape essentielle de ce type de traitement. Comme nous l'avons mentionné, il y a une grande variété de descripteurs qui peuvent être utilisés, et ce, à différentes échelles de représentation. Alors, comment faire pour trouver les meilleures échelles de représentation et de variables en fonction d'un thème d'analyse donné?

En fonction du type d'image et du genre de phénomène qui est en cours d'analyse, il y a toute une gamme de mesures qui peuvent être considérées pour augmenter la représentation utilisée pour effectuer la classification du contenu de l'image. Par contre, ces mesures ne sont pas toujours pertinentes et dans bien des cas un choix de variables peu judicieux peut fausser la classification et rendre les résultats incompréhensibles.

Nous pouvons considérer les descripteurs utiles de la même manière que les questions d'un sondage. Pour établir les regroupements de répondants en fonction de différents critères, nous utiliserons des combinaisons d'indicateurs appropriées pour décrire les individus. En général, dans ce contexte les questions sont conçues de manière à permettre d'extraire les indicateurs qui permettront d'effectuer cette séparation des groupes.

Ceci n'est bien sûr pas le cas lorsque l'on traite des images, mais nous pouvons assimiler l'action de rechercher la bonne combinaison de descripteurs à la création d'un sondage dédié à une analyse particulière. Les algorithmes de classification qui sont utilisés effectuent essentiellement la même tâche, ils « posent » à l'image, ou au jeu de donnée considéré, une série de questions qui peuvent être représentées par : « Est-ce que tu contiens A », où A peut être n'importe quel objet ou classe d'intérêt. La difficulté est évidemment de formuler la question de manière à ce que la réponse puisse être extraite des données de manière intelligible.

L'approche usuelle qui est employée par la plupart des chercheurs en traitement d'image, en classification ou en télédétection proprement dite est de réaliser la classification d'une image pour laquelle la vérité terrain est connue pour permettre d'établir quels sont les descripteurs pertinents. Un jeu de variables initiales est choisi puis la classification du contenu de l'image est réalisée. Pour évaluer la qualité de la solution obtenue, nous comparons le résultat du traitement à la vérité telle qu'établie au préalable. Si le résultat n'est pas satisfaisant un nouveau jeu de variables est utilisé puis évalué de la même manière jusqu'à obtention d'une solution « optimale ». Ce processus peut être utilisé pour évaluer différentes combinaisons de variables, de résolutions ou des deux simultanément. Il va de soi que cette approche d'analyse est itérative et peut prendre beaucoup de temps avant de permettre de trouver une combinaison de descripteurs et d'échelles d'analyse pertinents.

Il est aussi possible d'effectuer une estimation initiale de la pertinence de différentes variables en utilisant des méthodes statistiques comme la régression linéaire, les analyses

ANOVA¹³ ou encore en utilisant différents coefficients de corrélation comme celui de Pearson¹⁴ par exemple. L'analyse par composante principale peut aussi être utilisée pour trouver des combinaisons de variables différentes qui permettent d'expliquer la variation et la distribution des variables originales. Un exemple d'application de ce concept serait d'utiliser l'ACP pour établir une échelle de catégorisation permettant de mettre en relation la taille, l'âge et la couleur d'une lime pour en établir le degré de maturité à l'aide d'une variable synthétique unique qui serait une combinaison des trois variables mentionnées. Toutefois, cette technique dénature considérablement la signification conceptuelle des variables en les combinant de diverses manières pour créer les nouvelles variables issues de l'analyse qui ne sont plus nécessairement intelligibles pour un intervenant humain.

Par contre, pour que ces techniques d'analyse puissent être utilisées, il faut nécessairement avoir une base de données d'échantillons constituée des variables à évaluer ainsi que de leur classe d'appartenance. Comme nous l'avons mentionné précédemment, il n'est que peu probable que ces informations soient disponibles dans une situation de gestion de catastrophe. Il devient donc important d'avoir accès à des bases de données qui permettent de consulter des catalogues de variables et d'échelles de résolution qui expriment les types d'objets qui peuvent être isolés en fonction de diverses combinaisons de ces variables et résolutions.

Les photo-interprètes qui sont en charge de ce type de travail sont en possession de ces notions, ils les ont acquises par expérience. Ils n'ont pas de difficultés à choisir les combinaisons d'échelles et de variables appropriées pour un type d'analyse donné. Par contre, qu'advient-il lorsqu'ils doivent traiter de nouveaux formats de données qu'ils n'ont jusqu'alors pas eu à analyser? Leur expérience leur permet-elle de trouver les bonnes

¹³ L'analyse de la variance permet d'étudier le comportement d'une variable continue à expliquer en fonction d'une ou de plusieurs variables explicatives catégorielles.

http://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_de_la_variance, consulté le 25 septembre 2012.

¹⁴ In statistics, the Pearson product-moment correlation coefficient (sometimes referred to as the PPMCC or PCC,[1] or Pearson's r , and is typically denoted by r) is a measure of the correlation (linear dependence) between two variables X and Y , giving a value between +1 and -1 inclusive. It is widely used in the sciences as a measure of the strength of linear dependence between two variables. http://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_product-moment_correlation_coefficient, consulté le 25 septembre 2012.

combinaisons immédiatement, ou doivent-ils chercher ces combinaisons comme le reste des intervenants de la communauté de la télédétection?

Il y a dans la littérature reliée à la télédétection un manque flagrant en ce qui concerne ce type d'information. Il est très difficile de trouver des articles qui sont dédiés à cette question et qui donnent un minimum d'indices probants pour aider à guider le choix des variables et des résolutions pour différents types d'images et de résolutions en fonction de ce qui est en cours d'analyse. Il ne faut pas penser que les auteurs omettent de donner les combinaisons de variables qu'ils ont utilisées dans le cadre de leurs travaux. Au contraire, dans la majorité des articles reliés à la classification de l'usage du territoire ou de la détection de changement, il y a, en général, plus de variables qui sont évaluées, ou du moins mentionnées, que celles qui sont utilisées pour le traitement final. Par contre, il est peu fréquent que les auteurs expliquent clairement le ou les critères et/ou méthodes qui ont été utilisés pour effectuer le choix final de variable et/ou de résolution de traitement.

Une autre information qui est d'importance critique dans notre contexte de gestion de catastrophe est le temps de traitement requis pour identifier les variables et résolutions pertinentes en fonction des différentes analyses menées. Cette information n'est que très rarement publiée, soit parce qu'elle n'est pas considérée comme utile ou encore, peut être, à cause du contexte académique dans lequel la plupart de ces travaux sont réalisés qui permet justement de s'abstraire du concept d'urgence temporelle relié à l'obtention de la solution du problème de classification.

Essentiellement, les informations dont nous venons de parler sont disponibles, mais elles ne sont pas centralisées, elles sont disséminées au sein du corpus imposant d'articles et de livres qui traitent des différents aspects de la théorie et de la pratique de l'analyse d'images satellitaires en télédétection. Pour réussir à trouver des informations spécifiques à un cas de traitement, il faut déployer des efforts considérables de recherche dans la littérature pertinente, ce qui peut s'avérer être un exercice qui soit aussi long que d'entreprendre l'évaluation itérative d'une panoplie de combinaisons de variables et de résolutions à part

entière. Nous comprenons que dans un contexte de gestion de catastrophe, cette particularité est une embuche considérable qui mérite d'être étudiée pour trouver une manière de cataloguer ces informations et de les rendre accessibles aux différents intervenants qui ont à travailler à ce type d'analyse.

2.4.2 Les caractéristiques communes aux images utilisées

Ce qui vient d'être mentionné à propos de la mémorisation des variables et des modèles associés aux différents classificateurs qui ont été utilisés pour obtenir la répartition de l'utilisation du territoire pour une région donnée est, il nous semble, essentiel pour permettre d'accélérer le traitement d'images satellitaires. Ceci est évident surtout si l'utilisation du territoire d'une région à traiter a déjà été classifiée en utilisant les mêmes types et résolutions d'image. Ceci n'est bien sûr jamais garanti, mais ne semble-t-il pas raisonnable de penser que si cette situation se présente qu'il serait extrêmement utile de n'avoir qu'à consulter une base de données et, si le modèle existe, de charger la solution en mémoire et d'exécuter la classification de cette nouvelle image sans avoir à reprendre l'analyse des variables et des autres éléments que nous avons mentionnés?

Plusieurs diront que cette vision n'est pas valide, car nous savons très bien que la variation des conditions d'acquisition peut avoir un impact néfaste sur la validité d'une solution ou encore qu'il n'est pas garanti que la solution développée précédemment permette d'atteindre le même résultat ou une qualité de partitionnement équivalente. À ceci nous répondons qu'en premier lieu rien ne garantit que les conditions d'acquisition aient changé ou qu'elles ne puissent être corrigées pour remettre la deuxième image dans le même référentiel que la première. En deuxième lieu, s'il est survenu des variations qui affectent certaines des classes ou encore la répartition de l'information dans l'image dû à diverses déformations géométriques reliées aux angles de visée de l'imageur par exemple, rien ne laisse croire qu'une partie du modèle développé ne demeure pas valide. Comme nous l'avons mentionné précédemment, si une partie des pixels peut être exclue des efforts requis pour classifier le contenu d'une image en ses différentes composantes conceptuelles, ce qui reste peut, dans

certains cas, être soit bien plus simple à classifier que la totalité de l'image, soit être assez réduit pour que l'utilisation de descripteurs plus complexes puisse être envisagée sans que le délai associé à ces analyses supplémentaires ne devienne prohibitif du point de vue du temps de traitement.

Nous considérons qu'une solution qui est partiellement valide aiderait, entre autres, à permettre de concentrer les efforts d'analyse et de modélisation à des éléments ambigus et changeants comme l'apparence de la végétation qui est différente de saison en saison par exemple. Ces éléments, bien que plus difficiles à modéliser d'une manière absolue qui soit toujours valide, pourraient très bien être inclus dans la base de données proposée. Si l'on utilise un modèle qui a été créé à l'aide d'une image d'une région à l'automne, il est évident qu'il sera difficile d'obtenir la classification correcte de la végétation sur une image prise en été en utilisant le même modèle. Par contre, lorsque l'image acquise en été a fini d'être classifiée, rien n'empêcherait d'augmenter la base de données d'une structure conditionnelle qui permette d'avoir accès au modèle de classification globale directement avec un choix à exprimer en ce qui concerne la saison pour permettre de récupérer la portion de solution qui permette de classifier la végétation correctement.

Ici, nous n'avons parlé que du cas d'un jeu d'images ayant essentiellement la même provenance et ayant une comparabilité quasi directe. Par contre, d'autres informations seront inévitablement associées aux différents modèles de classification, ce qui permettra d'utiliser d'autres artifices pour arriver à comparer des images qui, en soi, ne sont pas directement compatibles. Parmi ces informations nous retrouverons les métadonnées reliées aux images, leur date d'acquisition, le satellite duquel elles proviennent, leurs conditions d'acquisition, le type d'images, leur résolution, les types de scènes, les coordonnées géographiques des régions traitées, les modèles de classification développés ainsi que les étiquettes conceptuelles qui sont associées aux différentes classes qui peuvent être extraites à l'aide des modèles stockés, conditionnels ou non, associés aux différentes images traitées.

La disponibilité de ces données permettrait de développer un système d'information qui pourrait être consulté avant d'entreprendre la classification d'une nouvelle image. Si la base de données contient une référence à une image pertinente qui a déjà été traitée, l'utilisateur pourrait commencer par appliquer le modèle existant et évaluer la qualité de la classification du territoire résultante avant d'entreprendre la tâche complexe reliée à l'analyse d'une nouvelle image.

De plus, il y a plusieurs régions de notre planète qui ne varient que très peu sur des étendues considérables, présentant donc essentiellement les mêmes caractéristiques géophysiques. Pensons aux prairies du centre du Canada par exemple, y a-t-il réellement suffisamment de différences environnementales entre les régions des villes de Hussar et de Empress, en Alberta, pour que le modèle développé pour classifier l'utilisation du territoire de l'une de ces régions ne soit directement valide pour l'autre région si aucun autre facteur ne vient affecter les images de chaque région? Nous avons choisi deux municipalités qui sont essentiellement à la même latitude, mais qui sont suffisamment séparées pour qu'elles n'apparaissent pas simultanément sur la plupart des images satellitaires à haute ou très haute résolution.

Ne semble-t-il pas que l'accès à ce type de données pourrait être utilisé à bon escient par les intervenants de la communauté de la télédétection? Ceci surtout dans un contexte de gestion de catastrophe qui implique essentiellement que tout artifice qui peut être exploité pour accélérer le traitement, et donc les efforts de secours, doit être utilisé.

Comme nous l'avons mentionné, la disponibilité des étiquettes conceptuelles associées à chaque classe d'occupation du territoire est une autre information qui serait associée à chacun des modèles mémorisés dans la base de données. Conséquemment, la mise en relation des classes présentes dans différentes images en cours d'analyse pourrait être mise en œuvre d'une manière beaucoup plus directe que ce que l'on pourrait réaliser en passant par des ponts de mise en correspondance modélisée en fonction des variables reliées à chacune d'entre elles, nous ne passerions donc pas par une modélisation « câblée » rigide de la

relation entre les variables des images pour chaque cas traité mais plutôt par une description flexible et simple à utiliser.

2.4.3 La modélisation de la relation entre ces variables

Les approches de modélisation de la relation entre les différents formats d'images qui est mise de l'avant dans les articles (Alberga et al., 2007a), (Alberga et al., 2007b), (Alberga et al., 2008), (Inglada, 2002), (Inglada et Giros, 2004) ou encore (Chesnel, Binet et Wald, 2008) sont bien démontrées pour les cas présentés qui traitent de combinaisons d'images optiques multispectrales et hyperspectrales, satellitaires et aéroportées, et des images radar à synthèse d'ouverture. Dans ces articles, le concept est développé et analysé pour deux types d'opérations usuelles en télédétection, le recalage et la détection de changement, en fonction de différentes mesures de similitudes de contenu qui peuvent être utilisées.

La majorité de ces travaux sont des essais initiaux visant à explorer les possibilités qu'offrent ces concepts et conséquemment sont plutôt qualitatifs. Dans (Alberga et al., 2007b), nous retrouvons une évaluation quantitative de la performance de détection de changement obtenu pour des combinaisons d'images recalées, des différentes modalités mentionnées plus tôt, en fonction des mesures de similitudes à l'étude. Les résultats sont intéressants et laissent prévoir qu'il serait possible d'utiliser cette approche pour permettre de réaliser certaines opérations de ce type de manière semi-automatique, mais il est important de souligner que, bien que ce thème de recherche soit en cours d'évaluation, pour le moment les performances ne sont pas suffisamment bonnes pour permettre des traitements de ce type qui soient même partiellement automatiques.

En plus, pour un cas de ce type qui aurait été modélisé avec succès, s'il y avait une variation de quelque nature que ce soit des données associées à chacune des images, il serait fort probable que la modélisation établie à partir des images de référence ne tienne plus et qu'il soit nécessaire de reprendre la modélisation de la relation entre les jeux de variables utilisés pour rétablir la correspondance entre les images.

Les questions qui font surface sont donc de déterminer quel serait le moyen le plus invariant qui permettrait d'exprimer la relation entre les différentes classes d'occupation du territoire présentes dans une série d'images? Est-il réellement nécessaire de passer par les variables pour établir cette relation? Existe-t-il des modèles de représentation que l'on peut prévoir qui auront une pertinence descriptive uniforme et stable pour tous les cas d'analyse plausibles?

Ces questions ont déjà été partiellement abordées dans les sections précédentes et nous ne reviendrons que sur certains des concepts qui seront élaborés un peu plus en détail après que nous ayons parlé de la question de la classification à la section suivante.

Ce que nous savons, comme mentionné plus tôt, est que peu importe le type d'image qui sera analysée et sa résolution propre, le but de l'analyse est d'établir l'occupation du territoire en divisant les pixels en classes mutuellement exclusives représentant chacune un type spécifique de contenu. Une fois la classification de tous les pixels de l'image terminée, chaque classe d'occupation du territoire isolé se verra nécessairement attribuer une étiquette pour expliciter ce que les pixels de cette classe représentent du point de vue conceptuel.

Ces étiquettes sont, comme nous l'avons mentionné plus tôt, ce que nous croyons être le meilleur mécanisme à utiliser pour permettre d'effectuer la mise en correspondance du contenu des images et permettre de simplifier la comparaison de leur contenu. Ces étiquettes seront nécessairement associées aux classes identifiées par l'étape de la classification du contenu des images. Nous avons besoin de ces étiquettes pour nous permettre de communiquer ce que telle ou telle classe représente. Pour nous un vecteur prototype est un jeu de paramètres numériques permettant de représenter une classe donnée du point de vue des variables et des algorithmes de classification qui, en fonction de notre mode de représentation et d'interprétation de l'information, ne veulent absolument rien dire. Nous ne pouvons utiliser ces représentations pour nos fins de modélisation conceptuelles, de communication et d'analyse, nous devons nécessairement utiliser des concepts linguistiques pour nous permettre de nous représenter ces objets clairement. Comme nous réaliserons nécessairement cette opération d'étiquetage et que les termes qui seront utilisés proviendront

forcément d'un lexique distinct et restreint qui est relié au concept d'analyse de l'occupation du territoire et de sa structure taxonomique, pourquoi alors ne devrions-nous pas miser sur cette représentation plutôt que d'autres plus complexes et essentiellement moins stables?

2.5 La classification du contenu des images

La classification des pixels, ou d'autres éléments extraits d'images comme les régions et/ou les objets par exemple, est une étape essentielle de ce type d'analyse sans laquelle il est impossible d'arriver à identifier le contenu des images à l'aide de ressources informatiques. Nous effectuons cette opération automatiquement, comme nous l'avons mentionné plus tôt. Nous sommes en fait de réelles machines à classification. Pour arriver à la même représentation taxonomique du contenu d'une image à l'aide d'outils numériques, il faut utiliser des méthodes de classification bien adaptées aux variables que nous avons extraites des images, sans quoi, les objets et/ou les classes retournés par les différents algorithmes n'auront probablement que peu de signification ou de cohérence.

Essentiellement, cette facette du problème fait intervenir plusieurs autres disciplines reliées à l'analyse d'image et à l'intelligence artificielle. La télédétection est une branche de recherche pluridisciplinaire qui met en œuvre des concepts et des techniques issues de plusieurs autres domaines. Le traitement d'image, la reconnaissance de forme, la classification, l'exploration de données, (*data mining* en anglais), l'analyse statistique, la géographie et bien d'autres disciplines sont mises en cause pour permettre d'arriver à développer des algorithmes performants adaptés aux fins des intervenants du monde de la télédétection. Nous concevons aisément qu'en général ces derniers se servent de ces concepts d'une manière efficace sans qu'ils en soient des experts à part entière proprement dit.

Plusieurs approches peuvent être envisagées pour effectuer la classification du contenu d'images satellitaires. Au sens large, nous retrouvons trois grands types de méthodes de classification qui peuvent être utilisées. La première est la classification supervisée, la seconde la classification non supervisée et en troisième lieu il est possible d'utiliser des

techniques semi-supervisées. Ces trois avenues de traitement ont toutes leur pertinence bien qu'elles soient plus adaptées à certaines situations qu'à d'autres.

Nous expliquerons sommairement ici les trois catégories de méthodes de classification que nous venons de mentionner en soulignant certaines de leurs particularités, quelques techniques faisant partie de chacune de ces catégories ainsi que certaines des limitations et des contraintes qui leur sont reliées en fonction du contexte de gestion de catastrophe reposant sur l'utilisation de la télédétection. Pour obtenir des détails supplémentaires concernant la classification et la reconnaissance de forme, nous recommandons le livre « Pattern Classification » de (Duda, Hart et Stork, 2001) qui est un ouvrage compréhensif qui présente la majorité des concepts et une bonne sélection d'algorithmes et de méthodes reliés à ce domaine. Autrement, il est possible de retrouver de nombreux documents traitant du sujet de la classification et de la détection de changement comme (Richards, 2005), (Coppin et al., 2004) ou (Lu et al., 2004b). Ces revues ne sont pas à la fine pointe des derniers développements, mais permettent tout de même de se faire une bonne idée de la complexité du problème que représentent la classification et la quantification des différences existant entre des images satellitaires ou autre.

2.5.1 La classification supervisée

La classification supervisée est, dans bien des contextes, très performante et lorsque le contexte le permet, souvent privilégiée. Plusieurs différentes techniques de classification peuvent être considérées comme membres de cette famille d'algorithmes. Nous pouvons penser à certains types de réseaux de neurones artificiels, comme les perceptrons multicouches ou les réseaux à base radiale par exemple, mais d'autres techniques provenant du monde de la reconnaissance de forme peuvent aussi être mises dans cette catégorie. Le maximum de probabilité d'appartenance, la classification par arbre de régression ou de décision, les fonctions discriminantes, les séparateurs à vaste marge (SVM), les mélanges de gaussiennes et bien d'autres méthodes peuvent être utilisées pour effectuer la classification supervisée du contenu d'une image.

Ces méthodes ont toutes un aspect en commun, elles reposent sur l'utilisation d'exemples représentatifs de chacune des classes à identifier, qui constituent les données d'apprentissage, pour établir les équations et/ou les modèles qui servent par la suite à classer les autres échantillons pour lesquels la classe d'appartenance n'est pas connue. Il faut évidemment avoir des échantillons de chaque classe, identifiés à l'avance, ou du moins être en mesure de les extraire des images directement, par observation, et/ou par l'utilisation de données supplémentaires comme des relevés sur le terrain ou des documents d'inventaire du territoire. Ces documents sont souvent compilés par les divers paliers de gouvernements dans le cadre de projets de suivi de l'urbanisation ou de la conversion du territoire par exemple.

Par contre, ces méthodes ont une particularité qui les rend plus difficiles à mettre en œuvre dans notre contexte de gestion de catastrophe. Cette dernière est bien sur le fait qu'il est impératif d'avoir des exemples probants de ce qui est cherché pour être en mesure de trouver la solution au problème de classification tel que posé. Lorsque le contexte temporel n'est pas d'importance première, il est possible d'utiliser de nombreuses sources de données, autres que les images, pour être en mesure d'établir l'échantillonnage d'apprentissage qui sera utilisé pour la phase initiale du développement de la structure de classification. Lorsque le contexte temporel relié au traitement est très court, comme dans une situation de gestion de catastrophe, il est très difficile, voire même presque impossible, dans certaines situations, d'établir ce que sont ces exemples probants des classes et d'être en mesure d'en identifier suffisamment pour obtenir une solution de qualité.

Pour établir ces échantillons de référence, il est possible d'utiliser des méthodes de classification non supervisées comme l'agrégation ou les SOFM, de l'anglais *Self Organising Feature Map*, qui groupe des échantillons en fonction de leurs similitudes partagées d'une part et de leurs différences par rapport à l'ensemble des autres échantillons d'autre part. Ces techniques, si bien utilisées, permettent d'extraire des ensembles d'échantillons qui sont représentatifs de différents phénomènes présents dans les données utilisées. Par contre, il n'est pas toujours une tâche simple de trouver la signification d'un groupe donné qui a été

découvert par ce type d'algorithmes. Ceci implique nécessairement qu'un intervenant analyse les résultats et établisse cette correspondance conceptuelle manuellement.

Cette méthode de résolution tombe plutôt dans la famille des structures de classification semi-supervisées. Une fois que le modèle est établi, nous pouvons l'utiliser directement sans intervention supplémentaire pour classer d'autres images de la série et permettre d'obtenir des résultats qui sont souvent satisfaisants. Ceci est valide tant et aussi longtemps que les images sont assez similaires, qu'elles soient donc de même type et résolution que l'image originale ainsi que prises avec essentiellement les mêmes paramètres d'acquisition.

Comme nous pouvons nous en douter dans notre contexte de gestion de catastrophe, il est préférable d'utiliser les techniques de classification supervisées seulement si les données permettant d'établir l'échantillonnage d'apprentissage sont disponibles ou lorsque le cas est assez simple pour que le problème puisse être exprimé par « Ceci est ce que je cherche et le reste n'importe peu ». Cette contrainte simplifie considérablement la tâche reliée à la sélection des échantillons probants et permet d'établir la base de données d'apprentissage beaucoup plus rapidement, ce qui est d'importance capitale dans ce contexte.

Si le temps le permet par contre, les techniques de classification supervisées sont très précises et permettent d'atteindre des taux de classification correcte très élevés. De plus, lorsque le temps de traitement n'est pas un élément contraignant, il est possible d'utiliser différentes techniques de programmation et d'optimisation évolutives pour raffiner les modèles de classification développés et ainsi, soit d'augmenter le taux de bonne classification, de simplifier la description utilisée, du point de vue des variables utilisées, ou d'arriver à faire les deux simultanément. Dans ce dernier cas on parlerait d'optimisation multi critères.

2.5.2 La classification non supervisée

La classification non supervisée, quant à elle, repose sur le concept qui veut que dans un jeu de donnée associé à un phénomène quelconque, il y ait des groupes d'échantillons qui

correspondent à la structure interne des concepts représentés par ces données. Entre ces amas d'échantillons, qui forment des nuées plus ou moins compactes, il y a des zones qui sont moins peuplées et qui contiennent des échantillons ambigus, voire même aberrants, qui ne sont là que par exception ou distorsion de l'information représentée par les variables de traitement. En anglais, on parle des *outliers* d'une distribution d'échantillons. Ce sont des échantillons qui sont présents dans les données, mais qui ne font pas nécessairement partie de la structure interne spécifique aux phénomènes représentés par les données. En général ces points viennent rendre l'interprétation des données assez ardue.

Néanmoins, l'idée sous-jacente de cette famille d'algorithmes est que la structure interne d'un jeu de donnée peut être découverte « automatiquement » en utilisant des algorithmes spécialisés qui permettent de grouper les échantillons les plus similaires en classes et d'exclure de ces classes ceux qui sont soit trop différents de ces classes ou encore trop différents de tous les autres échantillons du jeu de données.

Nous retrouvons deux groupes de méthodes dans cette famille d'algorithmes, les procédures d'agrégation, *clustering* en anglais, comme les k moyenne, l'ISODATA ou le *mean shift* par exemple, et une branche de la famille des réseaux de neurones artificiels comme les SOFM que nous avons mentionnés précédemment. L'utilisation de ces techniques ne nécessite pas d'avoir d'échantillons étiquetés qui sont membres des classes recherchées bien que plusieurs méthodes d'agrégation peuvent en tirer profit, s'ils sont disponibles, pour identifier des points de départ pertinents pour l'analyse.

À première vue, ces méthodes sont donc conceptuellement plus intéressantes à considérer dans notre contexte de gestion de catastrophe. Mais, il y a cependant un problème relié à ces techniques qui est non négligeable et qu'il ne faut jamais perdre de vue. Presque tous les algorithmes que nous retrouvons dans cette famille ont des paramètres qui doivent être définis puis ajustés pour que les résultats obtenus soient pertinents. Nous comprenons qu'ici encore l'ajustement des paramètres peut devenir un processus itératif qui peut souvent être prohibitif du point de vue du temps de traitement.

Les algorithmes supervisés ont aussi plusieurs paramètres qui doivent être ajustés pour que les résultats de la modélisation du problème soient probants. Mais, en général, lorsqu'un jeu de paramètres a été défini pour résoudre un problème donné, il est possible de les utiliser comme point de départ pour résoudre d'autres problèmes portant sur des données du même type et d'arriver à une solution satisfaisante rapidement.

Le paramètre le plus difficile à définir lorsque nous utilisons des méthodes non supervisées comme l'agrégation est le nombre d'agrégats, *cluster* en Anglais, ou de classes désirées. De nombreux indices de validité d'un partitionnement des données existent et permettent d'évaluer la pertinence d'une solution. Mais, ici encore, il faut voir que nous tombons rapidement dans une boucle de traitement itératif qui peut être très longue et qui limite la pertinence de ces méthodes dans un contexte de gestion de catastrophe.

La question des mesures de validité de partitionnement et de l'impact de certains types d'erreurs sur les résultats d'agrégation sont détaillés dans (Milligan, 1980), (Milligan, 1981) et (Milligan et Cooper, 1985).

2.5.3 La classification semi-supervisée

Il nous reste à expliquer ce que sont les méthodes de classification semi-supervisées. Comme le terme le laisse présager, ces techniques sont guidées par un intervenant humain qui est en mesure de choisir la prochaine étape de traitement la plus judicieuse à utiliser ou de donner une rétroaction par rapport à la classification retournée qui est de type « C'est ça ou ce n'est pas ça ».

Qu'il s'agisse de la sélection de nouvelles variables, de l'identification des points de départ probants pour l'agrégation ou encore du choix d'une classe qui contienne ce qui est recherché et de la cibler pour des traitements supplémentaires, il en demeure que le choix est réalisé par une personne, ou une structure algorithmique conditionnelle pertinente, qui guide la suite des actions de classification.

Un exemple de ce que nous voulons dire est de mise pour permettre de bien saisir ce que ce type de méthodes permet de faire et surtout de faire ressortir comment nous devons conceptualiser le problème ainsi que la structure de résolution qui est requise par ces techniques. Prenons un cas typique qui revient souvent dans un contexte de gestion de catastrophe naturelle, une inondation. Dans cette situation, nous comprenons que ce qui est d'intérêt premier est d'une part les limites de débordement d'un cours ou d'une étendue d'eau et d'autre part les portions du réseau routier et des bâtiments qui ont été affectés par la crue. Nous voyons ici que ce qui a trait à la végétation et aux portions du territoire sous étude qui sont reliées à l'agriculture est d'intérêt secondaire au plus.

La question prépondérante est donc, « Comment isoler les portions de l'image où nous retrouvons de l'eau, des routes et des bâtiments du reste de l'image? », ce qui n'est pas nécessairement une tâche simple. Pour ce faire, nous pouvons procéder de différentes manières. Nous n'en donnerons qu'une, mais il ne faut pas croire que ce que nous proposons ici est la seule ou même de loin la meilleure manière de procéder.

Nous connaissons donc certaines choses qui nous permettent de réduire la complexité de l'exercice. En un premier temps, si nous pouvons éliminer tout ce qui est relié aux territoires agricoles et à la végétation, nous aurons réduit considérablement la diversité des phénomènes qu'il nous restera à classifier. Ceci est une considération importante qui est reliée à la taille considérable qu'ont les images satellitaires, surtout celles des dernières générations de capteurs à très haute résolution, qui dans bien des cas contiennent tellement d'informations, du point de vue de l'analyse de la base de données qu'elles forment, que le temps de traitement devient rapidement prohibitif. En excluant certaines zones d'une image, par des traitements initiaux simples, il est donc possible par la suite d'envisager l'utilisation de variables et d'algorithmes qui sont plus complexes à calculer et à utiliser tout en conservant un temps de traitement qui soit raisonnable.

Un analyste pourrait donc utiliser des variables du premier niveau, comme l'indice NDVI par exemple, pour effectuer une classification initiale du contenu de l'image ayant pour but

d'isoler tout ce qui se rapporte à la végétation. Une fois que la classification obtenue est jugée satisfaisante, il serait en mesure de concentrer ses efforts d'analyse sur des portions restreintes de l'image originale, réduisant de cette manière la taille du problème d'une part et les ambiguïtés potentielles qui auraient pu survenir lors de la reclassification si toutes les données étaient utilisées.

Comme nous l'avons mentionné, les phénomènes représentés par une image forment des nuages de points plus ou moins compacts dans l'espace des descripteurs. Lorsque nous nous intéressons à « découvrir » ces nuages, pour être en mesure d'établir leurs significations conceptuelles, il est avantageux de pouvoir concentrer l'analyse sur une portion restreinte de cet espace, ce qui permet une analyse plus pointue de ce qui se trouve dans une nuée donnée.

Donc, nous cherchons à éliminer les informations superflues pour obtenir un échantillonnage restreint qui permettra plausiblement d'obtenir des classes moins ambiguës au sein desquelles il sera probablement plus facile d'isoler les véritables objets d'intérêt. Ceci permet aussi de définir des combinaisons de variables de traitement spécifiques pour différentes classes sans qu'il ne soit nécessaire de trouver des combinaisons de variables qui permettent de séparer tous les objets en une seule passe. Ceci est un objectif louable lorsque nous considérons que plus le vecteur de description est considérable, plus le temps de traitement est long et moins il est probable que la représentation utilisée ne soit valide du point de vue des mesures de distance usuelles qui sont utilisées en classification pour établir des relations de proximité entre les échantillons.

Certains auteurs se penchent sur cette question à l'heure actuelle parmi lesquels les travaux de (Beyer et al., 1999), portant sur la validité du concept de distance en fonction du nombre de variables utilisées, font bien ressortir que dans plusieurs circonstances l'utilisation d'un trop grand nombre de variables empêche la découverte de la structure interne d'un jeu d'échantillons à classer. De leurs travaux ressort la constatation que dans plusieurs contextes il est préférable de ne pas dépasser 20 variables descriptives pour éviter de tomber dans une situation où la mesure de distance perd sa signification. Ceci n'est pas toujours le cas, bien

sûr, mais il est important d'être conscient de cette possibilité pour être en mesure de reconnaître les situations où nous sommes arrivés à la limite de probité des mesures de distance. Dans ces situations il est impératif de changer de méthode d'encodage de l'information plutôt que de ne faire qu'ajouter d'autres variables en espérant que cela résorbera l'ambiguïté décelée.

Il est intéressant de remarquer que ceci vient rejoindre le précepte du rasoir d'Ockham qui met de l'avant que lorsque nous cherchons à expliquer ou à décrire quelque chose, il est préférable d'utiliser la représentation la plus simple et d'éviter de multiplier les descriptions au-delà de ce qui est réellement utile dans un contexte donné.

Somme toute, bien que l'objectif de cette étape du traitement est d'automatiser la classification le plus possible, nous voyons qu'il est incontournable d'avoir un intervenant humain qui soit impliqué par le développement et la mise en œuvre d'une procédure de classification, et ce, surtout dans un contexte de télédétection relié à la gestion des ressources mises en cause lors d'une catastrophe majeure. Le choix judicieux d'algorithmes et d'enchaînements de traitements permet de réduire le temps d'analyse, mais ne peut être entièrement automatique vu la grande diversité de formats d'images et de type de phénomènes d'intérêt qui sont susceptibles d'être impliqués dans ces analyses.

Le lecteur averti aura remarqué que les trois familles de techniques que nous venons d'exposer sont configurées par un intervenant humain. Pour que nous puissions utiliser la classification supervisée, il faut nécessairement avoir d'emblée des données étiquetées. Ceci suppose donc qu'il y ait une phase initiale d'analyse des données qui permettrait par la suite d'établir le modèle ou les équations qui rendront possible la classification du reste des échantillons à traiter. Lorsque nous considérons la classification non supervisée, nous savons que cette étape initiale n'est pas forcément requise, par contre, il est nécessaire d'interpréter les résultats pour pouvoir définir ce qui est décrit par chacune des classes découvertes ainsi que sa pertinence par rapport au problème posé. Il y a donc une étape qui suit l'utilisation

d'un algorithme donné qui doit être réalisé par un intervenant humain pour établir la composante conceptuelle associée à une classe donnée.

La place de l'intervenant est plus évidente lorsque nous parlons de la classification semi-supervisée. Comme nous pouvons nous y attendre en entendant le terme, il y a une boucle de rétroaction entre le, ou les, algorithme(s) utilisé(s) et la personne qui guide l'analyse. On parle souvent de renforcement de pertinence, en anglais on utilise l'expression *relevance feedback*. L'idée est de donner à l'algorithme des exemples de ce que nous voulons et de ce que nous ne voulons pas. Puis, après un premier traitement, de raffiner la classification en excluant des éléments non pertinents ou en forçant l'inclusion d'objets ayant été exclus, mais qui auraient dû être acceptés et ajoutés à la base de données utilisée par les itérations ultérieures de la classification.

Des outils de recherche de contenu de ce type existent déjà dans les domaines muséologiques, du design et du multimédia qui permettent entre autres d'effectuer des recherches par thème ou par exemple. En télédétection et en analyse d'images satellitaires, nous retrouvons quelques exemples de cette approche d'analyse mis de l'avant dans (Costache, Maître et Datcu, 2007), et de la plateforme « Plato », qui est un prototype de développement de type *preuve de concept* utilisant certaines des notions mises de l'avant dans cet article, qui a été développée à Télécom ParisTech en partenariat avec le DLR et le CNES. Cette plateforme permet d'explorer et d'effectuer des recherches dans des bases de données diverses en utilisant le concept de la boucle de rétroaction pour raffiner les résultats de classification. Pour voir une démonstration du concept, on peut consulter la page internet de la chercheuse Marine Campedel de Télécom ParisTech¹⁵.

Peu importe la méthode qui est utilisée pour classer le contenu d'une image, le résultat de l'analyse est une combinaison de variables et de modèles de classification qui permet de séparer les échantillons en classes d'appartenances mutuellement exclusives. Dans le meilleur cas plausible, il n'y a qu'une combinaison de variables et de modèles qui permet de

¹⁵ <http://perso.telecom-paristech.fr/~campedel/>

traiter toute une image et d'obtenir la classification de l'usage du territoire désirée d'un seul coup. Par contre, comme nous le savons tous, il est rare que nous ayons à faire avec le meilleur des cas. Alors, la question se pose à savoir quelle structure de représentation il faudrait utiliser pour permettre de traiter tous les cas allant du meilleur au pire, et ce le plus efficacement possible?

2.6 L'identification et de la représentation des phénomènes d'intérêt

La question du format de représentation des variables et de la, ou des, méthode(s) de classification, de la structure décisionnelle donc, est assez complexe. Nous savons qu'il y a plusieurs types de descripteurs que nous avons groupés ici en trois niveaux. Chaque niveau de description est plus complexe et coûteux à utiliser que celui qui le précède autant du point de vue de l'interprétation de ce qu'il représente que du point de vue du calcul. Il est donc préférable de privilégier l'utilisation de descripteurs et de modèles de classification simples qui ont un niveau de complexité qui soit aussi bas que possible, ce qui suit la ligne de pensée mise de l'avant par le principe du rasoir d'Ockham.

Nous posons comme premier principe que lorsque nous pouvons retirer des données à traiter des classes entières en utilisant certains descripteurs et classificateurs simples, ce qui restera pourra être traité avec des descripteurs et classificateurs plus simples que si nous essayons de traiter l'ensemble des échantillons d'un seul coup.

Un bosquet et un tas de gravats peuvent être très similaires du point de vue de leur texture respective, mais en retirant la végétation du problème, il n'y a plus de bosquet et conséquemment il se pourrait qu'il ne soit pas nécessaire de calculer de descripteurs de texture pour retrouver les gravats. Par contre, il faut enlever la végétation du problème en premier lieu pour que ceci soit valide.

En y pensant, nous voyons que la classification de ces images est une séquence de traitements qui permet de restreindre progressivement le champ des possibilités de contenu

sur ce qui est d'intérêt premier. Nous en venons donc à penser qu'une structure décisionnelle hiérarchique semble propice à nos fins. Mais, comme nous parlons d'une structure qui diffère d'une situation à l'autre et qui est fortement dépendante de ce que nous cherchons à identifier, ainsi que du type d'image auquel nous avons affaire, alors comment pourrions-nous utiliser ce type de représentation?

Chacun des paliers de représentation de ce modèle conceptuel a son code exclusif qui est utilisé pour l'annotation des résultats de classification par les photo-interprètes. Cette représentation est beaucoup plus proche de ce que nous utilisons pour nous représenter notre monde que ce que les variables brutes nous permettent de comprendre. Essentiellement, il s'agit des étiquettes conceptuelles dont nous avons parlé plus tôt.

Il faut retenir que le but ultime de tout ce que nous décrivons ici est de comparer le contenu conceptuel de deux ou de plusieurs images. Comme nous avons un grand nombre de types et de résolutions d'images avec lesquels nous pouvons prévoir devoir travailler, il est important que ce qui est utilisé pour ventiler le contenu des images soit identique, peu importe leurs types.

Comme nous l'avons mentionné plus tôt, il y a un certain nombre de chercheurs (Alberga et al., 2007a; 2008) (Wald, 1997) qui, à l'heure actuelle, se penchent sur la question de la mise en relation des variables utilisées pour représenter différents phénomènes dans des images de types différents. Cette avenue de recherche se concentre principalement sur le développement de passerelles de correspondance que nous pourrions aisément qualifier de dures. Elles permettraient donc d'arriver à modéliser la correspondance entre les variables ayant servi à la classification du contenu d'images de différents types. Par contre, il n'y a aucune garantie que ces travaux permettront de développer des techniques de mise en correspondance généralisables à d'autres types de combinaisons sans qu'un effort de modélisation considérable doive être déployé pour traiter chaque nouvelle combinaison d'images.

Ces travaux sont encourageants et laissent présager que cette approche de mise en correspondance peut être développée et mise en œuvre. Mais, étant donnée la contrainte d'urgence qui sous-tend les travaux de télédétection dans le contexte de la gestion de catastrophe, il semble plus prudent de travailler simultanément sur une méthode qui ne dépende pas d'équations et de modèles explicites de mise en correspondance qui doivent être prédéfinis pour que la comparaison du contenu des images puisse être réalisée rapidement.

C'est à cette fin que nous avons posé que le développement de techniques de mise en correspondance reposant sur les étiquettes conceptuelles est une voie prometteuse à explorer pour résoudre cette problématique difficile. Peu importe les types d'images qui seront utilisées, leur contenu sera invariablement décrit presque de la même manière par tous les intervenants qui auront à classifier leurs contenus. Une fois l'étiquetage réalisé, il ne restera qu'à consulter des données textes qui donneront les codes de référence, les noms ainsi que des données statistiques concernant les différentes classes d'occupation du territoire présentes dans une image donnée. L'analyse de données de ce type est une chose que nous savons faire depuis longtemps, il s'agit essentiellement de décomposition syntaxique, *parsing* ou *syntactic analysis* en anglais, et que nous pouvons mettre en œuvre assez aisément en fonction de différents contextes d'analyse.

La représentation hiérarchique de l'information proposée ici est très près de notre modèle de représentation des concepts et des connaissances et conséquemment est plus propice à faciliter la communication des concepts reliés à l'occupation du territoire. Nous pouvons dire qu'il s'agit presque d'une représentation ontologique de cette masse de connaissances.

2.7 Exemple de traitement de classification de l'usage du territoire

Avant de conclure ce chapitre qui nous a servi à souligner les différentes étapes du traitement d'images satellitaires, dans un contexte de gestion de catastrophe reposant sur les résultats d'analyse de télédétection, nous donnerons ici un exemple concret de la chaîne de traitement utilisée. L'article que nous présentons traite de la classification d'une image à haute

résolution pour en établir l'occupation du territoire sans qu'il n'y ait de palier de détection de changement, ce qui est le thème du prochain chapitre. Nous avons choisi cet article parmi plusieurs, car il contient beaucoup d'information sur le problème, mais surtout parce que les différents éléments que nous avons soulignés dans cette section y apparaissent presque tous. L'article en question est « Object-based urban detailed land cover classification with high spatial resolution IKONOS imagery » de (Pu, Landry et Yu, 2011). Cet article traite de la classification de l'usage du territoire d'une zone de la ville de Tampa en Floride. Cette région est un bon exemple du type de données qui ont à être traitées en télédétection et peut être considérée comme représentative des scénarios plausibles de gestion de catastrophe, car la zone contient des portions de territoire présentant des caractéristiques urbaines ainsi que naturelles.

Les données sources proviennent du satellite IKONOS et sont une image panchromatique à 1,0 m de résolution allant de 526 à 929 nm et une image multispectrale à 4,0 m de résolution composée de quatre bandes, une bleue allant de 445 à 516 nm, une verte allant de 506 à 595 nm, une rouge allant de 632 à 698 et une proche infrarouge allant de 757 à 853 nm. Ces images furent fusionnées pour obtenir une représentation multispectrale à une résolution de 1,0 m comme celle de l'image panchromatique à l'aide de la technique de rehaussement par composantes principales. Les auteurs mentionnent que, bien que cette technique soit reconnue pour effectuer ce type de combinaison de l'information image, qu'il n'est en rien garanti que de légères déformations de l'information originale contenue par les bandes de l'image multispectrale ne viennent affecter l'évaluation de la qualité de classification résultante. Par contre, ils soulignent que ce type d'image rehaussée est reconnu pour permettre une meilleure classification de la végétation forestière et des zones urbaines.

D'autres sources de données ont servi pour les analyses menées pour aider à établir les échantillons représentatifs de chaque classe d'occupation du territoire recherchée. Ces données sont des images multispectrales aéroportées, de différentes sections de la zone sous analyse, ayant 0,3 m de résolution et comportant trois bandes; une rouge, une bleue et une verte.

L'objectif expérimental de ces travaux est de comparer la qualité de la classification de l'usage du territoire obtenue de l'utilisation de descripteurs pixelliques d'une part et de descripteurs de type objets image de l'autre. Entre autres, cette étude vise à vérifier si l'utilisation d'objets image, et des mesures leur étant associées, permet de réduire l'incidence du phénomène de classification d'aspect poivre et sel qui résulte de l'utilisation de mesures pixelliques pour effectuer la classification d'images à haute et à très haute résolution.

La comparaison de la classification résultante à d'autres images ne fait pas partie de l'exercice, donc l'aspect de détection de changement n'entre pas en considération dans cet article. Le recalage des images non plus ne fait pas partie des opérations requises par ce travail d'analyse de contenu puisqu'il n'y a qu'une seule image qui est traitée.

Les méthodes de classification utilisées sont un réseau de neurones de type perceptron multicouche et un classificateur à distance minimale. Les deux méthodes utilisées sont des techniques supervisées de classification. Donc, il est indispensable d'avoir des échantillons étiquetés de chaque classe d'intérêt pour être en mesure de les utiliser. Les échantillons de la base d'apprentissage ont été établis par observation en utilisant les images aéroportées complétées des données d'un recensement écologique mené en 2006-2007 par la ville de Tampa.

Pour être en mesure de comparer des mesures pixelliques à des mesures de type objet image, il a fallu trouver des descripteurs qui pouvaient être extraits de l'image pour les deux cas de figure. Comme les descripteurs géométriques de forme ne peuvent être utilisés pour décrire les pixels, ces descripteurs furent évalués dans un deuxième volet de leurs travaux ne reposant que sur les descripteurs d'objets images et visant à évaluer si le nombre de descripteurs utilisés permet d'améliorer la qualité de la classification de manière significative. Deux jeux de descripteurs ont donc été utilisés pour ces travaux.

Le premier jeu de descripteurs est composé des quatre bandes rehaussées de l'image multispectrale, de trois bandes HSI calculées des bandes 1,2 et 3 de l'image Ikonos, d'une

bande composée de l'indice SAVI, (*soil adjusted vegetation index*) qui est un indicateur du type de l'indice NDVI qui a été mentionné plus tôt, et d'une bande d'information de texture extraite de la bande 4, proche infrarouge, de l'image multispectrale et contenant de l'information d'homogénéité et de cooccurrence de valeurs. Tous ces descripteurs ont été préparés à l'aide du logiciel ENVI et ajoutés à l'image originale comme couches supplémentaires d'information.

Le deuxième jeu de descripteurs est constitué des neuf premiers auxquels sont ajoutés 27 autres mesures relevant plus spécifiquement des objets image. Ces 27 autres variables comportent 23 variables spectrales, neuf de texture et quatre caractéristiques de forme. Il est évident que ces descripteurs ne peuvent être utilisés pour la comparaison de la performance de classification entre les mesures pixeliques et celles calculées à partir des objets image. Elles servent plutôt à permettre d'évaluer l'impact du nombre de descripteurs et de leur type sur la qualité de la classification en utilisant différentes quantités de descripteurs avec les mêmes méthodes de classification.

Les objets image qui ont été utilisés pour le calcul de ces descripteurs supplémentaires ont été obtenus par segmentation en utilisant une procédure de segmentation hiérarchique du logiciel eCognition 5.0 de la compagnie Definiens. Les 9 variables initiales ont été utilisées pour cette opération de segmentation.

Il est intéressant de noter que, bien qu'il soit assez évident qu'il soit essentiel d'avoir des objets pour mener des analyses basées sur les objets, la plupart des auteurs omettent de mentionner comment ils arrivent à la représentation par objet. Il arrive même dans bien des cas qu'il y ait confusion au niveau du concept même de l'extraction des objets qui se traduit par des propositions du type : « Les mesures pixeliques ne sont pas utilisées ici, car... ». Ceci peut laisser croire qu'elles ne servent pas au traitement ou qu'elles ne contribuent que de manière insignifiante à la segmentation. Par contre, du point de vue du traitement d'image, il est inconcevable qu'il soit possible de réaliser la segmentation du contenu d'une image sans avoir recours à des descripteurs aussi simples soient-ils, autrement comment serait-il

possible d'établir une mesure de similitude suffisante pour permettre de grouper des pixels voisins?

Par la suite, pour éliminer la redondance potentielle de certains de ces descripteurs, les auteurs ont mené une analyse statistique reposant sur l'analyse discriminante¹⁶, *stepwise discriminant analysis* (SDA) en anglais, pour identifier les variables les plus probantes à utiliser. Cette approche permet de limiter le nombre de variables à celles qui permettent réellement d'expliquer la variation de contenu dans un jeu d'échantillons. Comme il est préférable d'utiliser des variables qui maximisent la séparation entre les différentes classes et qui minimisent la variabilité intra classe pour simplifier la tâche de classification, il est très utile dans bien des situations de procéder à des analyses statistiques de ce type pour nous permettre d'utiliser des descriptions qui sont justifiées et pertinentes.

27 des variables originales ont été retenues comme ayant une contribution significative à la description des classes représentées par les échantillons étiquetés utilisés pour cette analyse. Pour mener ces essais, les auteurs ont utilisé un module de traitement statistique du logiciel SAS.

La procédure de classification qu'ils ont utilisée est hiérarchique et est divisée en trois paliers de classification. Au premier niveau la classification permet de séparer les zones où il y a de la végétation de celles qui n'en n'ont pas. Cette division initiale du contenu a été réalisée à l'aide d'un seuillage de la variable SAVI. Le seuil a été établi par observation de l'histogramme de cette variable puis ajusté manuellement pour obtenir un résultat qui soit visuellement acceptable. Les deux autres niveaux de classifications permettent de décomposer ces deux groupes de bases en type de couverture végétale d'une part et en type de couverture urbaine, sablonneuse ou d'eau de l'autre.

¹⁶ L'analyse factorielle discriminante ou analyse discriminante est une technique statistique qui vise à décrire, expliquer et prédire l'appartenance à des groupes prédéfinis (classes, modalités de la variable à prédire, ...) d'un ensemble d'observations (individus, exemples, ...) à partir d'une série de variables prédictives (descripteurs, variables exogènes, ...)

http://fr.wikipedia.org/wiki/Analyse_discriminante, consulté le 25 septembre 2012.

Nous voyons ici que ce que nous disions plus tôt au sujet de la classification hiérarchique fait déjà partie de l'approche de résolution adoptée dans cet article spécifique, mais aussi, comme les auteurs le mentionnent dans le texte, par bien d'autres chercheurs du domaine.

Ce que nous mentionnions au sujet de la structure de classification progressive est aussi utilisé ici pour effectuer la classification de l'usage du territoire par paliers successifs. En premier lieu deux grandes classes, qui sont faciles à séparer, ont été identifiées en utilisant une variable simple, puis la classification de ces deux protoclasses a été réalisée séparément pour arriver à une décomposition secondaire qui peut elle aussi être reprise pour en extraire un type d'information spécifique ou encore d'autre sous classifications tertiaires.

Pour ce qui est de la classification proprement dite, les auteurs de cet article ont eu recours à deux méthodes différentes. La classification à l'aide du réseau de neurones a été réalisée avec un logiciel dédié qui n'est pas nommé et qui a été développé par Y. Pao. Pour la classification à distance minimale, ils ont utilisé une procédure du logiciel SAS qui utilise la distance de Mahalanobis pour établir la proximité des échantillons des différentes classes modélisées.

Les résultats de leurs travaux soulignent qu'il est bel et bien possible de minimiser, voire même presque d'éliminer, le phénomène de classification poivre et sel en utilisant des mesures extraites des objets image, obtenus par segmentation, plutôt que des mesures pixelliques. Cette amélioration provient en partie du fait que la segmentation de l'image en objets permet de diluer l'impact des variations locales des variables de base par le calcul de la moyenne sur la région de chacune des variables, ce qui devient le descripteur équivalent. Donc, la représentation finale qui est utilisée pour la classification permet de regrouper un nombre donné de pixels, qui peuvent avoir des variations notables au sein de l'objet, mais qui sont représentés au final par une mesure uniforme, non morcelée, pour la totalité de l'objet résultant. Les variations locales se fondent donc dans le tout et nous obtenons une représentation du contenu de chaque objet qui est plus homogène que les valeurs de ses pixels constitutants ne le sont.

Pour ce qui est de l'analyse de l'impact du nombre de descripteurs sur la qualité de la classification, ils ont mené plusieurs essais pour être en mesure de comparer les classificateurs et les nombres de descripteurs entre eux de manière probante et significative. Ce qu'ils ont découvert est que le nombre de descripteurs a un impact sur la qualité de la classification finale du point de vue de l'expérience dans son ensemble. Par contre, d'un essai à l'autre, la performance de classification était beaucoup plus variable que ce qu'ils ont obtenu lors de leurs premiers tests portant sur la pertinence de différentes combinaisons de mesures. Cette variabilité des résultats, lorsqu'analysée d'un point de vue statistique, a révélé que l'amélioration de la performance d'un classificateur donné, par rapport à lui-même, n'était pas statistiquement significative dans leur contexte d'analyse. Cette constatation vaut pour les deux types de classificateurs qu'ils ont utilisés lors de leurs tests.

En ce qui concerne la différence de qualité de classification entre les deux types de classificateurs évalués, ils ont trouvé que le réseau de neurones était supérieur au classificateur à distance minimale pour un nombre équivalent de descripteurs, et ce, de manière statistiquement significative.

Nous voyons qu'au final les auteurs ont développé un classificateur hiérarchique qui repose sur l'utilisation de 27 variables qui permet d'arriver à un taux de classification correcte de l'usage du territoire dans la région de Tampa en Floride de 81,53% qui est établi en utilisant 441 pixel pour lesquels la classe réelle est connue. Ce résultat est atteint par classification successive des données image, pixelliques en un premier temps puis des objets image obtenus du traitement par la suite. Pour isoler au premier niveau de décomposition les zones avec couverture végétale des autres zones, un seuillage simple est utilisé. Des deux protoclasses résultantes, une classification secondaire plus précise, est obtenue en utilisant un réseau de neurones pour séparer leur contenu en sous-classes plus descriptives des réels phénomènes d'intérêt en télédétection.

Pour revenir sur ce que nous avons dit sur la pérennité du savoir et la réutilisabilité des modèles de classification, nous voulons souligner que, bien que nous n'ayons pas mentionné

les différents paramètres utilisés lors de ces expériences, le contenu de base de ce qui pourrait être utile à mémoriser pour faciliter la réutilisation des résultats est décrit dans cette section. Nous avons mentionné l'imageur qui a été utilisé, le type des images utilisées, comment elles ont été prétraitées, les variables supplémentaires qui ont été extraites, celles qui ont été retenues à la suite d'une analyse statistique, les types de classificateurs qui ont été utilisés, le taux de succès de classification obtenu du meilleur des deux ainsi que la procédure de traitement séquentielle avec les variables pertinentes à utiliser pour les différents paliers de classification établis.

S'il venait à y avoir une autre analyse de ce type à réaliser pour la même région avec des données images provenant du même satellite, nous comprenons que la disponibilité de ces données pourrait accélérer considérablement le traitement et l'analyse de l'image. Ceci vient principalement du fait que l'analyste n'aurait qu'à consulter l'enregistrement de ce que nous venons de souligner pour être en mesure de reproduire la même logique de résolution qui est représentée par le modèle de traitement que ces chercheurs ont développé.

Ici nous trouvons qu'il est important de souligner un autre fait très important qui est exprimé dans cet article mais qui est aussi présent dans de nombreux travaux traitant de la télédétection. Nous avons mentionné les logiciels qui ont été utilisés par les auteurs pour arriver aux résultats qu'ils ont obtenus. Nous remarquons qu'il y en a plusieurs, ce qui nous pousse à souligner qu'il est fort probable qu'en plus des travaux qu'ils menaient, ces chercheurs ont sûrement dû développer des procédures de transcription de données pour permettre le passage d'une plateforme de travail à l'autre. Ceci diminue forcément l'efficacité du traitement pris du point de vue de l'analyse de télédétection proprement dite. Il est très fréquent que les chercheurs aient à utiliser de nombreux logiciels pour être en mesure de réaliser toutes les opérations requises pour une analyse donnée.

Ceci nous semble difficile à concilier avec la notion d'urgence que nous soulignons depuis le début de notre analyse. Ne semble-t-il pas que l'incorporation de tous les éléments que nous avons fait ressortir dans l'analyse de cet article ainsi que de ceux que nous avons mentionnés

jusqu'ici au sein d'un seul outil de traitement permettrait non seulement d'éliminer la possibilité qu'il y ait erreur de transcodage tout en permettant d'augmenter l'efficacité, et donc la vitesse, à laquelle ces travaux pourraient être réalisés?

Nous reviendrons sur ceci plus tard dans ce document. Pour l'instant nous passerons à l'analyse de ce que signifie la détection de changements en télédétection et surtout dans le contexte de la gestion de catastrophe.

CHAPITRE 3

LA DÉTECTION DE DIFFÉRENCE ET DE CHANGEMENT EN TÉLÉDÉTECTION

Dans un contexte de gestion de catastrophes, nous comprenons que l'intérêt principal ne réside pas dans l'analyse du contenu identifié par la classification d'une image en soi, mais plutôt dans la comparaison de plusieurs images en vue d'établir les différences existant entre elles. Nous devons donc procéder à la sélection d'images propices à permettre d'identifier les classes d'occupation du territoire que nous cherchons à comparer en un premier temps. Une fois que nous avons identifié et obtenu les images appropriées, il faut utiliser la classification de leur contenu pour isoler les objets ou les classes conceptuelles d'intérêt pour pouvoir finalement arriver à les comparer puis à quantifier leurs différences en fonction des différents thèmes d'intérêt d'une situation donnée.

Ce qui est relié à la détection de ces changements est donc une étape qui suit les autres blocs de traitement qui ont été explicités jusqu'ici. Dans certains cas, une première phase de détection des différences qui existent entre deux jeux de données peut être réalisée au niveau de la classification initiale des échantillons. Par contre, dans cette situation, il est presque inévitable que le traitement initial doive être suivi par une classification supplémentaire et/ou par une analyse manuelle des résultats pour être en mesure d'établir ce que les changements survenus aux échantillons identifiés sont réellement.

3.1 La différence et le changement

En télédétection nous retrouvons deux types d'analyses portant sur les différences existant entre des images satellitaires. Ce qui distingue ces deux types de travaux est relié aux données utilisées ainsi qu'au contexte motivant l'analyse d'images d'une région déterminée. L'essence de cette distinction est reliée au concept de données liées et découle des concepts sémantiques associés aux termes différence et changement.

Pour nous aider à cerner ce que ces mots veulent dire, nous donnerons premièrement les définitions de ces termes pour nous permettre de faire ressortir ce que chacun d'eux sous-entend dans le contexte de la télédétection.

3.1.1 La différence

Penchons-nous en un premier temps sur le terme différence, qu'est-ce qu'une différence décelable entre deux, ou plusieurs, jeux de données? Ces différences sont-elles ce que nous pourrions appeler des changements? Si nous décelons une différence entre deux images, y a-t-il nécessairement eu un changement?

Qu'entendons-nous par différence lorsque nous parlons d'un événement ou d'une constatation provenant d'une observation? Pour nous permettre de bien décrire ce que ce concept sous-tend, nous utiliserons une définition mathématique provenant de la théorie des ensembles qui veut que :

« Soit deux ensembles A et B inclus dans un ensemble E. On appelle différence de l'ensemble A par l'ensemble B, l'ensemble noté $D = A - B$ des éléments x de E qui appartiennent à A mais qui n'appartiennent pas à B. »¹⁷

Ce que ceci implique dans le contexte de la télédétection et de la détection de changement est qu'il peut y avoir soit des différences entre des jeux de données qui sont mutuellement exclusifs, qui ne sont pas des changements, ou des différences entre des jeux de données qui sont liées, ce qui peut constituer dans certaines situations, ce que nous qualifierions de changements.

Pour illustrer ceci, pensons à deux zones urbaines, comme celles de Montréal et de Québec par exemple, qui sont suffisamment distantes pour ne pas apparaître en même temps au sein

¹⁷ Tiré de <http://www.granddictionnaire.com/>, site de l'Office de la Langue Française du Québec le 23 avril 2012.

d'une image satellitaire, mais qui sont photographiées presque à la même heure. Si les images proviennent du même satellite et qu'il n'y a pas de facteurs externes, comme les conditions climatiques qui viennent modifier les images, nous pouvons nous attendre à ce que la représentation soit très similaire du point de vue de la radiométrie.

Dans cette situation, parler de changements serait inutile, car il n'y a aucun lien entre les pixels de chacune des images et, conséquemment, il est impossible de pouvoir stipuler que tels ou tels pixel, ou portion de l'image, aient subi un changement entre la première et la deuxième instance de données.

Nous pouvons cependant supposer que l'occupation du territoire, décrite par chaque image, est différente et que chacune des classes représentées dans l'une ou l'autre des images, peut être comparée qualitativement et/ou quantitativement pour établir les différences existantes entre l'occupation du territoire de la ville de Québec par rapport à celle de Montréal pour une classe donnée.

Conséquemment, si nous nous intéressons à analyser la différence entre deux jeux de données représentant deux zones géographiques qui n'ont pas de recoupement de surface et qui ne sont donc pas liées d'un point de vue statistique, nous ne pouvons parler de changement. Ceci s'applique à tout jeu de données non liées, toute discipline confondue.

3.1.2 Le changement

Maintenant que nous sommes en possession du concept général de ce qu'est une différence, que pouvons-nous dire du changement? L'Office de la langue française du Québec définit un changement comme étant une :

« Modification par rapport à une situation antérieure. »¹⁸

¹⁸ Tiré de <http://www.granddictionnaire.com/>, site de l'Office de la Langue Française du Québec le 23 avril 2012.

Plus spécifiquement on peut affirmer qu'en télédétection, pour un pixel, une région ou un objet image :

« Le changement désigne le passage d'un état à un autre. »¹⁹

Le changement est donc un cas spécial de différence qui est contraint par la dépendance temporelle et géographique d'échantillons correspondants. Les échantillons doivent donc être liés. Si nous ne considérons pas les mêmes objets, à deux moments distincts, nous ne pouvons pas parler de changement, car il n'y a pas de relation entre l'état initial et l'état final qui nous permettrait d'affirmer qu'il y a eu ou non passage d'un état à un autre.

Nous comprenons maintenant qu'afin que le terme changement puisse être utilisé, il est impératif qu'il y ait une relation entre les jeux de données qui puissent exprimer la notion : « Avant nous avions ceci et maintenant nous avons... ». Il doit donc nécessairement y avoir transition entre deux états distincts mesurés, ou du moins mesurables, à des instants différents pour un même « objet » pour que nous puissions utiliser le terme changement. Ici nous devons nous souvenir que l'« objet » peut être un pixel, une région isolée par une procédure de segmentation, un objet image proprement dit ou tout autre élément identifiable dans les deux images ou autres instances de données.

Si nous reprenons l'exemple géographique de Québec et de Montréal nous pouvons dire qu'il est possible d'identifier les différences de peuplement des différentes classes d'occupation du territoire. Dans ce contexte, ceci revient à dire qu'il y a eu croissance ou décroissance de la surface au sol attribuable à une classe donnée, ou d'une définition d'une ou des classes d'occupation du territoire isolées dans les images des deux villes au sens des variables et/ou des prototypes descriptifs des classes. Par contre, nous ne pouvons dans cette situation parler des changements entre Montréal et Québec, ce qui est foncièrement dépourvu de sens, car les données ne sont pas liées. Nous pouvons cependant stipuler qu'entre la première et la seconde image de Québec, ou de Montréal, il y a eu changement dans tel ou tel quartier par

¹⁹ Tiré de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Changement> consulté le 23 avril 2012

rapport à telle ou telle classe d'occupation du territoire. Ceci pourrait nous mener à mettre de l'avant des affirmations telle que :

« Entre 19ii et 19jj, à Québec il y a eu $y\%$ de croissance des zones constituées de parcs industriels et des infrastructures leur étant reliées par rapport à une croissance de $z\%$, pour la même conversion d'usage du territoire, pour la région métropolitaine de Montréal pour la même période. Il y a donc une différence de croissance de $(y-z)\%$ entre les secteurs industriels de Québec et de Montréal, ce qui peut être indicateur du potentiel de croissance économique de... ».

Cette affirmation est une expression quantifiant la variation de l'occupation du territoire en fonction d'une combinaison de classes pour deux régions géographiquement séparées. Ceci suppose donc qu'il y ait eu analyse d'au moins quatre images pour que nous puissions établir la variation d'occupation du territoire pour chacune des villes. Pour ce faire, il faut nécessairement qu'il y ait eu analyse de deux images par ville, « les instants », qui seront comparés par la suite en fonction d'un critère donné. Nous avons donc deux composantes à cette affirmation, d'une part nous avons le changement d'occupation du territoire associé à l'infrastructure industrielle des villes de Québec et de Montréal, ce qui constitue une analyse de changement proprement dite, et de l'autre nous retrouvons la différence de croissance de ces classes entre ces deux villes pour une période donnée que nous classons comme une analyse de différence.

3.2 Les types de changements et de leur caractérisation

Lorsque nous nous penchons sur la question de la variation de l'occupation et de l'usage du territoire d'une région donnée, nous nous intéressons à des changements qui s'échelonnent sur d'assez longues périodes dans la plupart des contextes d'analyse. Nous pouvons penser à l'étalement urbain, à la désertification ou encore à la conversion de zones agricoles au profit du développement périurbain par exemple.

Il est important de noter que la conversion de l'utilisation du territoire est souvent ce qui nous intéresse dans l'analyse d'images satellitaires, car il est très important pour nous de pouvoir effectuer le suivi de l'évolution de notre environnement pour que nous puissions évaluer l'impact qu'ont nos activités sur notre écosystème.

Ce contexte d'analyse est relié au traitement de données satellitaires dans des travaux de recherche provenant de plusieurs domaines tels que la géographie, l'analyse d'impact environnementale ou l'urbanisme par exemple. Ces contextes d'analyse présupposent une échelle temporelle assez longue pour mener des analyses qui sont typiquement développées analytiquement avant d'être mises en œuvre. Ce contexte nous permet donc de nous abstraire d'une certaine portion de la complexité avec laquelle nous devons composer dans une situation de gestion de catastrophe.

À l'antipode de ce qui précède, nous retrouvons des situations ponctuelles qui sont provoquées par des événements catastrophiques. Dans ce cas de figure, le délai disponible pour réaliser les traitements et les analyses est très court. Ce contexte d'analyse est donc essentiellement une réaction à une situation catastrophique soudaine et imprévisible. Il va de soi qu'ici le principe directeur qui sous-tend les travaux est l'urgence de la situation. Il est donc impératif d'utiliser toutes les sources de données qui sont disponibles pour permettre d'effectuer l'analyse des changements survenus dans la zone affectée. Lors d'une telle situation, l'échelle temporelle est très courte en ce qui concerne le travail à faire.

Les types de changements auxquels nous nous intéressons dans cette situation sont spontanés et n'ont habituellement pas de précurseurs immédiats qui pourraient être des indices des changements à venir. Lorsque nous analysons une région pendant une longue période, à l'aide de STIS par exemple, les tendances de changement peuvent nous aider à prévoir le type de variations qui peut survenir à une classe donnée, ce qui peut, dans certains cas, être modélisable. Lorsque le travail de suivi des changements s'échelonne sur une longue période, ces informations peuvent être utilisées pour contraindre les types de conversions acceptées à des scénarios réalistes. Cette possibilité mime d'une certaine manière certains de nos

mécanismes d'interprétation de l'information visuelle. L'exemple du poteau dans la forêt, mentionné plus tôt, est relié à ceci. Un concept fonctionnel régit ce que nous interpréterons en fonction de ce qui est plausible pour un contexte donné.

Par contre, dans une situation de catastrophe il n'est pas possible de modéliser les tendances de conversion plausibles pour une région et d'arriver à inclure ces informations au processus d'analyse étant donné la conversion d'allégeance spontanée des pixels d'une classe vers une autre.

Nous comprenons que la distinction qui existe entre ces deux contextes temporels a un impact considérable sur la conceptualisation du problème ainsi que sur le choix des techniques qui seront utilisées pour réaliser le traitement des images et aussi sur ce qui sera mis en œuvre pour effectuer la détection, la quantification et le suivi des changements survenus.

À titre d'exemple de ce que ces contextes de résolution impliquent, prenons un cas qui est d'actualité et d'intérêt général, la conversion du territoire agricole comme ce qui est traité dans (Rudorff et al., 2009). Nous assistons depuis quelques années à une forte croissance du prix de certaines denrées alimentaires. Nous savons que ce phénomène est en partie dû au développement de l'agriculture dédiée à la production d'éthanol qui sert à contrer la raréfaction des produits combustibles dérivés du pétrole. À ceci il faut ajouter un autre élément qui contribue à ce phénomène, les conditions météorologiques défavorables qui ont affecté plusieurs pays récemment et qui ont provoqué des pénuries de certains produits alimentaires. Pour nous permettre d'évaluer la contribution de chacun de ces éléments à la croissance du prix des denrées alimentaires, nous pouvons étudier d'une part les taux de conversion de territoires agricoles, qui seront stables d'une année à l'autre et modélisable, et de l'autre, la portion des territoires agricoles qui ont subi des dommages liés aux conditions météorologiques. Ces derniers ne devraient pas présenter les mêmes caractéristiques d'année en année, car l'impact des conditions météorologiques ne devrait durer qu'une année ou que quelques années au plus.

Cet exemple nous permet de souligner les caractéristiques importantes des changements qui peuvent être analysés en utilisant des images satellitaires. La première est que les changements du type conversion d'utilisation sont progressifs et que leurs tendances peuvent être suivies à relativement longue échelle. Par contre, il n'en est pas de même pour les changements provoqués par des événements ponctuels comme les conditions météorologiques ou les catastrophes naturelles ou autre.

Néanmoins, ces deux types de changements provoqueront des phénomènes similaires, mais à des échelles temporelles bien différentes. Intuitivement, nous pouvons nous attendre à beaucoup de conversion de l'occupation du territoire, car il s'agit du mode principal d'évolution de notre environnement.

Par contre, lorsque nous parlons de catastrophes majeures il y a d'autres types de changements auxquels nous pouvons nous attendre. En fonction d'une région spécifique, il est fort probable que nous soyons en mesure d'identifier et de quantifier des conversions temporaires comme le débordement d'une rivière dans une zone inondée par exemple. Mais encore, il peut arriver que des phénomènes, jusqu'alors inexistants dans une région, apparaissent soudainement comme la désertification de l'est de l'Afrique après l'apparition de la faille du Rift²⁰, ou encore que d'autres classes qui étaient présentes dans une région disparaissent. Après une éruption volcanique d'envergure, il est fort probable qu'il y ait, pour une région donnée, disparition de certains types d'occupation du territoire qui sont à proximité du volcan comme l'agriculture ou des zones résidentielles et apparition d'autres types d'occupation du sol.

La probabilité que ce type d'apparition/disparition de classes se produise est tout de même faible, car la taille des images qui sont utilisées est considérable. Il est donc peu probable que des phénomènes de ce genre affectent toute la région décrite par une image uniformément. Par contre, les effectifs de chaque classe, ici nous parlons du nombre de pixels à l'étude appartenant à une classe, varieront plus ou moins selon l'ampleur du phénomène. Le suivi de

²⁰ http://fr.wikipedia.org/wiki/Rift_Est-africain, consulté le 25 septembre 2012.

ces variations de peuplement pourra donc être utilisé comme indicateurs de changements potentiels.

Il est important de répéter que pour que nous puissions dire qu'il y ait eu un changement il faut que les données soient liées. Qu'il s'agisse d'une zone géographique, d'un groupe d'intervenants ou encore de la tenue de soirée de madame, tout changement implique qu'il y a eu variation de l'état d'une entité entre deux instances de mesure. Si les données ne sont pas liées, temporellement et géographiquement dans notre cas, il convient d'utiliser différence plutôt que changement.

Nous voyons que c'est de l'analyse des résultats de la classification du contenu conceptuel des images que nous vient la possibilité d'effectuer une comparaison de l'occupation du territoire d'une région donnée. Sans cette classification du contenu des images en classes conceptuellement uniformes et mutuellement exclusives il serait essentiellement impossible de comparer les images en fonction de leur composition sémantique.

Donc, avec seulement les images, dépourvues de la signification que nous associons à leur contenu, nous ne pouvons essentiellement rien faire d'un point de vue analytique et descriptif. Ces images ne sont que des séquences de valeurs numériques qui en soi ne nous offrent rien d'utile si nous ne nous attardons pas à les décortiquer et à classifier leur contenu en classes conceptuellement homogènes. Par contre, une fois la représentation conceptuelle établie, nous pouvons de cette nouvelle représentation réaliser les opérations d'analyse de la variation du contenu conceptuel des images d'une série.

Comme plusieurs combinaisons de données sources peuvent être envisagées pour ce type d'analyse et que chacune d'elles a des particularités qui lui sont propre il faudra en premier lieu reconnaître et évaluer ces caractéristiques pour être en mesure de choisir la meilleure méthode de comparaison de leur contenu. Nous poursuivons ce chapitre avec l'analyse de ces combinaisons puis nous passerons par la suite à une description de ce que ces combinaisons

impliquent du point de vue du traitement et de l'analyse d'images en vue d'identifier leurs variations et différences de contenu.

3.3 Les combinaisons d'images sources et leurs contraintes fonctionnelles

Pour nous permettre d'utiliser des images satellitaires d'une manière efficace il est impératif de connaître les combinaisons de données images qui s'offrent à nous et de les considérer en fonction des limitations et des contraintes fonctionnelles que nous avons mentionnées aux chapitres précédents. Cependant, il faut surtout être en mesure d'établir si les images sont comparables du point de vue de leurs types et résolutions ou non ainsi que ce qu'elles nous permettront de décrire par leur traitement.

Nous pouvons énumérer les cas de combinaisons d'images qui peuvent se présenter de la manière suivante :

- Les images proviennent du même satellite et n'ont pas subi de variations de leurs conditions d'acquisition : ces images devraient donc pouvoir être recalées pour permettre l'analyse de leurs différences,
- Les images proviennent du même satellite, mais ont subi des variations de leurs conditions d'acquisition : selon leurs types et résolutions, ainsi que de l'ampleur des variations, ces images devraient théoriquement pouvoir être recalées pour permettre l'analyse de leurs différences. Cependant, il est très probable que des erreurs de recalage résiduelles soient présentes, ce qui pourrait grandement affecter les résultats obtenus à l'aide de certaines des techniques de détection de changement usuelles,
- Les images proviennent de capteurs différents, de même type, ayant essentiellement la même résolution : ces images devraient théoriquement pouvoir être recalées. Il est à noter que dans cette situation il est fort probable qu'il soit nécessaire d'effectuer une correction d'ordre radiométrique pour pouvoir mener une comparaison probante de leurs contenus respectifs et, ici

encore, il est très probable que des erreurs de recalage résiduelles soient présentes avec la même conséquence que celle mentionnée précédemment,

- Les images proviennent de capteurs de types différents, ayant essentiellement la même résolution : certaines de ces combinaisons d'images devraient pouvoir être recalées, mais les méthodes de recalages pertinentes dans cette situation font partie de ce que la communauté de recherche œuvrant en traitement d'image et en télédétection est en cours d'établir. Il n'y a donc aucune garantie qu'une combinaison d'images données puisse être recalée avec les méthodes actuelles,
- Les images ne sont essentiellement pas comparables, autant du point de vue des variables, de la résolution, de leur type que de tout autre facteur : ces images ne pourront donc pas pouvoir être recalées et posent un problème considérable lorsqu'aucune autre image d'une région n'est disponible et qu'il est impossible de faire autrement que de les utiliser.

Ces scénarios nous permettent de souligner que, dans bien des situations plausibles, il sera impossible d'avoir accès à des images que l'on pourra recalcr sans qu'il y ait d'erreurs de recalage résiduelles plus ou moins considérables. Ceci a un impact sur la plupart des techniques usuelles de détection de changement qui seront exposées plus loin.

La liste des combinaisons que nous venons de donner ici ne traite que d'images satellitaires, mais il ne faut pas omettre que de nombreuses autres sources de données sont disponibles et potentiellement utiles. Parmi ces dernières nous retrouvons le LIDAR, les images aéroportées, les produits cartographiques dérivés de logiciel SIG et les modèles numériques de terrain (MNT). Ces dernières peuvent être utiles dans certains cas de figure spécifiques.

Le Tableau 3.1 résume les combinaisons d'images qu'il est plausible d'avoir à traiter dans un cas de gestion de catastrophe ainsi que certaines des contraintes fonctionnelles liées à ces combinaisons d'images en fonction du but de détecter des différences/changements entre les images sources.

Tableau 3.1 Combinaisons d'images et de contraintes et la détection de changement

Cas de combinaison	Conditions d'acquisition	Résolution	Recalage	Radiométrie	Détection de changement
Même capteur	Identiques	Identiques	Oui	Identiques	Toute techniques
Même capteur	Différentes	Identiques mais avec certaines variations de contenu reliées aux corrections d'orthorectification	Oui mais avec potentiel d'erreur résiduelle	Différences possibles à corriger	Toute techniques mais avec diminution de performance pour les techniques de classification simultanées et d'analyse des images de différence ou des vecteurs de changement
Capteurs différents de même type	Différentes	Identiques, ou très similaires, avec certaines variations reliées à l'orthorectification	Théoriquement mais avec potentiel d'erreur résiduelle	Différences à corriger	Toute techniques mais avec diminution de performance pour les techniques de classification simultanées et d'analyse des images de différence ou des vecteurs de changement
Capteurs différents de même type	Différentes	Différentes	Dépend du cas et de l'état de l'art au moment du traitement, potentiel	Différences à corriger	Certaines techniques peuvent être utilisées mais doivent être évaluées en fonction du cas, la comparaison post classification est plus propice
Capteurs différents de types différents	Différentes	Identiques, ou très similaires, avec certaines variations de contenu reliées à l'orthorectification	Dépend du cas et de l'état de l'art au moment du traitement, potentiel d'erreur résiduelle	Différentes	Certaines techniques peuvent être utilisées mais doivent être évaluées en fonction du cas, la comparaison post classification est plus propice
Capteurs différents de types différents	Différentes	Différentes	Difficile et peu probable	Différentes	Comparaison post classification

3.4 L'imagerie satellitaire et la comparaison de leur contenu

Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, les images satellitaires sont des sources de données très riches, mais aussi très complexes à analyser. Certes, plusieurs facteurs influencent ce qui peut être extrait d'une image et ont un impact indéniable sur le choix des méthodes de classification et de comparaison probantes à utiliser dans un contexte d'analyse

donné. Les valeurs qui sont attribuées aux pixels ainsi que leur signification, la résolution des images, leur contenu et leur type ne sont que quelques-uns des facteurs qui sont associés aux images mêmes. Mais la disponibilité de données supplémentaires, provenant soit de relevés sur le terrain, d'information obtenue de logiciels SIG ou d'autres sources d'information qui permettent d'associer à certains des pixels une classe d'appartenance, a aussi un impact considérable sur la sélection des méthodes d'analyse qui pourront être utilisées.

Il faut souligner ici que les images satellitaires, et donc ce qu'elles décrivent, ne peuvent que rarement être traitées avec des méthodes générales qui s'adaptent à toutes les situations automatiquement. Ceci découle de la grande diversité de formats, de résolutions et de types d'images qui peuvent être utilisés dans ce contexte d'analyse ainsi que des diverses combinaisons d'images qui peuvent se présenter, comme nous l'avons souligné à la section précédente. La prolifération d'algorithmes, de plateformes logicielles et de formats de données intermédiaires utilisées pour le traitement et la classification du contenu de ces images découle de cette situation et vise à établir des techniques de travail adaptées à chaque nouvelle situation qui n'est pas traitable avec les outils existants.

Après avoir pris connaissance des combinaisons d'images qui peuvent se présenter dans un contexte de détection de changement, sous l'auspice de la gestion de catastrophe, nous réalisons qu'il y a trois scénarios plausibles qui devront être traités.

En premier lieu, nous avons ce que nous pouvons appeler le cas idéal qui met en jeu deux images provenant du même capteur n'ayant subies aucune variation de leurs conditions d'acquisition et qui ne sont détériorées par aucun autre facteur externe qui puisse modifier l'aspect radiométrique des images.

Dans cette situation nous pourrions travailler avec des images recalées, ce qui permettra d'utiliser l'image de différence et toutes les techniques usuelles de détection de changements que nous exposerons plus loin. Cette situation n'a cependant que peu de chance de se réaliser dans un cas de gestion de catastrophe pour les diverses raisons mentionnées plus tôt. Dans un

contexte de recherche classique portant sur l'analyse d'images satellitaires, par contre, il s'agit essentiellement de la combinaison d'images qui est traitée à moins que la recherche porte sur le recalage et/ou sur l'une ou l'autre des difficultés reliées au traitement d'images satellitaires que nous avons mentionné jusqu'ici.

Nous constatons donc que le cas le plus probable de combinaison d'images que nous ayons à traiter provient du deuxième scénario des combinaisons plausibles, celui d'images qui ne peuvent être recalées suffisamment bien pour que l'erreur de recalage résiduelle n'ait d'impact sur la détection de changement. Que les images ne puissent être recalées pour quelque raison que ce soit, nous comprenons que dans un contexte de gestion de catastrophe nous ne pouvons pas nous permettre de ne pas utiliser une source de données qui est disponible, peu importe la difficulté reliée à son analyse.

Le troisième cas plausible est celui où nous avons des représentations qui ne sont pas comparables en utilisant les variables directement. Il peut s'agir d'images de types ou de résolution différents, de données extraites de logiciel SIG, de cartes géographiques ou même de données textes décrivant l'usage du territoire pour une région donnée. Ce scénario est, ne nous le cachons pas, très difficile à aborder du point de vue de la mécanique à mettre en œuvre pour permettre de le gérer et d'arriver à surpasser l'obstacle que représente leur utilisation efficiente et probante.

Nous nous attarderons ici à décrire un peu plus en détail ces trois scénarios avant de passer aux techniques de détection de changement qui sont utilisées à l'heure actuelle et de leur pertinence en fonction des cas d'analyse que nous venons d'exposer.

3.4.1 Le cas d'analyse idéal

Ce qui vient d'être mentionné au sujet de la difficulté reliée au traitement et à l'analyse d'images satellitaires lorsque nous les utilisons dans un contexte de détection de changement ne s'applique pas de la même manière lors d'analyse sous l'auspice de la gestion de

catastrophe que dans le cadre d'un projet de recherche de longue haleine reposant sur des données sélectionnées en fonction d'un but spécifique. Dans ce contexte, l'analyse porte toujours sur la même région et traite presque invariablement d'images provenant du même capteur. Dans cette situation « idéale », une fois le modèle de classification établi, sa réutilisation devrait être possible, tant et aussi longtemps que les valeurs spectrales retournées par l'imageur ne sont pas modifiées par le vieillissement du capteur ou par d'autres facteurs externes et s'il n'y a aucune autre variation des conditions d'acquisition des images.

Nous comprenons aisément en réfléchissant à tout ce qui a été présenté jusqu'ici que cette dernière particularité ait un impact important sur la réutilisabilité des modèles de classification développés ainsi que sur les méthodes qui sont utilisées pour analyser les différences ou les changements que ces images décrivent. L'effet le plus prépondérant est que les modèles établis sont, la plupart du temps, très difficiles, voire même presque impossibles, à réutiliser pour traiter d'autres images sans qu'il faille les modifier d'une certaine manière pour les adapter à la nouvelle situation. Ceci est encore plus vrai plus la variation des conditions d'acquisition est prononcée.

Que cette difficulté provienne, comme nous l'avons mentionné du vieillissement de l'équipement, de variation des conditions d'acquisition ou d'incompatibilité de format des images, il est fréquent qu'il soit nécessaire de réaliser de nombreuses classifications indépendantes, bien adaptées aux différents jeux de données, pour arriver à une représentation probante et cohérente du contenu des images qui sera propice à nous permettre de quantifier les différences détectées entre les images de la série.

Pour nous permettre de réaliser la classification de ces images, plusieurs méthodes sont d'usage courant comme nous l'avons mentionné à la section précédente. La plupart des algorithmes et concepts utilisés en reconnaissance de forme et en classification sont soit déjà utilisés pour réaliser cette tâche ou ont été évalués par l'un ou l'autre des chercheurs œuvrant dans le domaine de la télédétection.

Ce qui est à retenir ici est que les techniques de classification et d'analyse de changement/différence qui peuvent être employées pour traiter un cas donné peuvent être divisées en deux grandes familles en fonction de certaines des contraintes fonctionnelles mentionnées jusqu'ici. Ces deux familles sont la détection de changement binaire, qui ne donne que les pixels qui ont changés sans autres détails, et la classification matricielle des patrons de changement en fonction des changements d'allégeance de classification des pixels. Somme toute, la situation peut être expliquée en fonction d'un seul de tous les éléments que l'on a mentionnés, le recalage.

Si nous avons ou non des données qui sont soit recalées ou qui peuvent l'être avec une erreur résiduelle minimale est l'élément qui guidera le choix des techniques que nous pourrons considérer pour effectuer la détection des différences/changements entre les sources que nous utilisons. La qualité du recalage des images ainsi que la marge de l'erreur résiduelle sont les points les plus importants à considérer lorsque nous devons choisir une technique de détection de changement à utiliser dans un contexte donné.

3.4.2 Le recalage d'image et son impact sur la détection de changement

Il faut comprendre que si nous avons toujours à traiter le cas « idéal », pour lequel nous avons des images provenant du même capteur n'ayant subi aucune variation de leurs conditions d'acquisition, qui peuvent donc théoriquement être parfaitement recalées, il ne serait pas aussi difficile de mener une analyse de changement traitant de leur contenu. Il faudrait tout de même étiqueter les classes en fonction de leur contenu conceptuel, mais dans cette situation il ne serait nécessaire de faire ceci que pour la première image et de reproduire la mécanique de classification pour les autres images.

Ceci provient du fait que si nos images peuvent être parfaitement recalées et qu'il n'y a pas eu de variations de l'aspect spectral de ce qui est représenté, nous pouvons réutiliser le modèle de classification développé pour la première image pour classer le contenu de la deuxième et utiliser les étiquettes de classe établies directement pour décrire la nouvelle

image. Nous pouvons nous représenter ce que ceci peut vouloir dire en considérant les images de la série comme des couches indépendantes de données qui ont une relation de dépendance temporelle de couche en couche. Dans cette représentation, nous pouvons aisément comprendre que si nous regardons à travers la pile de cases, qui correspondent à une adresse pixellique, nous pouvons « voir » ce qui change d'un instant à l'autre en ne s'attardant qu'à la succession d'étiquettes associées à un site donné. Les STIS sont une réalisation de ce concept qui nous permet de modéliser les tendances de changements cycliques ainsi que l'évolution de l'utilisation du territoire sur de longues périodes.

En considérant le Tableau 3.1, nous remarquons que cette situation idyllique ne se présentera que dans certaines situations isolées et que dans l'ensemble, nous pouvons prévoir devoir travailler avec des images qui ne pourront être recalées sans qu'il n'y ait de bruit de recalage résiduel.

Cette considération technique est essentiellement à la source d'une part imposante de la recherche en détection de changement. En somme, si nous pouvons soustraire les pixels les uns des autres en fonction de leur adresse, que nous avons des images parfaitement recalées donc, le résultat de l'opération sera nul seulement aux endroits de l'image où il n'y a pas eu de changement. Ce concept est simple et souligne que dans cette situation il ne nous restera qu'à analyser les pixels isolés par seuillage du résultat de la soustraction pour établir le type de changement survenu entre les deux instants décrits par les images.

Nous avons déjà mentionné au chapitre traitant des images que le recalage d'image est une opération importante du prétraitement des séries d'images comme les STIS mais aussi de toute paire d'image qu'il peut être probant d'utiliser. Cette étape de la chaîne de traitement permet de rendre les séries d'images propices à permettre une analyse de changement. Cette contrainte du recalage est essentielle à la majorité des techniques utilisées pour effectuer l'analyse des changements survenus entre des images. Par contre, bien que la communauté de recherche du traitement d'image se penche sur la question depuis longtemps, il n'y a toujours pas de méthode de recalage qui puisse corriger des images ayant subi des variations de leurs

conditions d'acquisition uniformément pour tous les pixels d'une image. Il reste donc toujours une certaine mesure d'erreur dans la correction de position calculée.

Ceci peut être plus ou moins important selon le type d'algorithme utilisé, mais il est inévitable qu'il reste une certaine mesure d'incertitude, car, ne l'oublions pas, ces techniques modifient les valeurs des pixels en fonction d'un modèle de correction, local ou global, qui est calculé en utilisant un nombre de points finis. La qualité de la correction, et donc de la marge d'erreur résiduelle, est habituellement inversement proportionnelle au nombre de points de raccordement utilisés pour calculer le modèle de correction à utiliser. Comme le temps de traitement est lui directement proportionnel au nombre de points et au type de modèle de calcul, local versus global, nous comprenons qu'en général dans un contexte de gestion de catastrophe nous cherchons à privilégier des modèles qui reposent sur le moins de points possible et qui utilisent des fonctions de calculs simples ayant des ordres de complexité aussi bas que possible.

Dans un contexte de gestion de catastrophe, nous comprenons que le temps de traitement est une contrainte prépondérante qui dicte ce qui sera mis en œuvre pour résoudre un problème donné. Conséquemment, les modèles qui seront utilisés dans ce contexte seront inévitablement aussi simples que possible et seront choisis en fonction d'une erreur de détection acceptable pour une application donnée.

La figure 3.1 est un exemple de ce qui résulte de la soustraction d'images s'il n'y a pas de décalage des images les unes par rapport aux autres. Cette figure est composée de l'image qui a été utilisée comme source, pour tous les exemples de cette section, qui se trouve à gauche et au centre, et de l'image de différence créée par la soustraction de l'image originale d'elle-même, qui est à droite. Nous voyons qu'il n'y a aucune différence décelable.

Il s'agit en fait d'une simulation de ce que nous avons nommé plus tôt le cas «idéal» de combinaison d'images. Essentiellement, il s'agit de ce que nous pourrions considérer comme une simulation d'une paire d'images provenant du même capteur, qui ne comportent pas de

variations radiométriques ou de déformation géométrique au sens de l'orthorectification et du géoréférencement des images.

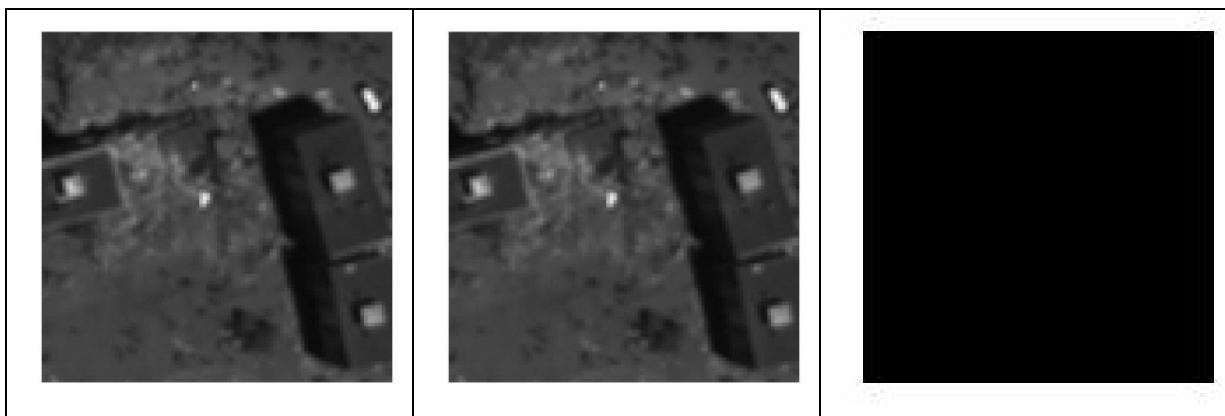


Figure 3.1 Images de test et de différence sans décalage ou différence²¹

La Figure 3.2 présente ce qui arrive dans ce contexte de soustraction d'image lorsqu'il y a différence de contenu entre les images sans qu'il n'y ait la moindre erreur de recalage. L'image source de la figure 3.1 a été modifiée pour y introduire des différences de contenu en ajoutant et en enlevant des éléments pour simuler des changements de contenu et en lissant d'autres portions de l'image pour simuler des différences de résolution.

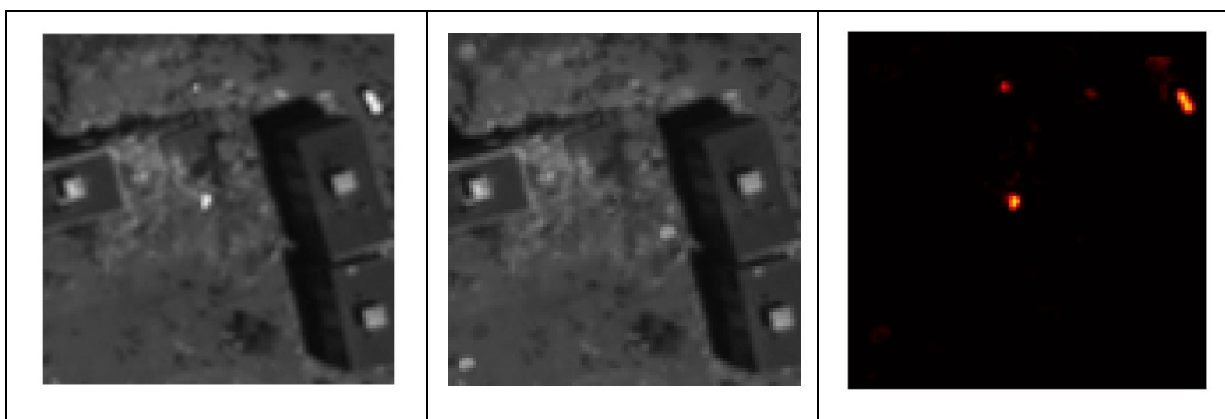


Figure 3.2 Images de test et de différence sans décalage avec des différences²²

²¹ Extrait d'une image panchromatique de la ville de Boumerdes en Algérie prise le 25 mai 2003 avec la satellite Quickbird, CNES.

²² Extrait d'une image panchromatique de la ville de Boumerdes en Algérie prise le 25 mai 2003 avec la satellite Quickbird, CNES.

Nous pouvons voir sur l'image de différence que les éléments brillants qui ont été enlevés sont très rapidement identifiables et il est facile de voir ce qui est arrivé entre les deux images pour provoquer cette différence. Il n'en est pas de même pour les régions qui n'ont été que lissées. Nous pouvons remarquer des zones qui semblent indiquer qu'il y a eu variation de contenu, mais il n'est pas aussi simple d'identifier ce qui s'est produit entre les deux images que dans le cas précédent.

Nous tenons à souligner ici que si nous voulions analyser les différents types de changements, il faudrait inévitablement identifier plusieurs seuils différents pour arriver à séparer les différents types de changements en fonction de leurs amplitudes. Dans un contexte de gestion de catastrophe, il pourrait être difficile de justifier cette étape de traitement, qui n'est pas nécessairement automatisable. Ce seuillage doit être réalisé par un intervenant qui doit analyser la validité du résultat des ajustements des seuils sur la probité des changements détectés.

Maintenant, qu'advient-il si les deux phénomènes, le décalage des images et la présence de changements, se produisent en même temps pour une paire d'images? Ici nous ne ferons que simuler l'erreur de recalage en décalant les images l'une par rapport à l'autre puis en soustrayant la première de la seconde. Nous utiliserons un décalage simultané de 1 pixel dans chaque direction pour nous permettre de bien souligner l'impact de ce paramètre sur la détection de changement reposant sur la soustraction d'image. Le résultat de cette simulation est présenté à la Figure 3.3.

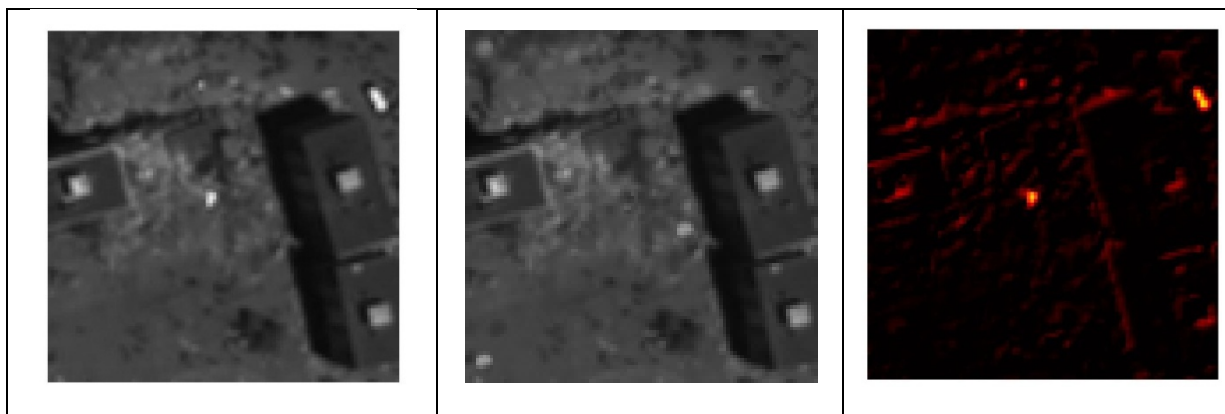


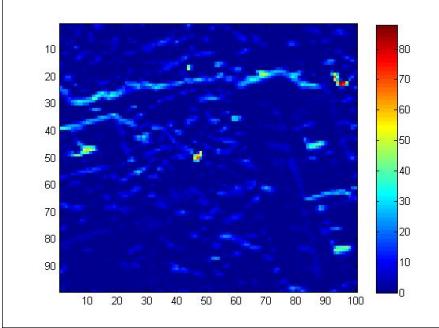
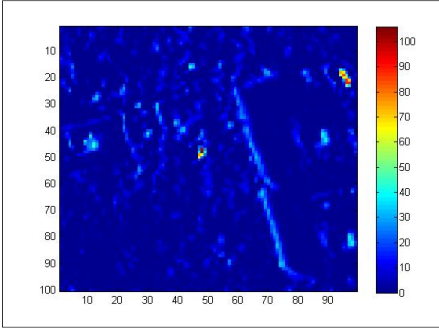
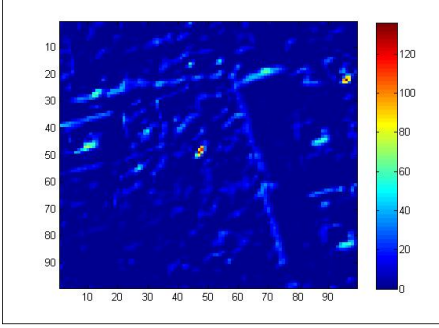
Figure 3.3 Images de tests et de différence d'un cas de différence avec erreur de recalage²³

Nous pouvons voir dans ce cas de figure qu'il serait bien difficile d'établir ce qui est d'intérêt et ce qui n'est qu'accidentel. Il s'agit du cas le moins corsé de ce que nous mentionnions plus tôt au sujet des combinaisons d'images plausibles. Ces images, provenant du même capteur et n'ayant subi aucune variation ou déformation géométriques, n'ayant subi qu'un léger décalage devraient pouvoir être recalées sans difficulté. Par contre, nous comprenons maintenant l'impact que peut avoir la moindre variation des conditions d'acquisition et/ou d'orthorectification et/ou de géoréférencement sur ce qui sera détecté par la suite comme potentiellement indicateur de changement. De plus, il est évident, suite à ceci, que le recalage des images est une étape essentielle requise par la majorité des techniques d'analyse utilisées pour effectuer la détection de changement.

Le Tableau 3.2 donne une idée de ce qu'une erreur de recalage résiduelle peut représenter dans un contexte de détection de changement. La simulation de l'erreur de recalage a été réalisée en créant des copies des images utilisées pour créer la figure 3.3 avec 1 pixel de décalage entre elles dans les directions horizontales, verticales ainsi que combinées, ce qui représente en réalité un peu plus de 1 pixel de décalage. Cette simulation est un exemple extrême de l'impact du recalage sur la détection de changement car dans un cas réel de recalage l'erreur résiduelle ne serait pas uniforme sur l'ensemble de l'image.

²³ Extrait d'une image panchromatique de la ville de Boumerdes en Algérie prise le 25 mai 2003 avec la satellite Quickbird, CNES.

Tableau 3.2 Impact d'erreurs de recalage résiduelles (simulé)

Image de différence	Décalage	Bornes
	1 pixel, horizontal.	MIN : 0 MAX : 88 MOY : 2,5882
	1 pixel, vertical.	MIN : 0 MAX : 106 MOY : 2,6411
	1 pixel, 2 sens.	MIN : 0 MAX : 136 MOY : 3,5421

Les valeurs qui figurent dans la colonne des Bornes des valeurs de l'image de différence sont :

- MIN : la valeur minimale du résultat de la soustraction des images,
- MAX : la valeur maximale du résultat de la soustraction des images,
- MOY : la valeur moyenne du résultat de la soustraction des images.

Nous tenons à souligner que si nous regardons les images de différence du tableau 3.2 nous pouvons voir le même type de tendance que ce qui résulte de l'application d'un filtre de détection d'arrêtes. Nous remarquons que la direction du décalage tend à provoquer des

différences accidentelles dans l'axe du décalage, ce qui est analogue à un filtre de détection d'arrêtes configuré pour détecter des composantes qui sont linéaires soit horizontalement, verticalement ou diagonalement, résultant essentiellement d'un décalage dans les deux sens.

En considérant ces résultats nous comprenons aisément ce que peut représenter une légère erreur de recalage sur la probité des résultats provenant d'une analyse de changement qui ne prend pas en considération l'impact des erreurs de positionnement aussi infimes soient-elles.

Dans leurs travaux d'analyse de ce principe (Dai et Khorram, 1998b) ont trouvé qu'une erreur résiduelle de recalage de l'ordre de $1/5$ de pixel est suffisante pour entraîner une erreur de détection de changement de l'ordre de 10% pour un algorithme donné. Ils ne traitaient que d'images à résolution moyenne de 30 m dans cet article.

Suite à la compréhension de ces travaux et des notions mises de l'avant concernant les générations de capteurs plus récentes, qui ont des résolutions sans cesse croissantes, et de la complexité géométrique qui en découle, nous comprenons que ce phénomène ne peut qu'avoir un impact de plus en plus considérable sur la détection de changement reposant sur des images à haute ou très haute résolution.

Maintenant que nous avons bien explicité ce qui constitue le cas idéal de traitement d'images satellitaires permettant d'effectuer la détection du changement de leur contenu, nous nous attarderons un peu sur les deux autres cas de figure mentionnés plus tôt. Ensuite, nous présenterons des techniques de détection de changement usuelles, certaines de leurs particularités, en ce qui concerne la détection de changement, ainsi qu'à leur regroupement en familles de méthodes d'analyse partageant essentiellement les mêmes fondements théoriques.

3.4.3 Les cas moins qu'idéaux

Le deuxième scénario de combinaisons d'images plausibles est celui qui est le plus probable de se présenter dans un contexte de gestion de catastrophe. Que ce soit en raison de la périodicité de revisite des satellites, du dépointage du système imageur pour obtenir une image d'une zone spécifique, ou de tout autre facteur qui soit relié à l'acquisition des images ou à leurs résolutions, il est incontournable et absolument essentiel d'utiliser toutes les images qui sont à notre disposition dans un cas de gestion de catastrophe. Ceci est bien sûr une conséquence directe de la précarité de la situation et de la sécurité des populations touchées par l'événement.

À la lumière de ce qui vient d'être dit aux sections précédentes, nous comprenons que bien que de nombreuses techniques de détection de changement existent, dans ce contexte spécifique il est fort probable qu'il soit impossible d'utiliser des techniques de détection de changement automatiques ou semi-automatiques. Ces dernières sont habituellement développées pour traiter des cas très précis et sont difficilement généralisables. Ceci est relié à ce que nous avons établi à la section précédente, traitant du cas idéal, qui est typique dans un contexte de recherche académique. De ces efforts de recherche nous provient une panoplie de techniques que nous pouvons envisager utiliser pour effectuer une analyse de changement portant sur des images d'une série, mais ces techniques sont généralement développées pour traiter des images qui peuvent être recalées et, conséquemment, qui le sont.

Ces méthodes de traitement peuvent certes être utilisées dans le contexte du cas idéal sans que nous ayons à nous inquiéter trop de la question de la probité des résultats lors de la conception initiale du système qui sera mis en œuvre pour résoudre un cas de détection de changement. Lorsque nous n'avons pas un cas idéal, par contre, il est essentiel de superviser toutes les étapes de l'analyse sachant que nous ne pourrions réutiliser des modèles de classification préétablis. Ceci exclut d'emblée la possibilité d'utiliser des techniques automatiques. Plusieurs techniques de détection de changement permettent une certaine flexibilité par rapport à l'erreur résiduelle de recalage, par contre, ces techniques sont

ajustées en fonction des cas en cours de traitement et ne peuvent pas nécessairement être utilisées avec les mêmes résultats dans d'autres situations. Nous avons donc ici aussi à analyser et à ajuster l'algorithme pour être en mesure d'obtenir des résultats probant d'où la nécessité de superviser l'exécution et de valider la probité des résultats.

Nous pourrions tout de même réaliser la classification du contenu des images satellitaires séparément, peu importe leurs modalités spécifiques. Cette action repose essentiellement sur le regroupement de pixels ayant certaines caractéristiques communes en groupes conceptuellement homogènes. Le choix des caractéristiques probantes à utiliser dépend du type d'image, de sa résolution ainsi que de ce que nous cherchons à obtenir comme classification.

Il ne faut pas oublier que ce qui permet de regrouper tous les pixels appartenant à la classe asphalté n'est pas forcément utile si nous cherchons à obtenir les bordures d'une zone boisée. Ceci pousse à l'avant-scène la nécessité de développer des structures de classifications hiérarchiques qui permettent de grouper les pixels en fonction de descripteurs propices. C'est essentiellement l'approche qui est utilisée dans (Pu, Landry et Yu, 2011) et dans (de Pinho et al., 2012) pour arriver à une segmentation qui est conceptuellement représentative du contenu sémantique des images traitées.

Une classification hiérarchique nous permet de tenir compte du fait que certains phénomènes sont plus faciles à isoler à des résolutions grossières et d'autres à des résolutions plus fines. Il est toujours possible de passer d'une résolution fine à une résolution plus grossière en utilisant des méthodes de réduction de la résolution. Ces techniques permettent d'effectuer des moyennes plus ou moins pondérées d'une image à résolution fine pour obtenir une approximation de ce que cette même image contiendrait si elle avait été capturée à une résolution inférieure.

À cet effet, une technique de classification hiérarchique nous permet de gérer cette facette du problème en définissant des procédures de classification conditionnelles pour lesquelles le

niveau de résolution peut être une des variables qui est utilisée pour aiguiller la procédure de classification.

N'oublions pas, par contre, que le fait d'effectuer cette transformation de la résolution ne garantit nullement que lorsqu'un modèle de classification établi à une échelle spécifique est utilisé à la résolution de l'image originale, que la classification résultante sera aussi pertinente. Il est possible dans cette situation que certaines valeurs des variables, qui étaient présentes à l'échelle originale, aient été diluées par l'action de réduction de la résolution et qui n'ont donc pas pu être incluses dans le modèle développé. Ceci entraîne nécessairement une diminution de la qualité de la classification lorsque réalisée à l'échelle originale en utilisant le même modèle.

Nous avons mentionné plus tôt que plus la surface au sol qui est représentée par un pixel est petite, plus il est possible de discriminer entre différents phénomènes. Ou plutôt, nous pouvons dire que plus la cellule de résolution est petite, plus ce qui est décrit par un pixel devient pointu et précis. Par contre, une cellule de résolution plus grande est, comme nous l'avons mentionné, une moyenne des phénomènes qui se retrouvent au sol pour cette surface. Ainsi, lorsque la résolution est moindre, il est très difficile, voire même impossible dans certains cas, de détecter de petits objets ou phénomènes, car ils sont dilués par le reste des objets présents dans l'unité de surface qui correspond à un pixel. Dans le cas des images à très haute résolution, le problème est différent et réside principalement dans le fait que pour une classe donnée composée de beaucoup de petits objets, il n'est pas du tout surprenant que ces derniers aient des caractéristiques suffisamment variées pour rendre leur regroupement automatique très difficile.

Ceci peut être expliqué de la manière suivante lorsque nous avons une image ayant une résolution moindre, les pixels qui représentent une classe donnée seront plus groupés, dans l'espace des descripteurs, car le phénomène de dilution provoqué par la saisie de la moyenne du contenu d'une cellule de résolution au sol a tendance à entraîner une représentation d'un phénomène qui est plus compact et qui a moins de différences internes. Nous appelons cela la

variabilité intra classe qui cause dans bien des cas une meilleure séparabilité inter classe à cause des vides partiels, ou du moins des zones peu peuplées, qui se situent entre les nuées d'échantillons correspondant aux différentes classes.

Lorsque nous avons une image à très haute résolution, le phénomène s'inverse. Étant donné que la cellule de résolution au sol est très petite comparativement, ce qui permet de caractériser des variations très locales d'un même phénomène, nous constatons l'étalement de la distribution des pixels appartenant à une même classe et par conséquent à l'augmentation de la variabilité intra classe. Cette caractéristique entraîne aussi une réduction des zones peu peuplées et donc une diminution de la séparabilité des classes provoquée par une distance inter classe réduite (Aldred et Wang, 2011).

À titre d'exemple de ce que nous venons d'énoncer, prenons une surface couverte d'asphalte et de gravier comme un toit par exemple. Si nous avons des pixels d'une surface d'environ 5 m², ce que ces derniers représentent est une moyenne de la surface du toit, qui a, disons, 10 m². Nous avons donc deux pixels qui représentent probablement une même mixture de composantes asphalte/gravier en différentes proportions, mais qui, une fois moyennée, sera très similaire pour les deux pixels.

Dans le cas d'une image à très haute résolution pour laquelle la cellule de résolution au sol est de 0,25 m² nous avons affaire à 40 pixels qui représenteront la moyenne de ce que cette surface de 0,25 m² contient. C'est la variation locale de ce que contient cette surface qui provoque l'étalement des membres de la classe toit. Si le gravier a été déplacé et se retrouve concentré en quelques zones, il va de soi que d'autres portions du toit seront dénudées et que, conséquemment, pour une même classe, nous retrouvons beaucoup de variabilités qui ne sont pas présentes à une résolution moindre.

Pour ce qui est des méthodes de détection de changement qui reposent sur l'utilisation d'images recalées, donc du cas « idéal », elles utilisent la soustraction des images pour créer l'image dite de différence ou encore l'analyse en profondeur de toutes les couches de

données des images d'une série comme une STIS simultanément. De plus, il devient de plus en plus difficile de les mettre en œuvre plus la résolution des images croît. Ceci provient d'une des particularités des images à très haute résolution que nous n'avons pas encore soulignée qui force l'introduction de nouvelles contraintes fonctionnelles qui doivent être prises en considération lorsque nous choisissons d'utiliser ces images. Il s'agit de la composante verticale de ce que ces images peuvent représenter. À des résolutions moindres, l'impact des effets de perspective sur la représentation finale est presque négligeable. Mais lorsque nous dépassons un certain seuil, il devient possible de voir des murs, des ombres ainsi que des déformations géométriques reliées aux hauteurs relatives des objets les uns par rapport aux autres qui ne sont pas présents dans des images à résolution moindre.

Le principal effet qu'ont ces déformations sur les images est de rendre le positionnement relatif des objets beaucoup plus dépendant de l'angle de visée du capteur et d'être sujet à des variations très locales. Il s'agit bien sûr d'un effet qui est relié à la projection en deux dimensions d'objets tridimensionnels. Si le point de vue n'est pas exactement le même, le résultat de la projection des mêmes objets sur un plan ne le sera pas non plus.

Pour une scène donnée, il y aura donc un plan, à une hauteur donnée, inconnu au début du traitement, pour lequel les déformations projectives seront minimales. Les objets qui sont soit en deçà ou au-dessus de ce plan subiront des déformations plus prononcées et souvent différentes de celles qui affectent le reste de l'image. De plus, elles fausseront encore plus le positionnement des objets sur le plan de projection.

Si nous prenons en considération le relief d'une région, nous pouvons concevoir qu'il puisse se produire une grande variété de déformations locales lorsque l'altitude des objets entre en considération. Une pente ici, un terrain plat là, des vallées ou encore des grattes ciels peuvent éclipser des portions d'image ou faire apparaître des objets près les uns des autres quand en réalité ils sont plus espacés que ce que nous percevons sur l'image finale.

Lorsque nous avons des images ayant été prises avec presque exactement les mêmes paramètres d'acquisition, nous arrivons à réaliser le recalage des images à très haute résolution d'une manière suffisamment précise pour permettre d'envisager d'utiliser les images de différences ou encore l'analyse de la pile de couches pour effectuer le suivi de l'évolution d'un phénomène. Il reste toujours une certaine mesure d'incertitude, car le modèle de correction géométrique est calculé en fonction d'un certain nombre de points de raccordement et donc ces modèles ne prennent pas nécessairement toutes les déformations possibles pour une scène en considération

Comme le modèle de correction est approximatif, lorsque nous considérons la totalité de l'image, nous comprenons que pour bien des points, la correction ne sera pas nécessairement optimale. Il en résulte une marge variable d'approximation sur certaines portions de l'image qui, bien qu'elle puisse être satisfaisante du point de vue visuel, entraîne lorsque nous effectuons la soustraction des images, un résidu quantifiable pour des points qui en réalité n'ont pas subi de changement.

De ceci découle une partie non négligeable de la difficulté liée à la classification du contenu d'images satellitaires, à haute et à très haute résolution, présentant des contenus mixtes. Pour la classification et la comparaison de phénomènes d'ordre naturels telles que la désertification ou la diminution de la couverture des glaciers, il est plus avantageux d'utiliser des images n'ayant pas une résolution trop fine. Par contre, si nous nous intéressons à la classification et la comparaison de phénomènes urbains, comme l'étalement urbain ou la disparition d'espaces verts, il est essentiel d'utiliser des images à haute ou très haute résolution pour être en mesure d'extraire de ces images les objets et les classes conceptuelles qui nous intéressent.

3.4.4 La description du contenu et de la détection de changement

En revenant sur la détection de changement proprement dite, nous devons souligner que le type ainsi que la résolution des images qui sont utilisés pour effectuer une analyse de

changement à l'aide d'images satellitaires ont deux types d'impacts sur le choix des techniques à utiliser et sur la probité des résultats.

D'une part, les méthodes reposant sur la comparaison post classification peuvent reposer sur l'utilisation d'images ayant des résolutions ou des types différents. Ceci est possible, car les liaisons entre les classes découvertes par les différentes étapes de classification et de traitement peuvent être définies en utilisant des règles de correspondance créées spécifiquement pour résoudre un cas précis. Par contre, la modélisation et la séparation des classes doivent être réalisées au préalable, indépendamment pour chaque image de la série. Ceci ne pose pas de problème en soi, mais il faut tenir compte du fait que les modèles de classification seront probablement différents et que ce n'est pas toujours une tâche aisée d'obtenir les mêmes classes conceptuelles à partir de deux jeux de données indépendants classées séparément.

En même temps, plus la résolution augmente, plus la tâche de classification devient complexe en vertu des particularités que nous avons soulignées à la section précédente concernant la variabilité des pixels appartenant à une même classe (Aldred et Wang, 2011). Ceci sous-entend qu'il n'est pas surprenant d'obtenir plusieurs classes, représentant un même concept, qui doivent être fusionnées par une étape de traitement supplémentaire. Ceci peut être réalisé soit à l'aide des étiquettes conceptuelles des classes ou de la définition des prototypes des classes. Par contre, la fusion reposant sur les étiquettes est plus probante pour plusieurs raisons.

Premièrement, l'association d'une étiquette descriptive à un groupe de pixels nous permet par la suite de consulter le contenu des images en utilisant un langage descriptif qui nous permet de comprendre le contenu d'un point de vue humain.

Deuxièmement, ces étiquettes nous permettent aussi de mettre des images ayant des types, et/ou des résolutions, complètement différents en relation d'une manière simple et directe. En

n'utilisant que les prototypes découverts dans l'espace des descripteurs, il n'est pas du tout certain que ceci soit possible même s'il s'agit d'images essentiellement similaires.

Troisièmement, la fusion des prototypes de plusieurs classes appartenant à un même concept sémantique ne garantit pas que la classification résultante soit aussi valide que celle provenant de l'utilisation des prototypes individuels. Si une nuée d'échantillons qui forme une classe a une forme complexe ou inusitée, il devient de plus en plus difficile de trouver un algorithme de classification, supervisée ou non, qui soit en mesure de découvrir cette forme et de la caractériser correctement. Ceci est relié aux vides partiels qui entourent les puits de densité d'échantillons qui caractérisent les classes ainsi qu'à la forme qu'ont les nuées découvertes.

Nous pouvons prendre un toron ayant une boule en son centre à titre d'exemple de ce concept. Même s'il est possible de trouver un modèle géométrique simple pour décrire la boule, il n'est pas aussi simple de décrire le toron avec une équation non paramétrique. Ce dernier peut, cependant, être défini par parties en le divisant en sections qui portent toutes la même étiquette conceptuelle, puis en appliquant une règle d'étiquetage conditionnelle après la classification. Si nous fusionnons les prototypes par contre, le nouveau prototype résultant de la fusion forcera la classification de la boule comme étant une partie du toron, car les prototypes fusionnés du toron ne pourront faire autrement que de se déplacer vers le centre de celui-ci et conséquemment d'éclipser le prototype de la boule qui coïncide avec celui du toron.

Les Figure 3.4 si dessous et la Figure 3.5 qui se retrouve à la page suivante, présentent le concept du toron et de la sphère ainsi qu'une autre interprétation du toron qui simplifie sa classification, mais qui peut poser problème si nous pensons fusionner les prototypes qui permettent de définir le toron. Ces images sont constituées de surfaces continues pour la clarté de la représentation, mais il ne faut oublier que dans un contexte d'utilisation réel ces surfaces sont en fait des nuées de points qui suivent ces formes simples et sont compris dans le volume décrit par ces surfaces.

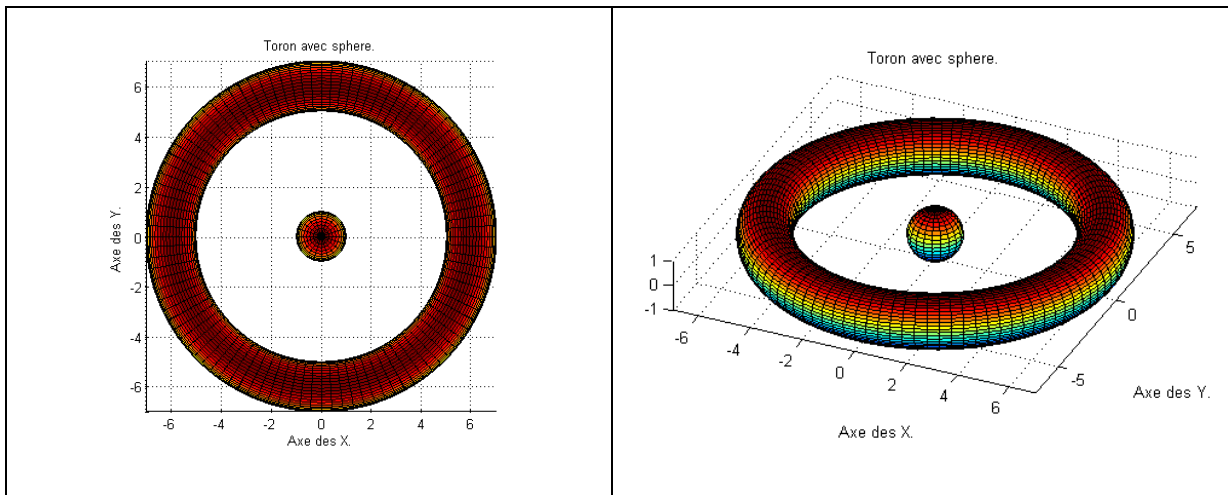


Figure 3.4 Exemple du toron et de la sphère

Du point de vue de la classification du toron nous comprenons que le modèle permettant de définir la région interne du toron est beaucoup plus complexe que celui qui permet de décrire celui de la sphère. Ceci est particulièrement vrai si nous utilisons la distance euclidienne, car cette mesure ne permet que de décrire des sphères centrées sur des coordonnées quelconques de l'espace des descripteurs. Nous pourrions tout de même utiliser cette mécanique de description en divisant le toron en un nombre fini de sphères qui englobent la totalité du volume décrit par le toron et qui portent toutes la même étiquette conceptuelle. Il y a bien sûr une certaine mesure d'erreur qui serait inhérente à cette représentation, car pour que les sphères puissent avoir une portion de recoupement qui permet de satisfaire à la contrainte d'englober toute la surface du toron il est inévitable qu'une portion de l'espace qui ne fait pas partie du toron soit incluse dans la représentation dérivée. Nous pouvons constater ceci sur l'image de gauche de la Figure 3.5 ou nous apercevons une portion des sphères qui sont en jaune et qui dépassent de la surface du toron qui elle est en bleu.

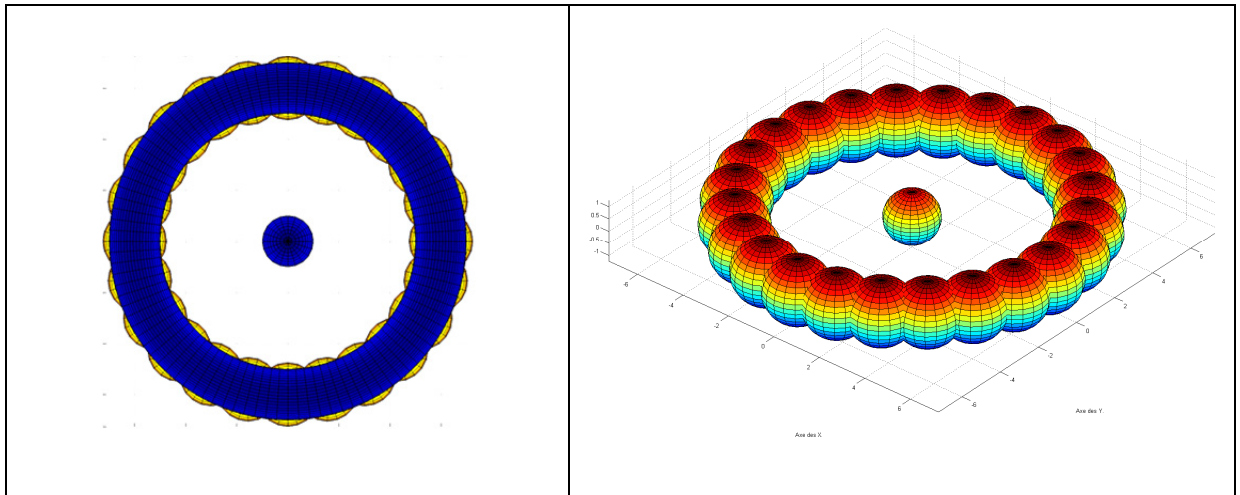


Figure 3.5 Exemple du toron et de la sphère décrit différemment

Nous voyons tout de même que les points qui formeraient le toron seraient bel et bien inclus dans l'une ou l'autre des sphères servant à définir le toron. Par contre, si nous forçons une fusion des prototypes des sphères il est inévitable que le centre de définition migre vers le centre de la sphère. Si nous prenons une paire de sphères qui sont diamétralement opposées et que nous opérons leur fusion sous la contrainte d'utiliser la distance euclidienne nous obtiendrions un centre fusionné qui est équidistant des deux centres initiaux et un rayon de définition de la distance qui devrait inclure la surface entière de chacune des sphères. Nous comprenons donc que la sphère centrale serait forcément incluse dans la nouvelle définition des composantes du toron et que conséquemment il pourrait devenir impossible d'effectuer la séparation des points appartenant à la sphère de ceux appartenant au toron.

Si nous contemplons l'utilisation d'autres mesures de distance, comme celle de Mahalanobis, par exemple, qui permettent de tenir compte de distribution de points ayant des formes plus complexes, nous rencontrerions d'autres problèmes de définition similaires et l'ambiguïté en ce qui concerne l'appartenance de certains des points de la distribution n'en serait pas mieux maîtrisé. Nous pouvons nous expliquer ceci en considérant qu'un toron est une forme géométrique complexe que nous ne pouvons résoudre aisément en ne passant pas par une modélisation paramétrique.

Par contre, si nous conservons tous les prototypes des sphères formant le toron nous n'aurions qu'à forcer l'étiquetage de tous les points membres de ces sphères pour qu'elles soient toutes associées au toron. De cette manière, nous pouvons contrôler l'impact que pourrait avoir la fusion des prototypes sur la pertinence de la modélisation tout en évitant d'utiliser des mesures de distance plus complexe ou encore des structures décisionnelles conditionnelles paramétriques et complexes.

Nous comprenons maintenant que la représentation qui sera utilisée comme base pour décrire les classes et permettre d'effectuer la mise en relation du contenu sémantique de deux images est un autre des éléments fonctionnels que nous devons analyser en fonction d'un cas et/ou d'une combinaison d'images. Ce sont les liens entre les classes établies à l'aide de cette représentation qui nous permettront par la suite de suivre et de quantifier les variations qu'ont subies les classes présentes dans un jeu de données.

En contrepartie, la question de la représentation n'est pas aussi importante si nous avons des images parfaitement recalées, car à ce moment là il est possible d'utiliser la relation géométrique de l'adressage des pixels pour établir la dépendance entre les instances directement. Dans cette situation il est fort probable que les images n'aient pas subi de variations significatives de leurs conditions d'acquisitions ou de leur dynamique spectrale et qu'il soit donc possible de les recaler. De ce qui vient d'être souligné au sujet de la représentation utilisée pour effectuer la mise en correspondance des classes, nous comprenons qu'ici il sera possible d'utiliser la définition des prototypes, au sens des variables, pour être en mesure de réaliser cette mise en relation. La représentation linguistique de l'étiquetage conceptuel n'est pas essentielle dans cette situation. Il est tout de même inévitable que des étiquettes conceptuelles soient utilisées après coup pour décrire le contenu des images à l'aide d'une représentation que nous, être humains, sommes en mesure de comprendre et d'utiliser.

Dès l'instant où la différence entre les images devient plus importante, par contre, il est plus probant, nous semble-t-il, de privilégier la représentation que nous permet l'étiquetage

conceptuel du contenu pour établir la mise en correspondance des classes ainsi que l'analyse de la variation des concepts sémantiques présents dans une série d'images.

Cette représentation étiquetée est le support usuel qui permet d'effectuer la comparaison post classification qui a été mentionnée plus tôt dans ce chapitre. Cette technique n'est qu'une des méthodes qui sont à notre disposition pour réaliser une analyse de changement.

3.5 La détection de différence/changement et les techniques usuelles

À la lumière de ce qui vient d'être présenté, nous comprenons que la détection de différence/changement est un « outil » très pertinent à utiliser dans plusieurs contextes de recherche. Bien qu'il soit souvent difficile de satisfaire à toutes les contraintes fonctionnelles de base qui sont associées aux données et aux techniques qui sont utilisées pour mener des analyses de ce type, il n'en est pas moins important de bien connaître les différents aspects de ces techniques pour qu'un utilisateur puisse être en mesure d'identifier les contextes où il est possible de les utiliser. De plus, ces connaissances aident aussi, dans certains cas, à l'identification des variables pertinentes, des types de changements d'intérêt ainsi que de la méthode d'extraction de ces derniers et, dans une certaine mesure, la performance à laquelle nous pouvons nous attendre en fonction des contextes d'analyse, des données disponibles et des techniques utilisées.

En un premier temps, nous présenterons les contraintes fonctionnelles les plus importantes à considérer lorsque nous contemplons l'utilisation de la détection de différence/changement. Ces contraintes ont été mentionnées, pour la plupart, à différents endroits dans ce document et nous les présenterons ici à nouveau sous une forme condensée.

Nous exposerons, par la suite, les deux grandes familles de méthodes de détection de changement et certaines des techniques reliées à chacune d'entre elles ainsi qu'une explication sommaire de leurs difficultés et des contextes d'utilisations plausibles leur étant propres. Nous n'entrerons pas dans les détails des algorithmes en soi, mais tenterons, autant

que cela en est possible, de donner une idée de certains des éléments fonctionnels les plus importants à retenir pour aider à leur mise en œuvre efficiente. Nous incluons un tableau extrait de l'article de (Lu et al., 2004a) en annexe pour que le lecteur intéressé par les techniques de détection de changement puisse le consulter pour obtenir de plus amples détails concernant les algorithmes et les particularités qui leur sont reliées ainsi qu'une bibliographie sommaire d'articles pertinents.

Nous concluons ce chapitre en donnant quelques exemples de cas réels d'utilisation de certaines techniques de détection de changement dans le contexte de la télédétection. Nous ne porterons pas attention ici aux autres domaines d'application de ces techniques bien qu'il y en ait toute une panoplie.

3.5.1 Les contraintes fonctionnelles inhérentes à la détection de changement

Nous comprenons suite à tout ce qui a été présenté jusqu'ici qu'il y a un grand nombre de facteurs qui viennent influencer ce qui peut être réalisé comme analyse de détection de changement à l'aide d'images satellitaires. Ceci n'est bien sûr pas limité aux images satellitaires, mais il s'agit de notre thème d'analyse et nous limiterons donc notre exploration de ce concept à ce domaine spécifique. Pour des détails d'ordre plus généraux, voire pluridisciplinaires, le lecteur peut consulter la revue de littérature de (Radke et al., 2005) traitant de ce thème et qui offre une bibliographie plus détaillée d'articles reliés aux concepts plus généraux de la détection de changement sans distinction de discipline.

Nous trouvons tout de même de nombreux ouvrages de synthèse qui sont dédiés à la détection de changement dans le contexte de la télédétection et aux différents aspects techniques mentionnés jusqu'ici en lien avec ce point de vue spécifique. Par contre, la plupart de ces travaux traitent de ce sujet en fonction de contextes spécifiques, comme le suivi écologique dans (Coppin et al., 2004), mais il est tout de même possible de trouver des articles traitants du concept d'un point de vue plus général comme dans (Lu et al., 2004a) ou dans (Dai et Khorram, 1998a).

De ces travaux, qu'il s'agisse du contexte de la télédétection spécifiquement ou d'un autre contexte d'utilisation de la détection de changement, nous pouvons identifier un certain nombre de contraintes fonctionnelles qui sont importantes à considérer lorsque nous contemplons l'utilisation de ces méthodes de traitement. Certaines de ces contraintes sont reliées à la télédétection proprement dite, mais sont, en somme, des cas spécifiques de contraintes affectant toute analyse de ce type.

Ces contraintes peuvent avoir des conséquences sur différents aspects du traitement, mais il est plus important de considérer l'ensemble de l'analyse en fonction du résultat de la détection de changement lorsque nous évaluons ces éléments techniques et leur impact sur l'objectif visé. La qualité du résultat, la précision de la détection et de la classification des changements peut être affecté par plusieurs éléments comme ceux identifiés dans (Lu et al., 2004a) qui sont :

- La qualité du recalage,
- La qualité de la calibration et/ou de la normalisation radiométrique,
- La complexité de la zone géographique, des points de vue topographique et de l'utilisation de territoire à l'étude,
- La disponibilité de vérité terrain pour une région donnée,
- La technique de classification, de mise en correspondance et de suivi des classes,
- La technique de détection de changement et des algorithmes utilisés,
- L'expérience et les compétences techniques de l'analyste,
- La connaissance de la zone à l'étude,
- Le coût de l'analyse et le temps disponible pour mener l'analyse.

Nous constatons que plusieurs des éléments que nous avons soulignés dans les sections précédentes se retrouvent dans cette liste. Il y a d'autres facteurs qui peuvent avoir un impact sur la sélection d'une méthode de détection de changement, mais il s'agit de cas plus spécifiques qui ne seront pas traités dans le contexte de ce document.

Les éléments les plus prépondérants que nous avons mentionnés et qui sont aussi identifiés dans (Lu et al., 2004a) que nous retrouvons aussi dans plusieurs autres ouvrages de ce type se résument de la manière suivante :

- Le recalage d'image et la précision de la transformation réalisée, donc de tout ce qui concerne les prétraitements (l'orthorectification et le géoréférencement), le recalage et le bruit de recalage résiduel,
- La correspondance radiométrique des images et/ou la correction radiométrique reliée aux phénomènes atmosphériques, en somme il s'agit de la normalisation des images d'une série pour minimiser les variations accidentelles de représentation,
- La date d'acquisition, idéalement nous désirons des images quasi annuelles pour minimiser l'impact des variations saisonnières et/ou phénoménologiques,
- L'utilisation d'images provenant de capteurs aussi similaires que possible, autant du point de vue de la résolution spatiale que spectrale, s'il n'est pas possible de travailler avec des images du même capteur.

Nous voyons en comparant les deux listes que la majorité des différents éléments de la première s'insèrent dans l'un ou l'autre de ces quatre grands groupes de contraintes fonctionnelles à part les notions qui sont directement reliées à la classification des données, à l'analyste et à ses connaissances propres. Ces derniers concepts sont cependant un élément incontournable de la chaîne de traitement mise en cause par la détection de changement et à notre sens font partie intégrante de ce concept. Conséquemment, nous groupons classification et détection de changement en un seul bloc, car les contraintes affectant l'un des paliers ne peuvent faire autrement que de se transférer à l'autre.

Nous rappelons ici la chaîne de traitement qui a été présentée dans le CHAPITRE 1 qui nous a permis de faire ressortir le fait que l'ensemble du concept peut être schématisé en fonction des :

- Données qui sont utilisées et des prétraitements leurs étant reliés, le point d'entrée de la séquence, ce bloc de traitement est le précurseur de toute analyse en télédétection qu'il s'agisse de détection de changement, de différence ou simplement de la classification de l'usage du territoire,
- Techniques de classification et d'analyse utilisées pour établir les classes d'occupation du territoire pour une région donnée, ce bloc de traitement est précurseur à toute analyse de changement et peut être mis en œuvre de différentes manières en fonction de la qualité du recalage réalisé,
- Techniques de détection de changement proprement dites qui reposent sur le résultat de la classification pour établir quelles classes ont changé et pour quantifier cette variation,
- Création des produits cartographiques dérivés mettant en valeur les changements survenus.

Comme la détection de changement est la dernière étape du traitement reliée à l'analyse des images et de leurs différences, nous comprenons que toutes les étapes la précédant ont un impact direct sur ce qui pourra être identifié et que la cascade d'opérations ne peut faire autrement que de passer au prochain palier toute erreur ou distorsion de l'information résultant des différents traitements utilisés. En fonction de la marge d'erreur qui est attribuable à chaque palier et à l'accumulation des erreurs, il est inévitable qu'il y ait de fausses détections et des omissions de détection si nous considérons l'image en entier. Par contre, rien ne garantit que ces erreurs nous empêchent de réussir à créer les produits cartographiques dérivés qui sont requis pour assister à la gestion des efforts de secours. Il faut être conscient de ceci et en tenir compte lorsque nous analysons le succès relié à l'utilisation d'une technique de détection de changement dans un contexte donné. Il n'est pas nécessairement utile d'obtenir une classification parfaite et complète de toute une image pour

être en mesure d'établir ce qui est différent entre deux images d'une même région. Ce qui nous permettra de définir ce qui est pertinent est évidemment dicté par le contexte de l'analyse ainsi que le but du traitement.

3.5.2 Les types de changements traitables

Nous avons donc plusieurs éléments qui ont une influence incontestable sur ce qui pourra être détecté comme différences/changements entre des images d'une même région. Ces éléments doivent être bien compris et évalués en fonction du contexte de réalisation pour que nous puissions obtenir une classification intelligente et bien fondée de l'usage du territoire d'une région qui sera propice à nous permettre de quantifier les changements étant survenus à telle ou telle classe entre les dates d'acquisition des images utilisées.

Nous nous intéressons donc à ce qui change entre les images. Mais à quoi pouvons-nous nous attendre comme résultats des analyses de changement? Les résultats que nous obtiendrons sont de deux types : binaire, *Change Mask Development* (CMD) en anglais, et explicite, en anglais *Categorical Change Extraction* (CCE).

La détection de changement binaire

Le résultat d'une analyse de changement binaire est une détection des différences perceptibles entre les images d'une série sans distinction d'appartenance de classe. Il s'agit en fait d'une classification binaire des pixels qui met en valeur ceux qui ont changé versus ceux qui n'ont pas changé.

Lorsque la technique de détection de changement utilisée fait partie de cette catégorie, nous comprenons évidemment qu'il est nécessaire d'utiliser un palier de classification supplémentaire pour nous permettre d'analyser ce qui a changé et pour être en mesure d'effectuer la classification de ces changements en fonction des classes d'occupation du territoire et/ou du thème d'intérêt de l'analyse. Essentiellement, nous devons comprendre que

ces techniques ne nous donnent que les pixels ayant changé sans aucun détail en ce qui concerne leur changement d'allégeance de classe. Il est donc essentiel de réaliser une classification supplémentaire pour être en mesure de séparer les types de changements détectés et pour arriver à faire ressortir la composition sémantique de la variation du contenu de l'image.

La majorité des techniques usuelles de détection de changement qui sont utilisées à l'heure actuelle font partie de cette catégorie. Le choix d'une méthode plutôt qu'une autre dépend de ce qui est recherché, du type des images utilisées ainsi que de la complexité du phénomène à l'étude. Dans bien des situations, il est beaucoup plus simple de réaliser une classification binaire de ce type, en premier lieu, puis de réaliser la séparation des classes comprises au sein des pixels identifiées par la suite pour finalement arriver à quantifier ce qui a changé entre les images de la série en fonction de ce que nous recherchons. Ceci est principalement relié au fait que parmi la plupart des cas de figure qui sont plausibles de se présenter dans un contexte de gestion de catastrophe, nous ne nous intéresserons qu'à quelques classes et donc il n'est pas nécessaire d'obtenir une classification de tous les pixels de l'image, mais seulement de ceux qui appartiennent aux classes ciblées.

Nous comprenons ainsi que ces techniques doivent être supervisées pour que les changements pertinents puissent être explicités par une analyse supplémentaire. Ceci peut être comparé d'une certaine manière à la classification semi-supervisée qui a été mentionnée à la section sur la classification de l'occupation du territoire que représentent les images que nous utilisons.

Comme nous pouvons nous en douter en réfléchissant à ce qui a été mis de l'avant par notre discussion des techniques de classification, l'automatisation complète des techniques de détection de changement faisant partie de cette catégorie est difficilement concevable à moins d'avoir déjà traité au moins une paire d'images de la série et d'avoir établi un modèle de classification réutilisable.

Cette famille de techniques de détection de changement est celle qui contient le plus de membres des deux. Il y a toute une gamme de variables, de techniques de classification et de méthodes d'analyse des changements détectés qui peuvent être utilisés et dont l'agencement et l'imbrication sont la base conceptuelle de plusieurs des courants de développement reliés à la détection de changement.

Ces techniques sont difficiles à mettre en œuvre dans bien des situations, mais sont tout de même très utiles.

La détection de changement explicite

En contrepartie, nous retrouvons des techniques de détection de changement explicite qui permettent d'obtenir une représentation de la variation des effectifs des classes qui exprime essentiellement la relation de/vers. Nous voulons dire par ceci que ces techniques permettent d'établir qu'un pixel qui était membre de la classe Y est maintenant devenu un membre de la classe Z.

Intuitivement nous comprenons que cette représentation de/vers est plus propice à nous permettre de bien comprendre ce qui se produit comme changement d'allégeance des pixels entre deux jeux de données image. La variation de peuplement des différentes classes est donc un indicateur important des changements potentiels qui peuvent être survenus et permet d'établir quelles classes doivent être analysées plus en profondeur, si cela est pertinent, en fonction du but.

Nous insistons ici sur le fait que cette famille de méthodes de détection de changement est la plus pertinente à envisager dans bien des contextes. Par contre, les techniques qui font parties de cette famille sont beaucoup plus difficiles à mettre en œuvre pour diverses raisons. Sans se soucier d'explicitement toutes les difficultés qui sont reliées à cette famille de techniques que nous pouvons envisager utiliser, il nous faut souligner ici qu'une part importante de la complexité reliée à l'utilisation de ces techniques provient encore ici du recalage des images.

Typiquement, les méthodes qui sont membres de ce groupe de techniques reposent sur la classification exhaustive de tous les pixels en classes mutuellement exclusives, ce qui en soit est déjà une tâche complexe, et sur l'analyse comparative simultanée des pixels correspondants à travers les images de la série. La classification peut être réalisée pour chaque image séparément ou encore en combinant les données des images en un seul vecteur de descripteurs par pixel, ce qui est possible à en utilisant une STIS par exemple. Ce dernier sera classifié de manière à faire ressortir les classes stables, en fonction de variations cycliques dans certains cas, celles pour lesquelles il n'y a que peu de variation de la description pour chaque pixel membre et les classes ayant subis des variations de peuplement de définition ou de position.

Conceptuellement, nous nous attendons à ce qu'un pixel ayant subi un changement quelconque n'ait pas la même définition, au sens des variables, dans les deux images. Donc, si nous considérons les descripteurs de chaque pixel, nous aurons des pixels, n'ayant pas ou peu subis de changement, qui auront des descriptions très similaires dans chaque moitié du vecteur concaténé des descripteurs ou encore dans chaque image si elles sont classifiées séparément. Par contre, les pixels associés à des changements seront inévitablement différents d'une image à l'autre ou pour chaque moitié d'un vecteur descriptif concaténé.

Les exemples des classes qui seront identifiés et utilisés pour développer le modèle de classification qui sera utilisé doivent permettre de représenter toutes les combinaisons plausibles de descripteurs qui forment les objets d'intérêt. Nous sommes donc forcés d'admettre que, dans bien des cas, l'explosion combinatoire des possibilités reliées aux migrations des pixels ainsi qu'à leurs changements d'allégeances devient rapidement très complexe à peupler d'exemples probants de ce que nous recherchons.

Nous voyons ici à quel point il y a une forte dépendance entre les pixels qui sont considérés et comparés et la justesse du résultat de classification. Conséquemment dès qu'il y a un décalage, aussi ténu soit-il, entre les pixels des images, il est inévitable que la validité de la comparaison décroisse très rapidement comme nous pouvons nous en douter en pensant à

tout ce qui a été mentionné jusqu'à ce point au sujet du recalage et de son impact sur l'analyse d'images satellitaires.

Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, le recalage ne peut être parfait en tous points des images pour diverses raisons, et ce, surtout dans un contexte de gestion de catastrophe pour cause des considérations temporelles reliées à l'urgence de la situation. Il est donc peu probable que ces techniques puissent être utilisées dans ce contexte.

De plus, il faut comprendre que, même si les images sont parfaitement recalées, les techniques qui font partie de ce groupe sont en général des procédures supervisées qui doivent être ajustées pour chaque nouveau cas de figure qui se présente. Comme nous l'avons mentionné à la section traitant de la classification des données images, les techniques supervisées doivent être alimentées d'exemples probants, de chaque classe, qui sont étiquetés et utilisés pour établir le modèle de classification pertinent.

Il est donc théoriquement possible d'obtenir une classification des pixels en fonction de leur migration de/vers ou de leurs changements d'allégeances qui nous permette d'établir la variation de l'occupation du territoire pour une région donnée. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que pour obtenir cette représentation il est crucial de pouvoir avoir confiance en la qualité du recalage et d'avoir soit accès à des données supplémentaires qui permettent d'assigner à différents pixels une classe d'appartenance ou encore de réaliser une analyse initiale qui permette d'établir l'étiquetage des pixels qui constitueront la base d'apprentissage. Du plus, il est important de souligner que dans ce cas de figure il ne suffit pas d'avoir des exemples des classes d'occupation du territoire, mais aussi des changements pris au sens des pixels. Le nombre d'exemples qui devront être identifiées et étiquetés pour constituer la base d'apprentissage pertinente est donc considérablement plus imposant à cause des variations de/vers qui peuvent survenir pour une classe donnée que dans un cas de classification d'une seule image.

À titre d'exemple, pensons un instant à une inondation. Nous aurons nécessairement une croissance de la classe eau, mais ce qu'il faut retenir est qu'il sera nécessaire de trouver un nombre d'exemples du passage de pelouse à eau, d'asphalte à eau et ainsi de suite. La complexité de peuplement de la base d'apprentissage peut donc rapidement devenir non tractable en fonction de l'explosion combinatoire des changements de/vers qui sont plausibles de se présenter. Il est bien sûr possible d'utiliser une phase initiale de classification non supervisée pour tenter de regrouper les pixels en fonction de ces relations pour établir la base d'apprentissage, mais ici nous nous retrouvons encore une fois dans une situation non automatisable.

Nous avons donc deux modes d'analyse qui englobent toutes les techniques usuelles de détection de changement. Chacun de ces modes de traitement a une pertinence qui peut être établie en fonction de la qualité du recalage, du type d'analyse en cours ainsi que du délai qui est disponible pour effectuer le traitement.

3.5.3 Les techniques usuelles de détection de changement

De nombreuses techniques de détection de changement sont d'usage courant à l'heure actuelle en télédétection. Ceci découle bien sûr de la grande diversité de formats d'images et de techniques de classification qui constituent les deux premiers paliers de traitement qui ont été présentés dans les chapitres précédents. Pour faire face à la grande diversité de scénarios d'utilisation de la détection de changement, nous comprenons qu'il y ait une panoplie impressionnante de techniques qui s'offrent à nous pour tenter de résoudre un problème donné. Par contre, il faut que nous retenions que toute analyse de ce type repose sur la pertinence des variables utilisées pour décrire le contenu d'une image et sur les choix de techniques de classification et de comparaison qui seront utilisées.

Toutes ces techniques ont inévitablement leurs contextes d'utilisation pertinents qu'il faut être en mesure d'identifier pour que les choix que nous faisons nous permettent d'obtenir des résultats de détection propices à nous permettre de quantifier les phénomènes sous étude.

Plusieurs variantes de chacune de ces techniques existent et sont habituellement le résultat de modifications qui sont apportées à une technique pour l'adapter à certaines conditions d'utilisation spécifiques. Nous ne couvrirons ici que les techniques de base, car les variantes sont reliées à des cas d'utilisation trop spécifique pour que la considération de généralisation des techniques à plusieurs cas de figure puisse être satisfaite. Nous présenterons tout de même certains des mécanismes d'évolution reliés à certaines techniques et représentations qui sont utilisées pour faire ressortir le cycle de vie d'un concept analytique de ce type.

Les techniques de détection de changement

Nous commencerons par donner une description générale des techniques de bases et de leurs regroupements conceptuels avant de passer à la présentation des mécanismes d'évolution des algorithmes en soi. Nous proposons de reprendre la classification des techniques de détection de changement mise de l'avant dans (Lu et al., 2004a) mais il faut être conscient qu'il en existe d'autres qui sont tout aussi pertinentes qui sont soit directement reliées à la télédétection comme (Coppin et al., 2004) ou (Richards, 2005) ou encore à la détection de changement prise au sens plus large de la discipline en tant que tel comme dans (Radke et al., 2005) ou (Dai et Khorram, 1998a).

Dans l'article de (Lu et al., 2004a) les techniques de détection de changement sont divisées en sept groupes de méthodes. Chacun de ces regroupements repose sur un concept de base qui est mis en œuvre de différentes manières pour créer une variété de méthodes d'analyse adaptées à divers contextes d'utilisation. Il faut être conscient que peu d'auteurs sont d'accord en ce qui concerne les contextes de traitement, les variables et les meilleures techniques à utiliser. Ceci découle en grande partie du fait que la performance que nous pouvons atteindre en utilisant un algorithme donné dépend fortement du contexte et du type d'analyse ainsi que des images utilisées et par conséquent ne permet pas toujours d'atteindre la même performance pour tous les cas qui peuvent être sujets d'analyse.

La hiérarchie des regroupements proposée présente les techniques de détection de changement en commençant par les plus simples à utiliser et à comprendre pour progresser vers les plus complexes à mettre en œuvre et/ou à comprendre.

Nous retrouvons dans cet article les familles de techniques suivantes :

- Les techniques algébriques,
- Les techniques par transformation,
- Les techniques reposant sur la classification,
- Les techniques de modélisation avancées,
- Les techniques utilisant les représentations et les outils reliés aux SIG,
- Les techniques d'analyse et d'interprétation visuelles, il s'agit donc du traitement et de l'analyse manuelle des images,
- Les techniques autres, qui sont souvent des hybrides ou des systèmes de résolution et d'analyse non généralisables qui ne portent que sur un ou très peu de cas spécifiques d'analyse.

Cette nomenclature est récapitulée dans un tableau compréhensif dans cet article qui classe les techniques en fonction de leurs caractéristiques, de leurs avantages et désavantages, de leurs complexité d'utilisation et qui donne aussi des exemples de travaux mettant en œuvre les techniques présentées ainsi que les facteurs clés reliés à leur utilisation probante. Nous ne reproduirons pas ce tableau ici, mais tenterons de faire ressortir les éléments qui nous semblent les plus importants. Pour des détails supplémentaires ou des références bibliographiques portant sur une technique spécifique, nous suggérons au lecteur de consulter cet article ou le tableau qui est reproduit à l'ANNEXE I de ce document.

Nous réitérons ici encore que toutes ces techniques de détection de changement présupposent un recalage quasi parfait des images à analyser ainsi que de la calibration radiométrique des images. Sans respecter ces deux éléments techniques contraignants, la performance citée dans les différents articles ne pourra être atteinte pour la plupart des cas de figure.

Les techniques de détection de changement algébriques

Cette famille de méthodes tire son inspiration des variables mêmes. Le concept est somme toute assez simple et découle de certains des éléments que nous avons mentionnés à la section traitant des descripteurs qui font partie du CHAPITRE 1 de ce document.

Rappelons-nous ce qui a été dit au sujet de l'image de différence qui résulte de la soustraction d'une image de l'autre pixel par pixel par bande correspondante. Si les images sont parfaitement recalées, et corrigées pour réduire leurs différences radiométriques, le résultat de la soustraction sera quasi nul pour les pixels qui n'ont pas de variations significatives entre les images et aura une valeur quelconque pour tout pixel ayant changé. Ce que cette valeur sera dépend évidemment de ce qui est arrivé et sera différente en fonction de différents phénomènes.

Cette classe de techniques de détection de changement fait partie des algorithmes qui nous permettent d'obtenir une représentation du type masque de changement binaire. Ceci sous-entend bien sûr la nécessité de réaliser des étapes de classification et/ou d'analyse supplémentaires pour être en mesure d'identifier les différents types de changement étant survenus entre les deux dates d'acquisition des images.

Certaines des techniques de détection de changement qui font partie de ce groupe sont :

- La soustraction d'images, par bande correspondante,
- Les ratios d'images, par bande correspondante,
- La soustraction d'arrière plan,
- La régression d'image,
- L'analyse des vecteurs de changement, de l'anglais *Change Vector Analysis* (CVA).

Le traitement à l'aide de la technique CVA est un peu plus complexe que les autres et est essentiellement un raffinement de cette famille de techniques qui vise à donner une représentation plus claire des différents types de changements survenus. Nous utiliserons cette technique plus tard pour présenter le concept d'évolution des algorithmes posé plus tôt.

Ces techniques peuvent être utilisées pour traiter toutes les combinaisons de variables que nous puissions envisager d'utiliser tant que nous nous assurons de les traiter par paire couplée. Il faut retenir que ce qui est vrai pour la différence d'image l'est aussi pour le ratio de bande bien que la valeur associée à un pixel n'ayant pas changé ne sera pas la même que celle pour le cas de différence d'image. Tout de même, le concept est le même et peut être considéré de la sorte pour simplifier la compréhension de ce qui est pertinent à retenir pour des analyses plus approfondies du résultat de détection.

Une des caractéristiques communes à toutes ces techniques est la nécessité d'identifier un, et parfois plusieurs, seuils pour séparer les pixels susceptibles de représenter des changements de ceux qui ne le sont pas. Le seuil qui sera choisi aura inévitablement à être ajusté pour que le masque de changement soit adéquat et justifié en fonction des différents contextes d'utilisation de ces techniques. Nous réitérons, ici encore, que dès que nous parlons de sélection de seuils ou d'ajustement de paramètres, qu'il est difficile de penser que nous pourrions automatiser ces algorithmes d'une manière généralisable. Il sera donc fort probablement inévitable de travailler en mode semi-automatique et/ou supervisé.

L'autre élément qui a un impact certain sur la performance de ces techniques est le choix des variables de traitement qui seront utilisées. Comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises, cette question est difficile à bien cerner et dépend souvent des connaissances techniques de l'intervenant qui mène l'analyse.

Comme il n'y a pas d'outil de recherche interactif permettant de consulter les connaissances qui sont distribuées de part et d'autre du corpus de littérature pertinent d'une manière rapide et efficace, nous ne pouvons pas nous surprendre que, bien qu'il y ait des combinaisons de

variables qui ont été prouvées pertinentes dans certains contextes d'analyse, les intervenants dans cette situation retombent plutôt sur l'analyse visuelle des images. Ceci est bien sûr différent dès que l'intervenant possède les connaissances requises et peut les utiliser pour effectuer la classification et l'analyse des images à l'étude.

De ce groupe de techniques, la soustraction d'image est celle qui est le plus souvent utilisée car elle est la moins compliquée à mettre en œuvre et à interpréter en fonction des résultats du traitement (Lu et al., 2004b). L'analyse des vecteurs de changement est aussi très utilisée, mais comme nous l'avons mentionné, cette technique est une composante supplémentaire qui va de pair avec la soustraction d'image et qui permet de séparer les amas de pixels ayant potentiellement changé en nuées d'échantillons séparées. Il est important de réaliser que l'étiquetage des classes de changement est une étape qui suit l'exécution de cette méthode qui implique que les groupes résultants soient interprétés pour établir ce qu'ils représentent et donc il est inévitable qu'un intervenant ait à réaliser cette part du travail.

Il s'agit tout de même de la classe de méthodes la plus simple à utiliser et conséquemment elle devrait être évaluée en premier lieu.

Les techniques de détection de changement par transformation

Ce groupe de techniques tire son inspiration de la modélisation statistique de l'information et de l'estimation puis la combinaison des variables pour établir une représentation secondaire permettant d'éliminer la redondance des variables en les combinant de manière à obtenir une nouvelle représentation de l'information pour laquelle les variables présentent moins de corrélation. Il s'agit d'une vision systématique de l'analyse statistique des propriétés des variables, que nous avons soulignée à la section traitant de la classification, qui peut être réalisée à l'aide d'outil d'analyse statistique ou encore d'une manière plus systématique en utilisant l'un des algorithmes qui ont été développés pour réaliser ce type d'opération.

Il s'agit essentiellement d'une transcription de l'information qui peut dans certain cas mener à une représentation qui soit plus propice à permettre d'identifier certains types d'information que ce qui était possible en utilisant les variables de base. Parmi les techniques membres de ce groupe, nous retrouvons :

- L'analyse par décomposition en composantes principales (ACP), l'ancêtre conceptuel de ce groupe de méthodes,
- L'analyse Kauth-Thomas, qui est appelée *Tasseled cap transform* en anglais, souvent désignée par l'acronyme KT,
- La transformation Gramm-Schmidt,
- La transformation Chi-Square.

Toutes ces méthodes transposent l'information en utilisant des concepts statistiques en vue de séparer l'information et d'éliminer la redondance potentielle de la description qui peut dans certaines situations rendre l'identification de phénomènes distincts très complexe. L'idée directrice est donc qu'il est plus facile de découvrir la représentation associée aux phénomènes d'intérêt en utilisant cette seconde représentation que celle que nous avons à l'origine.

De ces méthodes, l'analyse en composantes principales et la transformation KT sont celles qui sont le plus utilisées. Ceci découle de deux éléments importants qui sont la difficulté d'interprétation des résultats des transformations Chi-Square et Gramm-Schmidt d'une part et de l'autre le fait que ces deux techniques ne sont pas disponibles parmi les outils qui sont offerts dans la plupart des logiciels de traitement d'image qui servent à analyser les images satellitaires.

Nous n'exposerons donc que les concepts reliés l'ACP et la transformation KT. Il est important de souligner encore ici que nous supposons un recalage quasi parfait des images pour que l'utilisation de ces techniques permette d'obtenir des résultats probants. Nous pouvons donc utiliser un vecteur concaténé qui contient toute l'information des deux images.

De ce qui a été dit à ce sujet, il est évident que dans cette situation, il y aura une différence notable entre les pixels associés à des adresses pour lesquelles il n'y a pas eu de changements et pour les pixels pour lesquels il y a eu changement. Par contre, dans la majorité des cas, les pixels qui ont subi des changements significatifs seront théoriquement beaucoup moins nombreux que ceux qui sont demeurés stables, ce qui découle de la taille de ces images.

Lorsque nous optons d'utiliser l'ACP pour mener une analyse de changement, nous visons une transposition de l'information qui sépare les échantillons en fonction de nouvelles variables pour lesquelles l'information des nouvelles variables est décorrélée. Les nouvelles variables sont des sommes pondérées des variables originales dont les coefficients de transcodage sont calculés à partir d'échantillons représentatifs permettant de réaliser cette réduction de la corrélation de l'information. Nous obtenons donc de nouvelles variables que nous appelons les composantes principales, qui sont décorrélées et classées en ordre de décroissance de peuplement. Cette décroissance est considérée comme étant proportionnelle au contenu informatif en fonction de l'ensemble de l'information.

Si nous remettons ces informations en contexte, nous remarquons qu'il y a un lien conceptuel entre l'ordre des composantes principales et le contenu informationnel que nous recherchons. Nous nous intéressons aux pixels qui changent qui sont inévitablement moins nombreux que ceux qui ne changent pas et donc devraient logiquement se retrouver dans une des composantes principales de rang inférieur tandis que la composante stable des images, celle qui n'a pas changé donc, devrait être représentée par les premières composantes principales. Il est évident qu'il faut analyser la représentation obtenue pour établir ce que les différentes composantes principales contiennent et arriver à identifier celle ou celles qui sont composées de portions d'image ayant changé. Ceci est valide si nous utilisons les variables originales pour mener l'analyse, mais si nous utilisons l'image de différence au lieu de ces dernières, les composantes principales de rang supérieur représenteront plutôt le changement tandis que celles de rang inférieur, la composante stable du contenu de l'image.

Il est important de retenir que nous avons ici encore un cas de détection de changement sans distinction discernable de type et qu'il sera nécessaire d'interpréter ce qui est détecté comme étant potentiellement indicateur de changement pour séparer ce qui est accidentel de ce qui est d'intérêt réel. Cette tâche est assez complexe dans le cas de l'utilisation de l'ACP et des transformations Chi-Square ou Gramm-Schmidt, car les variables sont recombinaisonnées et conséquemment ne représentent plus ce que nous utilisons comme représentation conceptuelle interne. L'analyse des images des composantes résultantes est donc inévitable et plus ou moins complexe selon le type de données et/ou de type d'objet d'intérêt. Des trois, l'ACP est la moins compliquée à interpréter et donc est celle de ces techniques qui est la plus utilisée.

La transformation KT est un cas spécifique de cette famille de techniques qui a été développée pour traiter des données images de type satellitaires pour aider à l'analyse de la variation de notre environnement. À l'encontre de l'ACP ou des transformations Gramm-Schmidt ou Chi-Square, la transformation KT permet de transposer l'information vers un autre jeu de variables qui est connu. Les coefficients de transposition sont donc déjà établis et permettent de passer vers une représentation propice à nous permettre d'analyser certaines des variations qui peuvent survenir à notre environnement d'une manière beaucoup plus directe.

Cette méthode a été développée pour traiter des données provenant des plateformes Landsat MSS et Thematic Mapper. Cette technique permet de combiner les quatre bandes de la représentation Landsat MSS pour obtenir quatre nouvelles variables qui représentent respectivement : l'intensité du pixel, en anglais le terme utilisé est le *brightness*, ce qui est appelé le *greenness* en anglais est une mesure de la chlorophylle présente pour une surface donnée, la troisième bande représente les choses jaunes, en anglais le terme utilisé est le *yellowness*, et finalement la dernière variable calculée représente essentiellement le bruit et est appelé *non-such* en anglais. Pour les images Landsat Thematic Mapper les combinaisons de bandes nous offrent les mêmes deux premières composantes avec en troisième place une variable qui représente l'humidité appelée en anglais le *wetness*.

Nous voyons ici que cette technique de transformation est propice à nous permettre de réaliser plusieurs des types de détection de changement que nous pouvons anticiper en fonction du contexte de gestion de catastrophe. La transformation KT a l'avantage de toujours utiliser la même transcription, pris au sens des coefficients de transcodage, ce qui rend la représentation finale indépendante de l'image et reproductible. Par contre, le modèle développé à l'aide de cette technique n'est valide que pour les capteurs modélisés.

L'ACP, par contre, dépend de l'image pour établir les coefficients et doit donc être reprise pour chaque image, ou paire d'images, à traiter. Ceci peut rendre l'analyse et la comparaison des images très complexe à cause de la phase de mise en correspondance des composantes résultantes. De plus, comme il s'agit d'une méthode d'analyse statistique qui a des composantes algorithmiques itératives, nous comprenons qu'il peut y avoir des situations pour lesquelles la justification de la quantité de temps requise pour l'analyse soit très difficile, voire même presque impossible, lorsque nous tenons compte de la probité du résultat.

Les techniques de détection de changement reposant sur la classification

Nous arrivons à la détection de changement effectuée à l'aide de techniques reposant sur la classification des données image. Ce groupe de techniques est le premier que nous rencontrons qui soit propice à nous permettre d'obtenir une description explicite des changements d'allégeance des pixels du type de/vers. Comme nous pouvons nous en douter, lorsqu'il est possible d'utiliser ces techniques nous devrions les considérer en premier si le contexte le permet, c'est-à-dire lorsque nous avons accès à l'information qui nous permettra de créer la base d'apprentissage, pour qu'une fois le traitement terminé, nous puissions facilement analyser et comprendre ce qui s'est produit comme changement entre les dates d'acquisition des images.

Nous parlons donc de techniques de détection de changement qui font intervenir les concepts présentés à la section 2.5 traitant de la classification proprement dite du contenu des images. Toutes les notions mises de l'avant dans cette section demeurent valides ici et nous

ajouterons quelques détails supplémentaires concernant la détection de changement proprement dite.

Un concept important à retenir ici est que ces techniques peuvent être utilisées sans que les images ne soient parfaitement recalées moyennant certaines considérations en ce qui concerne la manière de mener l'analyse. À cet effet, nous commencerons par souligner que c'est d'ici que découle tout ce qui concerne l'analyse et la comparaison post classification. Comme son nom le laisse présager, cette technique vise à comparer deux, ou plusieurs, classifications qui sont en général réalisées séparément. Une fois la mise en correspondance des classes réalisée, il est simple de mesurer, de quantifier et de classer les changements survenus en fonction de leur type, de leur localisation et de leur ampleur. Par contre, il est important de retenir que lorsque nous n'utilisons pas une représentation conceptuelle, comme l'étiquetage conceptuel textuel proposé au chapitre deux, il est souvent très difficile de trouver une méthode automatisable de mise en correspondance des classes.

Ceci peut être expliqué de plusieurs manières, mais il nous semble que la plus simple est de penser à une classe qui se divise en deux sous-classes qui représentent deux phénomènes différents bien que similaires du point de vue des variables. Dans cette situation comment pouvons-nous établir, sans analyse conceptuelle, laquelle des classes doit être mise en correspondance avec la classe originale et laquelle doit être retenue comme indicatrice de changement? Nous réalisons rapidement qu'ici encore il doit y avoir une certaine mesure d'interprétation des résultats, ce qui ne nous permet pas de penser qu'il sera possible d'automatiser le traitement au-delà d'un certain niveau. De plus, il sera presque inévitable qu'un intervenant ait à réaliser soit une portion de la mise en correspondance des classes ou même de bâtir la table de correspondance entière manuellement. Une fois ces mises en correspondances établies par contre, il devient possible de réaliser le reste du traitement d'analyse presque automatiquement et d'avoir confiance en la probité des résultats.

Dans ce qui précède, nous avons considéré un cas de traitement qui est loin du cas idéal dont nous avons parlé plus tôt. Plus nous nous rapprochons du cas idéal par contre, plus il devient

possible d'automatiser de plus grandes portions de la structure de traitement et ceci jusqu'à en arriver au cas idéal pour lequel il devrait être possible d'automatiser la quasi-totalité de l'analyse. Ceci découle de la réutilisabilité du modèle de classification qui sera établi pour effectuer la classification du contenu de la première image.

Rappelons-nous que le cas idéal tel que nous l'avons défini dans ce contexte est constitué d'images qui n'ont subi aucune, ou du moins très peu, de variations de leurs conditions d'acquisition et qui ont été prises avec des conditions environnementales et d'acquisition essentiellement identiques. Comme nous l'avons mentionné à la section traitant de la classification, dans ce contexte spécifique il devrait être possible de réutiliser le modèle de classification issu du traitement de la première image pour classer la seconde afin d'obtenir une division des pixels qui soit conceptuellement similaire. Nous comprenons que dans cette situation la mise en correspondance peut être réalisée automatiquement soit en utilisant les variables mêmes ou les étiquettes. N'oublions pas que dans cette situation comme nous obtenons essentiellement les mêmes classes, au sens des variables, il devient donc possible d'assigner les étiquettes aux classes automatiquement. Nous pourrions donc utiliser soit les étiquettes conceptuelles ou encore les variables mêmes sans grande perte de validité de la comparaison.

Plus nous nous éloignons du cas idéal par contre, plus il devient difficile de pouvoir utiliser les variables qui décrivent les classes pour effectuer la mise en correspondance des classes issues des classifications réalisées. Il faut donc prévoir d'autres mécanismes de mise en correspondance des classes. Nous pouvons toujours tenter de réaliser la mise en correspondance manuellement par observation comparative des classes, mais nous tenons à souligner que cette optique de mise en correspondance peut devenir rapidement très longue selon le nombre de classes à considérer.

Lorsque nous avons un contexte d'utilisation idéal, nous pourrions alors aussi utiliser une concaténation des variables associées aux pixels correspondants et utiliser cette représentation augmentée pour effectuer l'apprentissage du modèle et la classification de

l'image. Cette optique de travail permet, lorsque nous sommes en mesure d'identifier des échantillons probants, de résoudre le problème plus rapidement qu'en traitant les deux images séparément et en comparant les résultats de classification. Par contre, il ne faut pas perdre de vue que dans ce contexte il devient important de pouvoir modéliser toutes les conversions d'utilisation du territoire pour qu'elles soient représentées dans la base d'apprentissage. Comme nous l'avons mentionné plus tôt, ceci peut devenir extrêmement complexe dépendamment du contexte d'utilisation. Nous pouvons toujours réduire la complexité du problème si nous sommes en mesure de représenter le problème en utilisant le concept de « C'est ceci ou ce ne l'est pas ». Par ceci nous voulons dire que si nous pouvons grouper les changements qui ne nous intéressent pas en une super classe qui est constituée de « ce ne l'est pas » peut importe ce que ses membres sont, il devient plus simple de modéliser les classes qui restent qui sont celles qui nous intéressent. Cette approche de résolution n'est bien sûr pas toujours possible et doit être évaluée cas par cas pour établir s'il est possible de l'utiliser.

Les techniques de détection de changement de ce groupe sont très pertinentes et peuvent être combinées de plusieurs différentes manières. Parmi les techniques de ce groupe, nous retrouvons :

- L'analyse par classification supervisée, entièrement ou partiellement explicite, avec la technique de maximisation de l'attente, *Expectation-Maximisation* (EM) en anglais, l'agrégation supervisée, l'analyse spectrotemporelle, avec des réseaux de neurones ou des séparateurs à vaste marge ou autres techniques supervisées de classification et de reconnaissance de forme,
- L'analyse par classification non supervisée, avec l'agrégation non supervisée, les cartes topologiques, *Self Organising Feature Maps* (SOFM) en anglais, de quantification vectorielle ou autre,
- L'analyse par classification hybride, ces techniques reposent habituellement sur l'analyse, supervisée ou non, des résultats de classification binaire et visent à établir la séparation des pixels ayant été retenus par le seuillage initial comme

étant potentiellement indicateurs de changements en différentes classes de contenus qui sont analysées par la suite,

- L'analyse par comparaison post classification, qui est réalisée par un intervenant la majeure partie du temps, mais qui pourrait, dans certains cas, être partiellement automatisable.

Il y a plusieurs autres techniques qui pourraient être présentées, mais la liste exhaustive de toutes les techniques de classification qui peuvent être probantes d'utiliser dans ce contexte d'analyse serait indûment longue et ne fera pas partie de cette présentation. Le lecteur intéressé peut cependant consulter l'ANNEXE I pour avoir plus de détails sur ces techniques ou encore consulter (Duda, Hart et Stork, 2001) pour avoir des détails plus précis.

Il faut tout de même retenir que ces techniques ont presque toutes besoin que la base d'apprentissage soit composée de plusieurs échantillons représentatifs de chaque classe d'intérêt pour que le modèle de classification qui sera établi soit conclusif et, nous l'espérons, généralisable. Comme nous l'avons mentionné à plusieurs endroits, la création de la base d'apprentissage est souvent une tâche très longue et difficile à réaliser. Ceci est vrai surtout si nous considérons que la qualité de la solution est directement proportionnelle dans bien des cas à la qualité de la base d'apprentissage. Nous pouvons aisément concevoir un bon nombre de situations qui rendent l'utilisation de ces méthodes difficilement justifiable, et ce, surtout dans un contexte de gestion de catastrophe.

Les techniques que nous avons mentionnées dans ce groupe, les réseaux de neurones et l'agrégation, supervisée ou non, sont très utilisées ainsi que la comparaison post classification. Ces trois techniques sont en fait les plus utilisées de cette famille. Les algorithmes EM sont les moins souvent utilisés ici à cause de la complexité reliée à l'analyse et à l'estimation précédant le calcul des probabilités et des distributions des classes d'intérêt.

Les techniques de détection de changement utilisant une modélisation avancée

Jusqu'ici, nous avons présenté des techniques de détection de changement qui peuvent être utilisées pour traiter des images autres que des images satellitaires avec essentiellement les mêmes concepts et outils. Dans cette catégorie-ci de méthodes, nous retrouvons plutôt des techniques de détection de changement qui ont été développées pour résoudre des problèmes de télédétection spécifiquement reliés à l'environnement. Les concepts sous-jacents peuvent être adaptés à d'autres fins, mais de prime abord, il faut retenir que ces méthodes sont des outils adaptés à l'analyse d'images satellitaires en fonction de buts qui sont directement reliés à l'analyse de certains types d'occupation de territoire et à leur évolution. Certaines de ces techniques sont tellement spécifiques qu'il n'est pas utile de les considérer si le thème d'intérêt d'une analyse ne porte pas sur le concept pour lequel elles ont été développées, comme c'est le cas pour le modèle de couverture forestière de Li-Strahler par exemple. Nous n'exposerons pas toutes les différentes techniques de cette famille, car leur utilisation est reliée à certains contextes d'analyse très spécifiques. Le lecteur intéressé peut se référer à l'article de (Lu et al., 2004a) ou la portion de cet article qui se retrouve à l'ANNEXE I pour de plus amples détails et une section bibliographique exposant un échantillonnage de ces méthodes de traitement.

Les techniques de cette famille de méthode découlent toutes d'un concept de base qui est généralisable à d'autres contextes d'analyse, bien que les techniques en étant dérivées ne le sont pas. Il s'agit de l'analyse et de la décomposition des caractéristiques descriptives des classes en composantes partielles qui permettent d'aiguiller la classification en fonction d'une structure décisionnelle qui est combinatoire et/ou conditionnelle. Nous avons présenté la logique mise en cause par ces techniques à la section 2.7 présentant l'article « Object-based urban detailed land cover classification with high spatial resolution IKONOS imagery » de (Pu, Landry et Yu, 2011). Le concept de base est qu'il est possible, en fonction des fractions composées de certaines combinaisons de variables ayant des valeurs commune issues de l'espace des descripteurs, de classer les différents types d'occupation du territoire

en utilisant une hiérarchie de description structurée qui est propice à nous permettre d'isoler différents phénomènes d'intérêt.

En se référant au traitement présenté dans cet article, nous réalisons que les fractions de descripteurs sont ce qui permet de séparer au premier palier d'analyse la végétation du reste de l'image puis de séparer le reste en ses différentes composantes constituantes par la suite. Ce qu'il faut retenir ici est qu'il n'y a pas nécessairement qu'un seul amas de pixels qui décrive un phénomène dans l'espace des descripteurs. Il n'est donc pas surprenant que certaines classes puissent être décrites par plusieurs combinaisons de descripteurs auxquels nous apposerons la même étiquette. Ceci va dans le sens de ce que nous mentionnions au sujet de la classification et de la fusion de prototypes au sens des variables versus la fusion au niveau des étiquettes conceptuelles.

Le concept de base par contre peut être apparenté à la régression hiérarchique tel que présenté dans les travaux de (Hwang et Weng, 2000), (Juyang et Wey-Shiuan, 2001) ou (Juyang et Wey-Shiuan, 2007) moyennant certaines contraintes fonctionnelles qui sont directement reliées à l'analyse d'images satellitaires et à la modélisation des phénomènes y étant représentés. Ceci concerne surtout la mécanique de modélisation des combinaisons de descripteurs en fonction des phénomènes recherchés.

Nous comprenons de ceci qu'il s'agit d'une classe de techniques qui ne sont pas forcément utiles dans un contexte de gestion de catastrophe bien qu'elles puissent nous inspirer à considérer le problème d'une nouvelle manière. Il est cependant indispensable que la modélisation d'une région ou d'un concept d'analyse spécifique soit déjà établie pour qu'il soit possible de contempler leur utilisation. Ceci découle de la quantité de temps qui est requise pour développer ces modèles lorsque l'urgence de la situation prime sur les autres considérations.

Nous pouvons toujours contempler l'utilisation de certains de ces modèles comme portion de traitement dans un contexte d'analyse hybride pour tenter de restreindre la portion de l'image

à analyser plus en profondeur, mais il s'agit de contextes spécifiques d'utilisation pour lesquels le modèle de classification hiérarchique est déjà existant et comporte déjà la structure de traitement permettant d'isoler la ou les classes contenant ce qu'il faudra analyser plus en profondeur. Cette situation a peu de chance de se présenter dans un contexte d'utilisation réel relié à une catastrophe d'ampleur.

Les techniques de détection de changement utilisant la représentation issue des SIG

Les logiciels SIG nous permettent d'utiliser de nombreux formats de données qui proviennent soit directement d'images satellitaires, de cartes géographiques ou d'autres sources de données exogènes pertinentes comme celles issues d'un recensement ou d'un relevé sur le terrain par exemple. Ces logiciels comportent de nombreux outils de traitement et d'analyse, mais il est important de retenir que tous les concepts techniques et algorithmiques qui ont été présentés jusqu'ici ne sont pas tous forcément disponibles au sein d'un même outil logiciel. Il faut donc être en mesure d'établir la relation entre ce que nous cherchons à obtenir comme résultats en fonction des données disponibles sous la contrainte d'utilisation d'un logiciel spécifique. Ceci sous-entend une bonne connaissance des données et de leur pertinence d'une part et du logiciel qui est utilisé, ou qui peut l'être, d'autre part.

Nous voyons ici encore une fois une forte dépendance entre la connaissance de l'intervenant en ce qui concerne les concepts techniques, les variables, les algorithmes et les classes d'intérêt ainsi que l'outil qui sera utilisé pour réaliser une analyse. Comme il y a une large panoplie d'options en ce qui concerne les logiciels, et qu'il n'y a pas de garantie que toutes les techniques qui pourraient être pertinentes soient disponibles au sein d'un outil logiciel donné, il ne faut pas être surpris que dans plusieurs cas, bien que des méthodes de traitement soient disponibles, les analyses soient faites manuellement ou du moins partiellement manuellement.

Le traitement à l'aide de logiciels SIG est tout de même utilisé dans plusieurs contextes d'analyse. Le plus gros problème qui découle de l'utilisation de cette méthode de traitement,

autre que ce qui est relié à la connaissance technique des intervenants réalisant les analyses, est la panoplie de formats de données qui peuvent être utilisées. Intuitivement nous déduisons que plus nous avons d'information concernant un sujet, plus nous serons en mesure de tirer des conclusions probantes en ce qui concerne le concept sous étude. Ceci est certainement vrai dans la plupart des contextes, mais en ce qui concerne l'utilisation des logiciels SIG pour réaliser l'intégration de ces connaissances, il faut être prudent. Principalement ceci résulte de la perte de précision qui peut être attribuée à chaque palier de traitement et à chaque source de données utilisées. N'oublions pas que bien que les résultats de ce type d'analyse sont validés pour garantir, autant que possible, la véracité des descriptions qui en découlent, il est tout de même probable que de petites erreurs soient tolérables ou non détectables. Il en découle donc une certaine mesure d'incertitude qui ne peut être éliminée. Ceci bien sûr sans prendre en considération les erreurs d'interprétation et de mise en correspondance qui peuvent s'ensuivre de l'utilisation de nombreuses sources de données, de formats d'images ou de cartes ainsi que de leurs résolutions respectives.

Dans plusieurs contextes de traitement, ces erreurs peuvent être tolérées ou rectifiées après le fait sans qu'il n'y ait de problèmes qui soient reliés à la quantité de temps requise pour le traitement et la validation du résultat. Par contre, dans un contexte de gestion de catastrophe ce délai supplémentaire ne peut être toléré. Nous pouvons donc nous servir de ces outils si le contexte le permet, mais il est essentiel de bien considérer les sources et leur compatibilité avant de nous lancer dans des travaux complexes de traitement et d'analyse qui ne nous permettront pas nécessairement d'arriver au niveau de précision requis et qui conséquemment rendront nuls les efforts déployés.

La possibilité de travailler avec de nombreux formats et type de données que nous offre l'utilisation de ces logiciels est tout de même très attrayante. Par contre, il est essentiel qu'il y ait plus d'efforts qui soient dédiés au développement de techniques de détection de changement reposant sur les logiciels SIG et leur potentiel analytique.

Les techniques de détection de changement reposant sur l'analyse visuelle

Cette catégorie de techniques de comparaison d'images satellitaires est celle qui est utilisée le plus souvent depuis que nous réalisons ce type de travail. Nous utilisons des images satellitaires ou aéroportées qui sont, ne l'oublions pas, les premières images de ce type à avoir été analysées depuis longtemps déjà pour analyser ce qui se passe dans notre environnement. Aux premiers temps de la discipline de la télédétection, le travail d'analyse était entièrement réalisé par observation comparative d'images qu'un intervenant interprétait et codifiait pour ensuite traduire ce qui avait été identifié sur les images vers soit des cartes géographiques ou d'autres supports comme des microfiches des images traitées et augmentées par exemple.

Les photo-interprètes qui œuvrent en télédétection ont donc appris leur profession en grande partie en travaillant de cette manière lors de leur formation et de leurs premiers emplois. L'utilisation de plateformes de traitement numérique s'est développée au fur et à mesure que les outils informatiques sont devenus disponibles. Mais, comme c'est le cas la plupart du temps, l'apparition initiale de ces outils est typiquement reliée aux milieux académiques. Les plus jeunes des intervenants ont donc de nouvelles techniques qu'ils connaissent qui leur permettent d'effectuer ces analyses en utilisant des outils qui sont devenus de plus en plus puissants avec le passage des années. Par contre, d'un point de vue commercial comment justifier l'investissement requis pour acheter des outils que nos ouvriers ne connaissent pas pour réaliser des tâches dont ils s'acquittent déjà très bien pour ne gagner qu'en vitesse de traitement?

La vitesse de traitement peut être utilisée comme mesure d'incitation dans ce cas, car tant que les formats d'images n'ont pas évolué vers quelque chose de nouveau qu'il faut apprendre, il est difficile de justifier de former des employés pour utiliser un outil qui ne leur permettra pas de travailler aussi vite avant un certain délai. En effet, d'un point de vue commercial nous voyons ici la réticence face au changement qui imprègne nombre de domaines. Le mécanisme en est simple, si nous voulons profiter d'une nouvelle technologie il est

incontournable que nous soyons obligé d'embaucher du nouveau personnel qui possède les connaissances requises. Cela représente un coût supplémentaire qu'il faut justifier, ou encore d'entreprendre des campagnes de formations qui prennent du temps de travail d'une part et qui entraîneront un ralentissement du travail jusqu'à ce que la période d'intégration de la nouvelle méthode de travail soit terminée de l'autre. Or nous savons depuis longtemps que cette période est différente pour chacun et que dans certains cas la résistance face au changement est tellement grande que pour certaines personnes cette période ne se termine jamais.

En somme, il faut reconnaître que ceci peut être modélisé pour établir le point critique au-delà duquel il est impossible de réaliser le même profit, ou la même performance, sans adopter le changement. Tant et aussi longtemps que nous demeurons sous ce seuil, la perte encourue par le statu quo ne justifie pas le changement. Par contre, dès que ce seuil est dépassé les pertes ne peuvent plus être justifiées et, conséquemment, le changement s'impose. Cette modélisation est utilisée dans de nombreux contextes et est issue de la discipline de la recherche opérationnelle et de la gestion industrielle.

En fonction de ces considérations, il nous est aisé de comprendre pourquoi dans bien des situations les analyses sont encore réalisées manuellement à l'heure actuelle. Essentiellement la logique peut être résumée de la manière suivante : « Pourquoi utiliserais-je le logiciel de traitement MACHINPATENTE quand je peux analyser ces images plus vite que ce qu'il ne me faudra comme temps pour trouver la fonction GOGOSSEBIDULE et d'arriver à comprendre comment m'en servir? ». Nous pouvons déceler ici une dose de considération d'efficacité, mais aussi une bonne mesure de : « Je fais bien mon travail et je ne vois pas pourquoi... », ce qui est inhérent à l'égo humain.

Il y a tout de même de nombreux contextes qui peuvent profiter de l'analyse d'images satellitaires que nous ne pouvons pas encore traiter avec des algorithmes et qui conséquemment doivent être analysées manuellement.

Les techniques de détection de changement autre

Il y a dans la littérature reliée au domaine de la télédétection toute une gamme de techniques de détection de changements qui ne tombent pas dans l'une ou l'autre de ces catégories et qui sont, pour la majorité d'entre elles, des hybrides de certains des concepts mentionnés dans cette section et d'autres provenant de divers contextes de recherche reliés à l'analyse statistique, à la classification proprement dite et à la reconnaissance de forme. En explorant les différents articles pertinents, nous nous rendons rapidement compte que ces méthodes de traitement et d'analyse sont dédiées à des thèmes extrêmement pointus qui méritent certes d'être traités de la sorte, mais qui ne permettent pas de développer des algorithmes généralisables à d'autres contextes d'analyse.

Un exemple de ce que ce type de méthodes nous permet de réaliser est l'analyse de l'évolution d'un phénomène phytopathologique comme celui de la tordeuse d'épinette ou encore l'agrile du frêne qui a fait surface à Montréal²⁴ récemment. Il est incontestable qu'il soit essentiel de suivre la propagation de ce genre de problème pour que nous soyons en mesure de protéger notre environnement, pensons à la maladie hollandaise de l'orme qui a fait des ravages en Amérique du nord depuis les années trente²⁵ par exemple, et c'est ce qui justifie en grande partie le développement de techniques adaptées au traitement de certains cas spécifiques sans qu'il n'y ait de préoccupation en ce qui concerne la possibilité de réutiliser l'algorithme ailleurs. Il ne faut tout de même pas perdre de vue que ces techniques peuvent être des sources d'inspiration qui permettent d'arriver à de nouvelles techniques adaptables à divers contextes d'utilisation.

Plusieurs des techniques qui servent à ce type d'analyse dédiée sont un assemblage de concepts qui proviennent des autres groupes de méthodes, mais qui sont mis en cascade en vue de résoudre un problème très spécifique. D'autres éléments viennent s'ajouter aux

²⁴ http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7377,91133623&_dad=portal&_schema=PORTAL consulté le 27 septembre 2012.

²⁵ <http://www.mrn.gouv.qc.ca/forets/fimaq/insectes/fimaq-insectes-maladies-hollandaise.jsp>, consulté le 23 octobre 2012.

composantes techniques exposées dans ces sections tels que les systèmes de connaissance, qui peuvent être du type de systèmes experts ou de structures cognitives conditionnelles prédéterminées, de variables spéciales analogues à l'indice NDVI, permettant de représenter des phénomènes spécifiques et encore bien d'autres éléments et concepts.

Le point commun à cette famille de méthode est qu'elles sont toutes développées en fonction d'un objectif de recherche spécifique traitant de concepts très pointus. C'est de cette particularité que découle le peu d'adaptabilité de cette famille de technique de détection de changement.

L'évolution des techniques de détection de changement

Nous avons accès à toute une panoplie d'outils qui peuvent être utilisés pour mener des analyses de changement. Par contre, nous nous rendons compte en pensant à tout ce que nous venons de dire concernant ces algorithmes en fonction des cas de traitement plausibles que nous avons présentés, qu'il ne sera pas toujours possible d'utiliser les techniques existantes dans bien des situations. Nous comprenons maintenant que l'impact de la qualité du recalage est l'élément qui est le plus susceptible de faire échouer une tentative de détection de changement, peu importe la performance de l'algorithme lorsqu'utilisé dans un contexte idéal.

De cette contrainte provient ce que nous considérons comme l'évolution des techniques de détection de changement dont nous avons parlé plus tôt. Nous utiliserons le cas de la différence d'image et de l'analyse des vecteurs de changement pour illustrer la mécanique d'évolution des algorithmes, mais cette mécanique s'applique essentiellement à toutes les connaissances humaines. Nous bâtissons sur ce que nous connaissons.

L'image de différence nous livre, lorsque l'analyse est bien menée, une classification des pixels en fonction du critère changement versus non-changement. En effectuant la soustraction des images pixel par pixel nous obtenons un résultat qui est non nul pour les

pixels ayant changé entre les deux images comme nous l'avons mentionné à plusieurs reprises. Ceci doit être dit avec un léger bémol, car s'il y a variation des propriétés radiométriques, tous les pixels auront une valeur non nulle après la soustraction. En utilisant un seuil approprié par contre, il n'est plus difficile d'éliminer ce résidu qui sera du même ordre de grandeur pour tous les pixels. Nous avons donc, suite à la soustraction et au seuillage du résultat, accès à une liste de pixels ayant potentiellement changé ou un masque binaire qui nous permet d'exclure tous les pixels non pertinents des analyses ultérieures.

La question ici est de déterminer comment traiter ces pixels pour établir leurs classes d'appartenance et de pouvoir, une fois cette relation établie, identifier lesquels ont réellement changé et de quelle manière. Comme nous l'avons dit, une approche qui est souvent utilisée est celle où nous procédons à une analyse supplémentaire qui sert à établir cette classification.

Mais pourquoi donc ne pas modifier le traitement reposant sur l'image de différence pour tenter d'amorcer cette décomposition des résidus? C'est en quelque sorte exactement ce que l'analyse des vecteurs de changement permet de faire moyennant quelques paliers de traitement supplémentaires.

Prenons un cas à trois variables comme exemple. Il pourrait s'agir des couleurs rouge, vert et bleu ou de combinaison de variables différentes comme l'indice NDVI parmi d'autres candidats plausibles. L'idée de base est que si nous soustrayons une image de l'autre, toujours de la même manière, ici nous parlons de l'ordre de soustraction $A - B$ versus $B - A$, bande par bande nous aurons des valeurs soit nulles, positives ou négatives pour chaque pixel pour chaque bande, qui demeurera la « même » pour tout changement s'opérant de la même manière.

En prenant la norme de toutes les valeurs des bandes, au sens du calcul vectoriel, qui résultent de la soustraction nous aurons donc une mesure de l'amplitude du changement, qui devient une nouvelle variable de traitement, pour laquelle les pixels n'ayant pas changé ont

toujours une valeur quasi nulle. Les variations qu'ont subies les trois autres variables permettent quant à elles de définir une orientation angulaire de changement par rapport à l'origine du nouveau système de coordonnées. Essentiellement il s'agit de transformations quasi trigonométriques qui transposent les données originales vers un format polaire en trois dimensions pour ce cas spécifique.

La représentation finale en trois dimensions est donc essentiellement une sphère qui englobe toutes les nouvelles coordonnées des pixels qui se retrouvent par amas en fonction des types de changements survenus. Nous avons donc une nouvelle représentation de l'image qui est indépendante des adresses des pixels et qui les regroupe en fonction de leurs changements. À l'origine de ce système nous retrouvons les pixels n'ayant pas ou seulement peu changé et plus l'amplitude du vecteur de changement croît, plus nous avons des changements qui sont drastiques et qui peuvent être séparés plus aisément des autres types de changements perceptibles dans ces images. Le système d'équations qui nous permet de réaliser ceci en trois dimensions est le suivant :

$$Amplitude = \sqrt{IM1_{i=1 \text{ à } 3}^2 - IM2_{i=1 \text{ à } 3}^2} \quad (3.1)$$

$$Direction_{i=1 \text{ à } 3} = \arctan\left(\frac{IM1_{i=1 \text{ à } 3}^2}{IM2_{i=1 \text{ à } 3}^2}\right) \quad (3.2)$$

Ce système d'équations met en jeu deux images, IM1 et IM2, ainsi que trois bandes d'information allant de 1 à 3 et itérant sur l'indice i. L'indice est le même pour toute les composantes car nous prenons toujours les composante une à une mais par paire d'une image à l'autre.

Nous avons donc quatre variables où nous n'en avons que trois et ces variables nous permettent de décrire les pixels en fonction de l'amplitude des changements leur étant reliés ainsi que de la position que les nuées de points occupent dans la sphère. En utilisant ces informations, nous sommes maintenant en mesure de suivre les changements de cette

représentation transposée et de revenir sur les images pour établir ce qui est arrivé aux membres d'un groupe de pixels et de leur associer une étiquette conceptuelle descriptive.

La Figure 3.6 présente le concept de l'analyse des vecteurs de changement en 2 dimensions, ce que nous obtiendrions du traitement d'une paire d'images panchromatiques par exemple. Ici nous devons comprendre qu'il y a deux valeurs qui décrivent chaque pixel, un angle qui donne la position angulaire d'un pixel dans le diagramme, sa direction donc, et l'amplitude du vecteur qui donne la distance entre l'origine du système et la position du pixel.

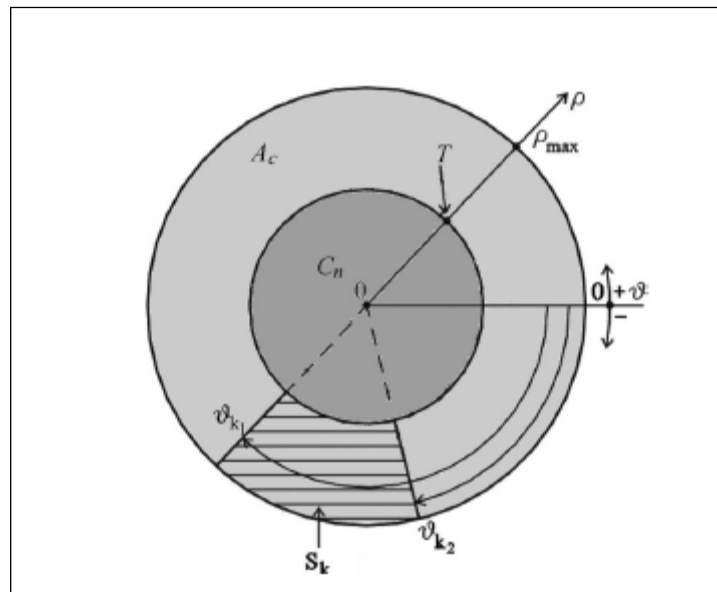


Figure 3.6 Exemple 2D du concept de l'analyse CVA

Tiré de (Bovolo, Bruzzone et Marchesi, 2009)

L'intérêt principal qu'a cette représentation est de concentrer les pixels n'ayant que très peu changés entre les images au centre du nouveau système de représentation qui dans la Figure 3.6 est représenté par le cercle central noté C_n . Cette région de stabilité du diagramme peut être séparée des zones comportant des pixels ayant potentiellement changés de manière significative en utilisant le seuil T . Les amas de points qui se retrouvent au-delà de ce seuil peuvent être considérés comme étant potentiellement indicateurs de groupes de pixels ayant changé et sont caractérisés par leur distance de l'origine ainsi que par les bornes du segment de cercle qui les englobe. Dans cette figure il n'y a qu'un seul secteur qui est identifié par S_k .

qui est délimité par les bornes v_{k1} et v_{k2} . Si nous avons plusieurs types de changements nous aurions aussi plusieurs bornes et amplitude définissant les segments reliés aux différents amas d'échantillons.

Nous voyons ici l'évolution de la technique de l'analyse de l'image de différence qui permet maintenant grâce aux vecteurs de changement d'extraire les nuées de points représentant les différents phénomènes une à une et de les analyser pour établir ce dont il s'agit. La définition en deux dimensions que nous avons présentée ici est explicitée pour des cas ayant plus de variables dans (Bovolo et Bruzzone, 2007). Plusieurs des travaux de ce groupe de recherche portent sur différents aspects de l'analyse des vecteurs de changement et sur leur utilisation en télédétection.

Mais ce n'est pas tout! Un autre élément d'importance qui ressort du développement de cette méthode de traitement, qui est en cours d'analyse à l'heure actuelle par ce même groupe de travail, est la modélisation du bruit de recalage résiduel. Comme nous l'avons mentionné plus tôt dans ce document, cet élément représente un problème considérable relié à l'analyse d'image satellitaires peu importe la technique préconisée, à part l'analyse visuelle bien sûr qui ne nécessite pas que les images soient recalées pour que les analystes soient en mesure de les traiter.

Le concept qu'ils présentent dans (Bovolo, Bruzzone et Marchesi, 2009) est relié aux pixels ayant peu changé et à leur position dans l'espace des vecteurs de changement et à l'analyse multi résolution. Nous savons qu'à l'origine de ce nouveau système de coordonnées nous retrouvons les pixels ayant pas ou peu changé. Le bruit de recalage, qui est de l'ordre de quelques pixels dans le pire des cas, est essentiellement une erreur de description qui provient de la comparaison de pixels qui bien qu'ils soient près les uns des autres ne sont pas les mêmes, mais sont très probablement membres des mêmes classes.

S'il y a erreur de recalage, nous serons probablement en train de comparer un pixel à l'un de ses voisins plutôt qu'à lui-même. Nous nous attendons donc à ce que le résultat de la

soustraction n'ait que peu de chance d'être nul si nous suivons la logique présentée jusqu'à ce point. La valeur résiduelle sera tout de même faible en comparaison d'un changement d'allégeance réel la plupart du temps.

Si nous partons de ce concept qui découle de la technique de base de l'analyse des vecteurs de changement nous sommes forcés d'admettre que le volume central de la sphère formée par les nouvelles variables a de fortes chances d'être peuplé de pixels qui ont soit pas ou peu changé et/ou de pixels qui sont reliés au bruit de recalage résiduel. Il faut donc définir un seuil pour séparer ce qui est probant de ce qui a de fortes chances d'être accidentel. Mais n'y aurait-il pas une méthode que nous puissions développer qui nous permettrait de trouver ce seuil automatiquement ou du moins semi automatiquement?

Bien sûr que nous pouvons trouver un mécanisme qui permet ceci. C'est justement ce qui est présenté dans (Bovolo, Bruzzone et Marchesi, 2009). Le concept dont ils augmentent l'algorithme qu'ils utilisent découle de ce que nous avons mentionné au sujet du recalage et de la résolution des images. Rappelons-nous que le problème du recalage, bien qu'il soit très complexe, est bien compris et presque maîtrisé à de moins grandes résolutions que celles qui sont disponibles à l'heure actuelle. Alors, pourquoi ne pas faire varier la résolution des images, en la réduisant artificiellement, et analyser dans ce nouvel espace de représentation quelles portions du volume de l'espace de description transposé fluctuent et de quelle manière? En procédant de cette façon, ils ont développé une méthode qui permet de minimiser l'impact du bruit de recalage en permettant de modéliser les limites de la région interne de la sphère de représentation qui contient les pixels les plus susceptibles de n'avoir subi que des variations accidentelles et conséquemment de réduire la complexité de l'analyse requise pour étiqueter le reste des nuées isolées.

La Figure 3.7 présente l'effet que la réduction de la résolution a sur la distribution des points dans l'espace de vecteurs de changement. Nous voyons bien sur cette image que la réduction de la résolution des images permet de réduire l'incidence de l'erreur de recalage résiduelle et permet dans une certaine mesure de découvrir les portions de l'espace des descripteurs qui

sont peuplées d'amas stables. En évaluant ces amas, il devient possible de les analyser en fonction de leur stabilité et de ne retenir que ceux qui demeurent présents à tous les niveaux de réduction ce qui peut être un indicateur de véritables changements.

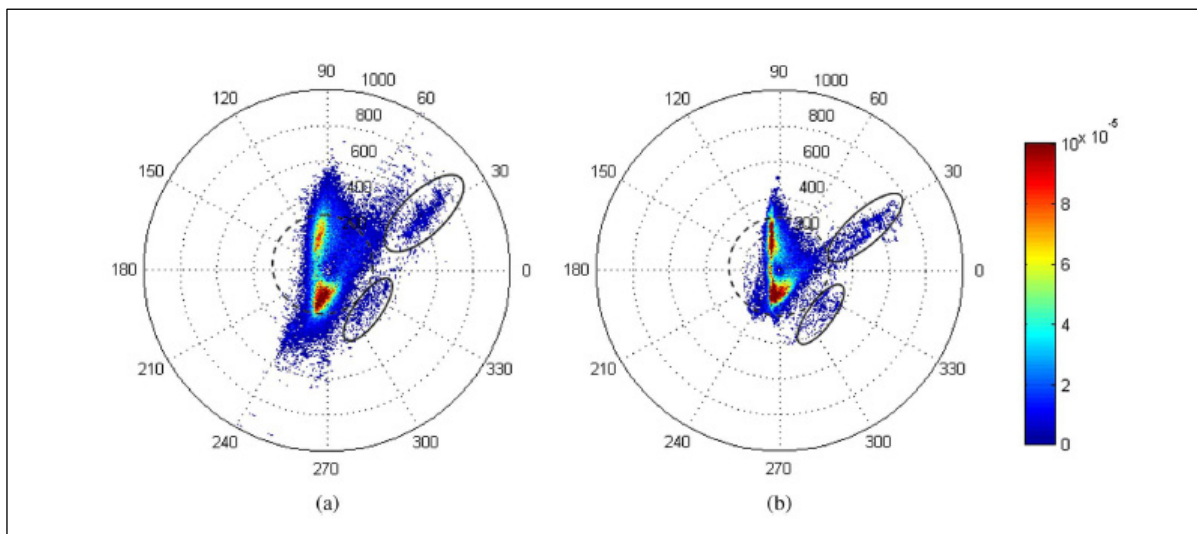


Figure 3.7 Effet de la réduction de résolution sur l'erreur de recalage résiduelle

Tiré de (Bovolo, Bruzzone et Marchesi, 2009)

Ceci n'est bien sûr qu'un exemple d'évolution d'une technique, mais si nous nous attardons à la progression des concepts que nous utilisons en télédétection, nous pouvons retrouver le même genre de mécanismes à plusieurs endroits.

L'utilisation des objets image

Nous venons de voir quelques exemples d'évolution d'algorithmes qui améliorent l'aspect technique par le raffinement de la méthode de base par construction progressive de fonctionnalités nouvelles qui permettent de résoudre des cas qui ne pouvaient être traités avec la technique originale. Ce mécanisme est directement associé à la méthode d'exécution d'un algorithme qui mène à un nouvel algorithme à part entière. Il y a cependant une autre vision de l'évolution des techniques de traitement qui porte plutôt sur l'aspect conceptuel qui est relié à un problème plutôt qu'à la mécanique algorithmique en soi. Cette mécanique

d'évolution repose sur certains concepts qui nous permettent de relaxer un peu certaines des contraintes fonctionnelles comme celle du recalage sans toutefois nous permettre d'en faire fi complètement.

Certains de ces mécanismes reposent sur l'utilisation du concept des objets image qui a été mis de l'avant au CHAPITRE 2 traitant de la classification par exemple. Cette vision de l'analyse de changement est suffisamment flexible pour être utilisée conjointement avec plusieurs des techniques de détection de changement. Pour arriver à utiliser ce concept par contre, il est essentiel de procéder à plus de phases de classification et d'extraction de descripteurs que pour les techniques de base sur lesquelles ces méthodes sont développées. Il s'agit donc d'une extension conceptuelle qui peut être utilisée pour augmenter la performance de base d'un algorithme et de s'abstraire un peu de la contrainte de recalage.

Ce qui permet de diminuer l'impact que peut avoir le recalage sur la détection de changement est le fait que les objets image, qui sont un résultat de la classification et/ou de la segmentation qui est utilisée pour les isoler, ont en général une surface qui englobe plusieurs pixels. En réfléchissant à ceci, nous constatons que pour une erreur de recalage maximale de quatre pixels par exemple, il devrait être possible de mettre en correspondance des objets image ayant une taille supérieure à huit pixels, car la probabilité que leurs surfaces respectives aient une certaine marge de recoupement est très élevée.

De plus, les descripteurs géométriques de formes qui peuvent être extraits des objets image nous donnent accès à un niveau supplémentaire de représentation qui est particulièrement propice à nous permettre de restreindre les combinaisons d'objets image à mettre en correspondance pour une fenêtre d'analyse prédéterminée. La taille de la fenêtre d'analyse peut être établie en évaluant la marge d'erreur de recalage et donc nous permettre de regarder essentiellement de biais au travers de la pile de pixels et d'arriver à déceler les tendances de variations perceptibles sans que l'adressage absolu des pixels soit essentiel.

Nous pouvons considérer que cette vision de l'analyse de changement est une réponse à certaines des contraintes que nous avons mentionnées et qui nous permet de nous abstraire de certaines des difficultés liées au traitement et à l'analyse d'images satellitaires. Par contre, il est important de souligner que l'utilisation efficiente de cette représentation dépend fortement de l'expertise de l'analyste et de la qualité des objets qui découlent du traitement. Ce concept peut tout de même être utilisé de pair avec plusieurs des techniques de détection de changement moyennant évidemment une certaine liberté en ce qui concerne le temps de traitement, car il faut prévoir plusieurs itérations pour chacun des paliers mis en œuvre afin d'arriver à une représentation par objets qui soit pertinente en fonction d'un cas de traitement donné.

Dans ce même esprit, sans utiliser d'objets image proprement dits, nous pourrions tout de même utiliser la base conceptuelle de cette optique de résolution qui nous offre de la flexibilité pour permettre de gérer l'erreur de recalage en utilisant une fenêtre de considération. Ceci pourrait prendre la forme d'une fenêtre d'analyse bornée définie en fonction de l'erreur de recalage maximale qui vise à établir par oscillation la position pour laquelle l'erreur de comparaison entre les images est minimale et de ne retenir que le pixel central de la fenêtre qui provient d'une des images et celui de l'autre image qui serait au centre de la fenêtre lorsque l'erreur est minimale. Ceci ne serait certainement pas toujours une mise en correspondance valide, mais elle le serait tout de même très souvent ou du moins devrait en être très proche.

3.5.4 Cas d'utilisation de détection de changement en télédétection

Tel que nous l'avons mentionné dans ce chapitre, il y a dans la littérature liée à la télédétection un nombre imposant d'articles qui traitent des différents aspects de la problématique de la détection de changement. Ceci n'est pas surprenant lorsque nous nous rappelons que pour bien des phénomènes qui sont d'une importance majeure pour la sécurité de l'humanité et la protection de l'environnement, il n'y a pas d'autres moyens efficaces pour réaliser leur analyse et leur suivi dans le temps. Que ce soit pour des raisons de taille de la

surface à analyser, de manque d'accessibilité de la zone ou toute autre raison il n'en est pas moins important d'être en mesure d'analyser ces phénomènes.

Par contre, il n'y a que très peu d'articles qui traitent de la détection de changement dans un contexte de gestion de catastrophe pour les diverses raisons que nous avons mentionnées. Il y a tout de même certains articles traitant de ce contexte qui commencent à faire surface. Nous ne présenterons ici que des concepts issus de la littérature générale associée à la détection de changement, mais nous présenterons certains des articles traitant de la gestion de catastrophe au prochain chapitre qui traite de l'analyse des résultats d'une intervention de grande ampleur, celle qui a suivi le tremblement de terre d'Haïti en 2010.

Nous ne donnerons pas de détails exhaustifs des articles que nous avons ciblés pour cette section, mais présenterons plutôt les grandes lignes de ce que nous avons noté. Nous ne retenons ici que 27 articles traitant de différents cas d'utilisation des techniques et des concepts de la détection de changement tel qu'utilisé en télédétection. La liste complète des articles se retrouve à l'ANNEXE II de ce document.

Dans ces 27 articles, nous avons isolé certains des concepts qui ont été présentés dans ce chapitre et que nous considérons comme étant les plus importants en ce qui concerne l'utilisation et le développement de ces techniques de traitement et d'analyse menant à une quantification des changements y étant représentés.

Le premier point qui nous semble très important à souligner, et qui à notre sens est un problème considérable, est le nombre de logiciels qui sont utilisés pour réaliser ces analyses. Nous ne parlons pas de différences de plateforme logicielle entre les articles, ce qui en soi serait normal, car le choix d'un outil est une chose personnelle qui découle de nos mécanismes de travail personnel ou de ce qui nous est disponibles. Nous parlons ici de la nécessité d'utiliser plusieurs logiciels pour réaliser la séquence de traitements requise pour effectuer une seule analyse sans quoi les outils requis ne peuvent être mis en cascade comme

nous l'avons souligné avec l'exemple de traitement de la section 2.7 qui conclut le chapitre deux. Parmi les 27 articles retenus, nous retrouvons les outils logiciels suivants :

- Envi,
- eCognition,
- Definiens Pro,
- Erdas Imagine 8.7,
- Matlab,
- Mosaics,
- GICS,
- GEORIS,
- Plusieurs logiciels propriétaires développés sur mesure et non commercialisés.

Chacun de ces outils a ses avantages et désavantages, mais le point le plus important à retenir est que dans plusieurs situations il est impossible de reproduire certaines des expériences présentées dans quelques articles avec d'autres outils que ceux qu'ils ont utilisés à cause de la non-disponibilité des fonctions requises sur certaines plateformes de travail. L'intérêt que nous avons pour une technique de détection de changement plutôt qu'une autre, dans un contexte donné, est proportionnel à sa simplicité d'utilisation et/ou d'implantation. Si nous considérons ceci, ainsi que la contrainte d'efficacité qui est reliée à l'analyse d'images satellitaires dans un contexte de gestion de catastrophe, nous comprenons aisément que les algorithmes qui ne peuvent être programmés facilement et efficacement ou qui ne sont pas disponibles dans un logiciel donné ou ne peuvent être ajoutés sous forme de plugiciel à un logiciel que nous utilisons, ne seront pas utilisés par les intervenants menant les analyses.

Ce n'est bien sûr pas le seul problème que nous soulèverons ici, mais il nous semble que ce point soit important à considérer lorsque nous nous demandons pourquoi tel ou tel algorithme n'est pas utilisé dans un contexte donné bien que les résultats qui peuvent être obtenus par

son utilisation sont théoriquement supérieurs à ceux des autres algorithmes d'une même catégorie.

Les autres points que nous présenterons sont reliés à certains aspects de la problématique de la détection de changement en soi plutôt qu'à l'ensemble de la discipline de la télédétection comme le sont la diversité de plateforme de traitement et la disponibilité versus la non-disponibilité de certains algorithmes spécifiques.

En ce qui concerne les images et leurs résolutions propres, nous devons souligner que les recherches documentaires que nous avons réalisées dans le cadre de ce travail portaient sur la détection de changement réalisée à l'aide d'images satellitaires à haute et à très haute résolution. Les points qui seront présentés ici ne se rapporteront donc qu'à ces formats d'images. Par contre, en fonction de ce que nous avons présenté dans ce document le lecteur doit comprendre que si une technique de détection de changement fonctionne à une résolution donnée, il est plus que très probable qu'elle le soit aussi à des résolutions moindres moyennant un ajustement du concept pour tenir compte de la nouvelle résolution.

Des travaux que nous avons retenus, nous constatons que plusieurs résolutions image différentes sont utilisées pour arriver à différentes fins comme nous l'avons mentionné. Par contre, dans les 27 articles que nous avons retenus nous retrouvons les formats d'images suivants ainsi que leur fréquence d'utilisation :

- Environ 52% traitent de l'utilisation d'images Quickbird ayant une résolution de 0,6 m en mode panchromatique et de 2,4 m en mode multispectrale, les images panchromatiques et multispectrales sont fusionnées pour effectuer un rehaussement dans certains cas,
- Environ 37% des images utilisées proviennent de l'une ou l'autre des plateformes LandSat et ont une résolution allant de 15 à 60m en fonction des différentes bandes utilisées ainsi que des modes d'acquisition,

- Environ 7% des articles retenus utilisent des images Ikonos ayant une résolution de 0,8 m en mode panchromatique et de 4 m en mode multispectrale, les articles retenus ne présentent pas de données Ikonos fusionnées pour rehaussement mais la résolution théorique d'une image Ikonos de ce type est de 0,8 m.

La somme de toutes ces fractions ne donne pas 100% ce qui peut sembler étrange, mais ici nous tenons à préciser que certains auteurs travaillent avec des données simulées qui ne proviennent d'aucunes des catégories d'images que nous avons présentées dans ce document. Les données qu'ils utilisent sont conçues de manière à reproduire les caractéristiques de différents formats d'images connus, mais avec l'avantage de connaître la vérité absolue pour chaque pixel. Ceci permet d'évaluer les algorithmes qu'ils présentent avec certitude en ce qui concerne la performance absolue qui est difficile à obtenir avec des images de cas réel à part dans certaines circonstances pour lesquelles il y a des données exogènes qui permettent d'établir la vérité terrain d'une manière quasi absolue. Nous comprenons, par contre, qu'il est tout de même possible, même dans ces contextes très contraignants, qu'il y ait une légère mesure d'incertitudes en ce qui concerne la performance absolue d'une technique.

De ces articles environ 26% traitent d'images rehaussées, qui sont le produit de la fusion d'images panchromatiques et multispectrales, conjointement avec les images sources. Différents éléments sont présentés dans ces articles, mais dans l'ensemble il s'agit de l'évaluation de la performance de différentes techniques de traitement en fonction des images sources versus celle du même algorithme utilisé pour traiter une image rehaussée de la même scène.

Ce qui est le plus important à souligner selon nous est le fait que parmi ces articles presque 82% traitent de combinaisons d'images recalées. Ce fait n'est pas mentionné dans chacun de ces articles, mais en analysant le texte nous nous rendons compte qu'il s'agit bien d'images qui sont recalées. Ceci, comme nous l'avons souligné à plusieurs endroits dans ce texte, est un problème qui doit être résolu. Qu'il s'agisse de techniques de détection de changement qui ne sont pas affectées négativement par la qualité du recalage, ou du moins qui y sont peu

sensibles, ou de techniques de recalage plus performantes, il est impératif que nous trouvions un moyen de nous abstraire de la complexité découlant de cette particularité pour que les techniques de détection de changement puissent devenir plus généralisables et donc plus automatisables. Sans ceci, il nous semble que le traitement par objet ou encore par oscillation et minimisation de l'erreur résiduelle soit plus propice à nous permettre de développer des techniques de détection de changement flexibles et performantes.

L'analyse multi-échelle ou multirésolution est utilisée dans presque 30% des articles que nous avons retenus. Par contre, près de 63% de ces articles traitent de l'analyse des vecteurs de changement. Ceci va dans le sens de la recherche actuelle qui gravite autour du concept de l'estimation et de la quantification du bruit de recalage résiduel qui, comme nous l'avons mentionné, peut être modélisé en utilisant une combinaison d'analyse des vecteurs de changement et l'analyse multi-échelle pour aider à définir les seuils de séparation du contenu probant versus le contenu accidentel de la classe des changements détectés.

L'analyse des vecteurs de changement est la technique de détection de changement la plus utilisée dans cette série d'articles. Ceci est en partie dû au fait que de nombreux travaux portent sur ce thème à l'heure actuelle, car il semble que le concept directeur de cette famille de techniques nous permette d'arriver à nous abstraire de la contrainte de recalage dans bien des cas. Il n'est donc pas surprenant que près de 52% des articles traitent de l'une ou l'autre des facettes techniques de ce groupe de méthodes et de leur potentiel analytique.

Un dernier point qui nous semble intéressant à souligner est que l'agrégation supervisée et/ou non supervisée est utilisée dans près de 33% des articles retenus. De ces derniers presque 56% traitent de différents aspects de l'analyse des vecteurs de changements. Rappelons-nous ce qui a été dit à ce sujet concernant la séparabilité des types de changements en fonction des nouvelles variables qui sont calculées avec la technique des vecteurs de changement. Dans ce contexte précis, nous n'avons pas vraiment les moyens de nous représenter ce que ces amas peuvent signifier au sein de l'image, mais nous savons qu'ils sont regroupés dans le nouvel espace de représentation en fonction de la similitude des changements survenus. L'agrégation

est donc une technique appropriée pour nous aider à séparer les amas automatiquement, ou semi automatiquement, pour nous permettre par la suite de revenir sur l'image originale et analyser ce que les agrégats identifiés représentent conceptuellement.

Les auteurs des autres articles dans cette série utilisent l'agrégation pour établir des échantillons de départ pour d'autres procédures de traitement qui sont supervisées dans bien des cas. Essentiellement, nous parlons de traitements qui utilisent certains des concepts d'analyse hiérarchique présentés dans l'analyse de l'article de (Pu, Landry et Yu, 2011) qui est à la section 2.7. Dans la plupart de ces articles l'agrégation est souvent utilisée pour créer un masque binaire de changement versus de non-changement qui est utilisé pour restreindre les analyses ultérieures.

Pour le moment, par contre, la détection de changement reposant sur l'utilisation d'images satellitaires à haute et à très haute résolution, peu importe les raisons que nous pouvons invoquer, demeure un problème qui n'est pas résolu. De nombreux travaux traitent de ce thème de recherche et un nombre impressionnant de techniques sont mises de l'avant par les acteurs de cette discipline. Par contre, peu de ces techniques semblent être valides pour tous les cas de figure que nous pouvons rencontrer, et ce, encore plus dans un contexte de gestion de catastrophe où nous devons faire avec des délais très courts.

Nous nous arrêterons ici et tenterons de remettre tous ces concepts en contexte dans le prochain chapitre qui traite d'une action de gestion de catastrophe à grand déploiement.

CHAPITRE 4

UNE INTERVENTION DE GESTION DE CATASTROPHE À GRANDE ÉCHELLE

Les trois chapitres précédents nous ont servi à présenter certains des éléments conceptuels et techniques qui entrent en considération lorsque nous parlons de détection de changement effectuée à l'aide de l'analyse d'images satellitaires. Comme nous l'avons précisé dans l'introduction, ce travail porte sur l'utilisation d'images satellitaires et de la détection de changement pour assister à la planification des efforts de secours après des catastrophes majeures, ce qui est un cas d'utilisation très spécifique ayant ses propres contraintes fonctionnelles.

Nous avons jugé qu'il était nécessaire de bien expliciter les différents éléments que nous avons présentés jusqu'à ce point pour que le lecteur soit bien conscient de la difficulté reliée à l'utilisation des concepts et des techniques associées à ce type d'analyse. Ceci est surtout vrai lorsque nous considérons d'utiliser ces outils dans un contexte de gestion de catastrophe, car le délai disponible pour réaliser les analyses est très court, typiquement de l'ordre de quelques douzaines d'heures.

Le lecteur averti aura compris que l'utilisation de ces algorithmes et techniques est une tâche qui peut être extrêmement complexe, selon le cas à traiter, et qu'il est impératif d'avoir de bonnes connaissances de l'ensemble des techniques, de leurs paramètres propres et de leurs scénarios d'utilisations appropriés pour qu'il soit possible d'arriver aux résultats désirés. Comme les concepts qui entrent en considération proviennent de plusieurs différents domaines de recherche, nous ne pouvons nous surprendre qu'il soit difficile pour un intervenant de réussir à amasser toutes les connaissances requises pour être en mesure de comprendre et d'utiliser tous les outils que nous venons de présenter dans ce texte. Ceci était un des buts que nous visions en choisissant de présenter la détection de changement en soulignant les difficultés qui découlent de chacun des sous concepts présentés en fonction d'une utilisation efficiente dans un contexte de gestion de catastrophe.

Si vous vous demandez en ce moment comment il peut être possible d'utiliser les concepts et les outils que nous avons présentés pour arriver à réaliser les produits cartographiques dérivés désirés dans un si court délai et d'arriver à des résultats probants et utiles, nous avons réussi ce que nous visions par la forme de présentation que nous avons adoptée.

Nous devons surtout retenir de tout ceci qu'il y a une panoplie de concepts, de techniques et d'outils qui peuvent être utilisés pour arriver à réaliser les analyses requises dans un contexte comme la gestion de catastrophe. Par contre, pour que ces techniques de traitement soient utilisées par un intervenant, il est impératif que ce dernier possède soit les connaissances requises pour l'utiliser d'une manière efficiente ou qu'il ait accès à quelqu'un ou à une base de données qui lui permette d'acquérir ces connaissances rapidement et efficacement. De plus, il faut évidemment que la fonction ou l'enchaînement de traitements permettant de réaliser tel ou tel analyse soit disponible dans un logiciel qu'un intervenant utilise. Sans ceci, les connaissances reliées à l'utilisation d'un algorithme spécifique ne servent à rien, car, dans un contexte de gestion de catastrophe, il est évident que le temps requis pour programmer et tester une nouvelle fonction ne sera pas disponible.

Néanmoins, comme nous l'avons souligné à plusieurs endroits dans ce document, il est tout de même possible d'utiliser quelques-unes des composantes d'une chaîne de traitement pour réaliser certaines portions du travail et d'effectuer d'autres portions de l'analyse manuellement. Ceci nous permet de profiter de la réduction du temps d'exécution qui peut être atteinte grâce à une analyse éclairée du cas à traiter, ce qui fait ressortir les portions d'une analyse de ce type qui peuvent être automatisées ou semi-automatisées. Une fois l'analyse du cas terminée, l'intervenant peut identifier lesquels des concepts, algorithmes et/ou techniques qu'il connaît lui permettront de traiter certaines portions du problème à l'aide d'outils numériques pour par la suite réaliser le reste du travail à la « main ».

Mais est-ce le cas? Dans un contexte de gestion de catastrophe, comment sont réellement menées l'analyse des images, la détection de changement et la création des produits cartographiques dérivés?

Pour nous permettre de répondre à cette question épineuse, nous présenterons ici certains des concepts et des constations qui sont soulignés dans deux parutions intitulés « *Special Issue: Haiti 2010 Earthquake* » (Shan, Eguchi et Jones, 2011) de la publication « *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Journal* » qui sont parus en septembre et octobre 2011 et qui sont dédiés à l'analyse de l'intervention de la *Charte internationale : espace et catastrophes majeures* et des travaux de production de produits cartographiques dérivés qui a suivi le tremblement de terre qui est survenu à Haïti le 12 janvier 2010.

Pour remettre tout ceci en perspective, nous commencerons par présenter un article de cette série qui donne les résultats de l'analyse des dommages qu'ont subis les édifices de deux zones urbaines d'Haïti près de Port-au-Prince. Nous passerons par la suite à une analyse plus large de certaines constations présentées dans certains des articles de ces deux parutions qui permettent de faire ressortir les éléments problématiques qui ont été décelés par l'analyse de l'intervention dans son ensemble. Il y a plusieurs points positifs que nous présenterons aussi, mais qui nous semblent moins importants à exposer en détail que ce qui a été identifié comme obstacles au bon fonctionnement du système de diffusion de l'information et du support aux opérations d'analyse et de production des produits cartographiques dérivés pertinents.

4.1 Le contexte général de l'intervention

Suite au tremblement de terre survenu en Haïti le 12 janvier 2010, la *Charte internationale : espace et catastrophe majeure* a été déclenchée pour aider à faciliter l'acquisition et la diffusion d'images satellitaires en vue de permettre la création de produits cartographiques dérivés requis pour aider à la planification des efforts de secours.

Avec plus de 200 000 décès, 100 000 blessés, près de 310 000 édifices détruits, presque 1 000 000 de citoyens sans abris et un coût de reconstruction estimé à entre 8 et 14 milliards de dollars US (Voigt et al., 2011), cette catastrophe est réellement d'une ampleur presque

sans précédent et la place a un niveau d'implication de la communauté internationale de la télédétection de l'ordre de celui du tsunami indonésien de 2004.

Durant les six premières semaines suivant l'événement, l'USGS a distribué plus de 600 000 fichiers d'images satellitaires, soit environ 54 téraoctets de données, pour permettre d'effectuer des analyses de l'impact de cet événement par l'entremise du site « *Hazards Data Distribution System* » (HDDS)²⁶ qui est géré par l'USGS (Duda et Jones, 2011). Ces images avaient deux types de contraintes d'accès, des images disponibles au grand public d'une part et des images avec des accès restreints fournis par différents partenaires commerciaux de la Charte. Les images avec accès limités ne purent être utilisées que par des intervenants mandatés pour effectuer les analyses requises.

Parmi les produits dérivés, nous retrouvons des cartes thématiques de plusieurs types, mais principalement il s'agit de cartes donnant l'amplitude ainsi que la distribution géographique des bâtiments et des infrastructures détruits ou détériorés par la catastrophe. Le tout réalisé, bien sûr, en vue d'aider à la planification des efforts de secours.

Nous procéderons en un premier temps à la présentation et à l'analyse d'un cas de traitement semi-automatique réel issu des efforts déployés pendant la phase initiale de cette catastrophe. Par la suite, nous reviendrons sur les concepts plus généraux identifiés dans ces articles en soulignant ce qui a fonctionné lors de cette action et ce qu'il reste à analyser et à définir pour tenter d'améliorer le système.

4.2 D'un cas réel de traitement d'images satellitaires

Nous reviendrons dans cette section sur l'expérience du tremblement de terre d'Haïti de 2010 vue du point de vue du traitement d'images et de l'analyse, automatique ou non, de leur contenu. Nous concevons que dans cette situation précaire plusieurs types d'informations sont d'un intérêt prépondérant, comme les bâtisses et le système routier, tandis que d'autres,

²⁶ <http://hdds.usgs.gov/hdds/> consulté le 27 septembre 2012.

comme les champs et les rivières, sont essentiellement soit inutiles ou ne font que rendre l'analyse de ce qui est d'intérêt plus difficile.

Dans l'article de (Tiede et al., 2011), paru dans le numéro de septembre de la publication « *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing Journal* » nous retrouvons une analyse réalisée par un groupe de chercheurs qui travaillent au développement d'algorithmes automatiques de détection de dommages structurels pouvant survenir dans des zones urbaines aux bâtiments. L'article traite de la catastrophe et de son contexte, des images qu'ils ont utilisées, de la méthode de détection et de classification des dommages qu'ils ont développée et utilisée ainsi que de certaines des lacunes fonctionnelles qu'ils ont pu décelées lors de la mise en œuvre, de l'exécution de la classification, de la post classification des dommages et de la validation des produits cartographiques résultants.

Le Tableau 4.1 donne la liste des images qu'ils ont utilisées pour effectuer l'analyse des dommages provoqués aux édifices des villes de Carrefour et de Léogâne. Il faut souligner ici que les images ont été modifiées avant même que les auteurs n'aient commencé leur travail et que le contenu de ces images, ici nous parlons des bandes d'informations, comme le proche infrarouge par exemple, constituant chaque image, n'est pas standardisée. Nous remarquons ici que les deux jeux de données telles que livrées ne comportent pas les mêmes bandes d'informations.

Tableau 4.1 Images d'Haïti pour l'analyse des édifices endommagés par Tiede et al.

Lieu	Capteur	Date d'acquisition	Résolution spatiale	Résolution spectrale
Carrefour (avant)	GEO-EYE1	27 juillet 2009	2 m multispectrale 0,5 m panchromatique	4 bandes multispectrales (NIR) + 1 bande panchromatique
Carrefour (après)	GEO-EYE1	13 janvier 2010	2 m multispectrale 0,5 m panchromatique	4 bandes multispectrales (NIR) + 1 bande panchromatique
Léogâne (avant)	GEO-EYE1	1 ^{er} octobre 2009	0,5 m rehaussée par fusion	3 bandes multispectrales (sans NIR)
Léogâne (après)	WORLD VIEW-2	15 janvier 2010	0,5 m rehaussée par fusion	3 bandes multispectrales (sans NIR)

Les images de Carrefour sont celles qui leur ont permis d'obtenir les meilleurs résultats avec l'algorithme qu'ils ont utilisé et de créer la seule de leurs cartes des dommages qui ait été acceptée à l'étape du contrôle de la qualité qui précède toute publication de produits cartographiques dérivés dans le contexte de gestion de catastrophe. Les images sources qu'ils avaient à leur disposition ne comportaient que peu des métadonnées concernant les paramètres d'acquisition ainsi que sur les détails des prétraitements effectués sur les images par les fournisseurs de données. Ces images ont toutes été rééchantillonnées pour réduire la résolution des images originales afin de respecter les règles du gouvernement américain sur la résolution maximale permise pour les données satellitaires d'accès « public ».

En considérant ceci, il est essentiellement impossible de penser que les images n'aient été modifiées par l'inclusion d'artéfacts résultants des différentes procédures de correction géométriques, de sous échantillonnage et de fusion des données utilisées. L'information image n'était déjà plus « pure » avant même que les travaux d'analyse ne soient entamés. De plus, l'information qu'il faudrait utiliser pour être en mesure de quantifier l'impact de ces transformations sur la fidélité du contenu des images n'était, elle non plus, pas disponible.

Tant que les images qui sont utilisées ne seront pas complètes et standardisées, du point de vue des données images et des métadonnées, nous pourrions, si nous sommes le moins cynique, avoir l'impression que tous les beaux discours qui entourent la question de la collaboration internationale et de la nécessité de prévoir et d'implanter les mécanismes de support requis pour minimiser l'impact de catastrophes majeures sur les populations humaines, ne sont que des écrans de fumée qui camouflent d'autres intentions ou plutôt du manque de ces dernières. Ceci est frappant surtout lorsque nous pensons à la dépendance inextricable qui existe entre la stabilité de la représentation, du point de vue des données images, et la réutilisabilité de modèles de traitement connus. Si nous voulons réellement arriver à créer une structure de support pour aider à l'analyse d'images satellitaires pour appuyer les efforts humanitaires, il faut absolument qu'une standardisation des données soit le premier pas.

Néanmoins, l'algorithme qu'ils ont utilisé pour identifier les édifices endommagés dans les deux villes est le fruit de leurs travaux et repose sur une représentation basée sur les objets image. Ils ont réalisé l'analyse à l'aide du logiciel eCognition 8 qui est bien adapté aux traitements utilisant les objets image et permet de tirer profit des capacités de traitements parallèles qu'offrent les serveurs de calcul actuels.

L'algorithme repose sur l'identification des ombrages associés aux édifices et de leur mise en correspondance entre les images utilisées par liaison d'objets, *object linking* en anglais. Cette technique permet aux auteurs de s'abstraire de la contrainte de recalage des images qui est sous-jacente à plusieurs des techniques usuelles qui sont utilisées pour effectuer la détection de changements entre les images d'une série.

Le concept qu'ils mettent de l'avant est qu'une bâtisse ayant subi des dommages importants, dans un contexte comme celui-ci, aura dans l'image postcatastrophe une ombre ayant une surface soit considérablement réduite ou même inexistante par rapport à celle de l'image précatastrophe. Ces différences d'ombrage proviennent d'écroulements partiels ou complets de bâtiments ou de portions de ces derniers. Une analyse locale est faite pour identifier les ombrages les plus similaires entre les différentes images de la scène tout en minimisant, autant que cela en est possible, la distance séparant les objets considérés pour tenter de contraindre les mises en correspondance à des combinaisons réalistes d'ombrages. Si les objets sont suffisamment similaires et rapprochés, ils sont liés d'une image à l'autre et l'analyse passe aux autres objets qui ont été isolés.

Le concept est similaire à ce que nous avons mentionné au sujet de l'utilisation de fenêtres oscillantes définies en fonction de la marge d'erreur de recalage pour limiter l'étendu des comparaisons effectuées à un voisinage réaliste du pixel ou de l'objet image à l'étude. Cette technique est souvent utilisée lorsque nous cherchons à effectuer la comparaison d'images reposant sur une représentation objet image sans avoir atteint un recalage suffisamment précis.

En utilisant les objets image plutôt que les pixels, nous nous retrouvons dans une situation où il y a recoupement des formes des objets image, d'image en image, pour des positions données, comme nous l'avons mentionné plus tôt, ce qui nous permet de regarder à travers la pile d'objets et de les lier. Ceci permet d'explorer un voisinage borné de l'objet qui, logiquement, contient les formes recherchées dans les autres images de la série. L'effet d'une erreur résiduelle de recalage de quelques pixels n'a donc plus autant d'impact dans cette situation, car pour la plupart des objets image la marge de cette erreur est incluse dans les formes analysées.

Pour extraire les objets image pertinents, soient les ombrages qui sont à proximité de bâtiments, ils ont recours à l'indice NDVI, tout comme les auteurs de l'article (Pu, Landry et Yu, 2011) présenté à la section 2.7 à la fin du chapitre deux qui traite de la classification, pour identifier la végétation et éliminer de l'analyse les portions de l'image composées de végétation. Cette étape est nécessaire afin d'éviter que les ombrages projetés par les arbres ne viennent fausser l'analyse en forçant leur exclusion de l'analyse, car, bien qu'ils puissent varier considérablement d'une image ou d'une saison à l'autre, ils n'apportent rien d'utile à l'analyse des dommages survenus aux édifices.

Nous voyons ici un élément qui a pu contribuer à ce que seulement l'une des cartes des dégâts qu'ils aient produites ait atteint un niveau de qualité suffisant pour être publiée. Seules les images de Carrefour comportaient la bande proche infrarouge nécessaire au calcul de l'indice NDVI et conséquemment seules les images de cette ville ont pu être traitées de la manière préconisée dans leurs travaux.

Un autre élément qu'il est important de souligner dans ce contexte est que les auteurs de l'article sont les intervenants qui ont utilisé l'algorithme qu'ils ont développé pour créer les cartes des dégâts résultantes. Il aura tout de même fallu près de 12 heures à deux acteurs pour arriver à établir les règles de classification requises pour identifier les édifices endommagés et donner une mesure de l'ampleur des dommages puis de créer les cartes thématiques, même si le calcul distribué permettait de traiter les images en un temps très court. Pour arriver à

nous expliquer ceci, il est important de retenir que la plupart des algorithmes de traitement d'image et de classification, et conséquemment ceux qui utilisent ces deux types de techniques en cascade, ont de nombreux paramètres et/ou de seuils qu'il faut ajuster pour obtenir les éléments d'intérêt d'une analyse. Bien que des techniques automatiques de traitement existent et fonctionnent bien, dans certains cas de figure, il y a toujours une portion d'ajustement de paramètres qui est requise. Comme le délai disponible pour le traitement de ces images est très court et qu'à la lumière de la quantité de temps qu'il a fallu aux auteurs pour ajuster leur propre algorithme, nous comprenons un peu plus facilement pourquoi les photos-interprètes misent plutôt sur le travail manuel que sur ce type d'algorithmes théoriquement « automatiques ». Les auteurs le soulignent clairement dans l'article que certaines techniques de traitement automatiques peuvent être utilisées dans certains contextes mais que leur potentiel d'utilisation ainsi que leur pertinence en temps de crise reste à démontrer (Tiede et al., 2011) pour que les utilisateurs des produits dérivés puissent dépasser leur réticence face à la qualité des produits dérivés et l'efficacité de ces techniques d'analyse.

Une des difficultés liées à l'utilisation de ces techniques découle de ce que nous avons mentionné au sujet des connaissances requises pour mettre les algorithmes de détection de changement de ce type en fonction efficacement et de leur potentiel d'utilisation dans un contexte de gestion de catastrophe. En fonction de ceci, il est simple de comprendre ce qui pousse les photos-interprètes, qui réalisent ces analyses, à éviter les techniques « automatiques » dans des contextes comme celui-ci, car, comme le mentionnent les auteurs, il y a une contrainte en ce qui concerne la qualité minimale qui est requise des images, ainsi que de la constance de la représentation et de la documentation des prétraitements, pour que les résultats soient probants. Par contre, comme nous l'avons mentionné cette contrainte n'est pas toujours respectée comme le soulignent les auteurs dans cet extrait à propos des images qu'ils ont utilisées :

« ..., such datasets are often not well suited for automated analysis methods because of, for example, the lack of metadata, un-documented pre-processing,

insufficient pre-processing, or as was the case for Léogâne, a missing NIR band. » (Tiede et al., 2011)

Ils évoquent par contre qu'il y a plusieurs raisons qui peuvent être à la source de ces problèmes, mais que le plus probable est, en fonction du délai très court qui est disponible pour les étapes de capture et d'analyse des images, qu'il n'y ait que peu d'images de qualité qui soient disponibles peu après une catastrophe et qu'il est donc essentiel, voire même inévitable, d'utiliser toutes les images qui deviennent disponibles même si elle ne sont pas complètes.

Les résultats auxquels ils sont arrivés sont tout de même très utiles. Le taux de réussite de classification des bâtiments endommagés est de 72% pour la ville de Carrefour et de 80% pour celle de Léogâne. Ils n'ont cependant pas pu arriver à une précision de classification et de détection donnant le détail de la destruction par édifice. Ils n'ont pu atteindre qu'une codification des dommages par quadrilatère de 20 m par 20 m. Cette représentation est tout de même suffisante pour établir l'ordre de priorité des événements ainsi que les chemins à éviter pour arriver en un point donné.

Pour conclure cette section, nous tenons à souligner que cet article présente la seule technique de traitement automatique, ou du moins partiellement automatique, qui ait été utilisée pendant l'intervention à Haïti. Il est possible qu'il y ait eu d'autres produits cartographiques dérivés qui aient été produits par d'autres intervenants à l'aide de techniques de traitement automatiques ou semi automatiques mais nous n'avons pas trouvé de référence les présentant dans le cadre de nos recherches documentaires.

4.3 Constatations fonctionnelles de l'intervention.

Les autres articles de ces deux numéros spéciaux couvrent d'autres concepts qui ont été soulignés dans ce document et que nous reverrons sommairement dans cette section. Ce qui est d'un intérêt prépondérant dans ces articles est l'analyse du déroulement de l'intervention

prise au sens de la gestion et de la diffusion de l'information de/vers les acteurs qui ont réalisé les analyses et créé les produits cartographiques dérivés résultants.

Ce qui est d'intérêt premier dans l'analyse de cet événement est de voir que les mécanismes et les ressources matérielles dédiées à l'accès et à la distribution des données image prévus par l'USGS ainsi que par d'autres organismes œuvrant dans le même esprit de collaboration internationale fonctionnent et que dans un cas de catastrophe d'envergure majeure, la facette de l'accès rapide et efficace aux données source n'est pas le problème le plus prépondérant auquel nous avons à faire face.

Là où il y a plus de difficulté est au niveau de la gestion du dédoublement des images sources disponibles par l'entremise des divers organismes impliqués et des produits cartographiques dérivés, donc des efforts d'analyse redondants qui ont été constatés après le fait.

Cette constatation est un des points importants qui fait surface dans l'article de (Voigt et al., 2011) qui souligne bien que le manque de communication entre les intervenants a eu un impact non négligeable sur les efforts déployés pendant les premières semaines suivant cette catastrophe comme en témoigne cet extrait de l'article :

« Reflecting the global Haiti mapping response, it can be stated that too many maps were generated by too many actors, showing too similar things in too many different ways. If all organizations involved and active in this terrible situation would have committed some part of their capacities to a globally coordinated and standardized processing and map generation process, with clear quality assurance, processing and analysis guidelines, with cross-validation and data/information sharing procedures, as well as with proper and commonly agreed mapping and visualization rules, there would not have been such an overflow of mapping, confusing the user community. »(Voigt et al., 2011)

Ils proposent dans cet extrait une piste de solution à ce type de problème qui est de nature fonctionnelle, reposant sur un jeu de normes et de procédures prédéfinies, pour permettre de mieux encadrer ce type d'intervention. Il est évident que la procédure à suivre par les

différents intervenants impliqués par ce type d'action doit être bien définie au préalable pour nous permettre de garder la mainmise sur le problème de la gestion de l'information.

Essentiellement, ce qui nous semble être les deux éléments les plus importants à souligner des nombreux thèmes qui sont présentés dans ces publications est :

- Le manque de contrôle sur l'accès et la diffusion des données image qui peuvent mener à un dédoublement de certaines des images sources, ceci peut entraîner un dédoublement de traitement d'une image et donc une perte nette d'efficacité de l'effort déployé,
- La production de produits cartographiques dérivés présentant les mêmes informations à l'aide de nombreux produits différents, ce qui est une perte nette de productivité en temps-personne.

De nombreuses méthodes de gestion du flux de données et de protocoles de travail pourraient être envisagées pour limiter l'impact de ces deux aspects du problème, mais il demeure que, pour le moment, il est essentiel d'entamer la discussion avec les acteurs du domaine pour commencer à établir les bases de la structure de support qui permettra de minimiser ces difficultés. Cette structure d'encadrement devra nécessairement couvrir les aspects suivants :

- L'unification de la méthode d'accès aux données sources pour minimiser la possibilité d'avoir des dédoublements de fichiers sources et/ou de produits cartographiques dérivés,
- L'adoption d'un standard de qualité en ce qui concerne les images qui sont mises à la disposition de la communauté internationale pour effectuer les analyses requises par une situation catastrophique d'envergure,
- L'élaboration d'une base de représentation conceptuelle unifiée qui permette d'indexer le contenu des images traitées d'une manière efficace et rapide, nous pouvons penser aux étiquettes textuelles par exemple,

- L'adoption de standards de présentation des résultats cartographique pour faciliter l'interprétation des produits cartographiques dérivés.

Les éléments qui ont été soulignés dans ce chapitre le sont aussi, d'une manière ou d'une autre, dans les précédents ainsi que dans certains des articles des deux parutions qui ont été présentées ici.

Nous concevons, par contre, que l'utilisation d'une interface d'accès et de communication unique, permettant d'effectuer toutes les opérations de transfert de données requises par ce genre d'intervention, permettrait de limiter ces problèmes considérablement, et ce, d'une manière quasi automatique. En combinant l'aspect de normalisation des procédures à l'utilisation d'un seul mécanisme rendant possible d'effectuer la dissémination des données sources et l'acheminement des produits dérivés vers les acteurs impliqués par la planification des efforts de secours, nous profiterions des deux techniques les plus propices à nous permettre de conserver le contrôle sur le processus de gestion de catastrophe dans sont ensemble.

Nous préciserons plus ce concept dans le prochain chapitre qui est dédié à la présentation de la structure du support de traitement et de comparaison des images satellitaires telles qu'utilisées dans un contexte d'intervention humanitaire relié à des catastrophes majeures.

CHAPITRE 5

LA DÉTECTION DE CHANGEMENT ET LA GESTION DE CATASTROPHE

Nous sommes maintenant en possession de la plupart des notions théoriques et fonctionnelles qui sont requises pour nous permettre de revenir à notre intention première soit l'évaluation de la détection de changement algorithmique et de sa pertinence dans un contexte de gestion de catastrophe.

Dans un premier temps, nous procéderons à la présentation de l'aspect purement académique de la discipline de la détection de changement. Nous n'entreprendrons pas une analyse exhaustive de ce sujet, car il serait impensable de pouvoir couvrir ce thème ainsi que celui que nous visons, soit l'utilisation de la détection de changement dans un contexte de gestion de catastrophe, en arrivant à leur rendre justice en un seul volume.

Nous tracerons tout de même les grandes lignes du développement du support conceptuel de la détection de changement, au sens de la recherche académique, tout en essayant de faire ressortir les points qui nous semblent les plus pertinents à retenir en fonction du contexte de gestion de catastrophe. Nous ne nous attarderons pas à l'exposition des contraintes et difficultés qui sont reliées à l'utilisation de ces techniques de traitement puisque nous les avons soulignées au fur et à mesure tout au long du présent document.

Nous passerons par la suite à l'analyse de la structure de traitement ainsi qu'aux éléments de support conceptuels qui nous semblent les plus à propos en fonction de la tâche de détection de différences et/ou de changements en mettant l'emphasis sur la comparaison du contenu des images. Ceci, à notre sens, est le réel élément qui nous permet de créer les produits cartographiques dérivés requis par la planification des efforts de secours.

Certains des concepts et des éléments qui seront proposés dans ce chapitre ont une nature plutôt sociopolitique ce qui nous force à adopter dans certaines sections un discours à

caractère éditorial. Nous sommes conscients que dans notre contexte d'analyse les aspects socio-économiques et politiques n'ont que peu de place, par contre, nous ne devons pas perdre de vue que le contexte de cette analyse est l'utilisation et le traitement d'images satellitaires en vue de venir en aide à des populations qui subissent les conséquences de catastrophes naturelles ou autres. Par conséquent, l'aspect social de la question est indissociable de la problématique.

C'est d'ailleurs en partie pour cette raison que les techniques algorithmiques théoriquement automatiques ou semi-automatiques ne sont que rarement utilisées lors d'une intervention réelle comme nous l'avons vu au CHAPITRE 4. L'urgence de la situation ainsi que l'aspect social du contexte prévalent sur toutes autres considérations et conséquemment, les intervenants menant les analyses requises ne feront pas l'erreur d'utiliser le peu de temps qu'ils ont à leur disposition en essayant une ou des techniques algorithmiques n'ayant pas déjà fait leurs preuves et qu'ils ne savent utiliser efficacement.

Nous espérons que l'aspect dissertation de certaines sections de ce chapitre ne diluera pas la pertinence des arguments présentés bien qu'il s'agisse d'une forme d'élaboration inhabituelle dans notre contexte de travail en recherche appliquée.

Nous tenons à mentionner pour conclure cette introduction que les thèmes que nous avons abordés dans ce travail, soit de l'analyse d'images satellitaires et de la détection de changement mise au service de la planification d'efforts de secours dans un contexte de gestion de catastrophe ainsi que le contexte d'utilisation critique relié à la sécurité de nos semblables, dépassent les limites habituelles des considérations académiques classiques de la recherche appliquée en ingénierie. Cette particularité nous force à considérer d'autres aspects de la problématique qui proviennent d'autres disciplines mais qui ont un impact prépondérant sur la manière de conceptualiser la solution.

Il s'agit à notre avis d'un contexte d'analyse qui ne peut être traité en vase clos, mais celui d'éléments de solution bel et bien distincts qui ont une interrelation fonctionnelle importante

sans toutefois être modélisable d'une manière unique et/ou analytique, car ces derniers proviennent de plusieurs domaines de recherche connexes. En somme, nous considérons que ce qui doit être retenu par tous ceux qui étudient cette problématique est que les types de problèmes, que nous tentons de résoudre à l'aide des techniques présentées dans ce document, sont dynamiques. Conséquemment, il est donc nécessaire de reconsidérer et de redéfinir les méthodes d'analyse et de traitement bien souvent en fonction de chaque cas et même, dans certaines situations, en cours du traitement d'un seul cas lorsque cela est requis.

Il y aura certainement des contextes d'utilisation que nous rencontrerons dans le cadre de différentes catastrophes qui seront propices à nous permettre de réutiliser des algorithmes, des connaissances et/ou des « recettes » de traitement préétablies, mais il nous semble imprudent de miser exclusivement sur le développement de solutions algorithmiques prédéfinies. Nous pensons donc qu'il est impératif d'également travailler sur l'aspect de la comparaison des images et du traitement conceptuel d'une part, ainsi que sur la normalisation des ressources et des formats de données afin d'atteindre un niveau d'interopérabilité et de connectivité conceptuelle uniformisé.

Cette vision de développement nous permettrait de nous abstraire de la modélisation univoque des solutions qui ne peut que reposer sur une représentation exhaustive de tous les scénarios plausibles de traitement. Cela serait extrêmement difficile à atteindre et à gérer compte tenu du nombre extraordinaire de variations possibles de conditions d'acquisitions et de combinaisons d'images. Il s'agit essentiellement d'une question d'explosion combinatoire qui ne cessera de croître en fonction des nouveaux types et formats d'images qui deviendront disponibles dans un avenir rapproché.

5.1 Le traitement d'image et de la détection de changement académique

Nous avons vu dans ce document que le traitement, l'analyse et l'interprétation d'images satellitaires (ou d'images d'autres types d'ailleurs) reposent sur l'utilisation de concepts qui proviennent de plusieurs domaines de recherche. Pour arriver à une modélisation complète de

ce que représente une image, il faut nécessairement avoir une bonne compréhension d'une panoplie de concepts et de techniques très pointues ainsi qu'une base de connaissances large épousant plusieurs domaines d'analyse et de recherche interdépendants.

Toutes les notions qui sont mises en cause proviennent donc de différents travaux de recherche qui traitent en général de certaines des sous-composantes conceptuelles de la problématique globale de l'analyse d'image. Il n'est pas essentiel ici de penser exclusivement aux images satellitaires, car dans bien des cas les concepts qui sont explorés et/ou utilisés proviennent de travaux reliés à d'autres domaines qui sont réutilisés dans d'autres contextes avec d'excellents résultats.

À titre d'exemple de ceci, nous pouvons penser à la bibliothèque de fonctions de traitement d'images satellitaires Orfeo Tool Box (OTB) (Christophe et Inglada, 2009) (Inglada et Christophe, 2009), qui est en cours de développement par le Centre national d'études spatiales (CNES) français et leurs partenaires, qui utilisent l'Insight Tool Kit (ITK) qui, à l'origine, a été développé pour le traitement d'images médicales. Comme l'analyse de ces deux types d'images utilise beaucoup des mêmes concepts, tel que le recalage d'images par exemple, il n'est pas surprenant que l'outil développé pour une application puisse être utilisé dans un autre contexte sans qu'il y ait de réelles différences conceptuelles reliées à l'utilisation des techniques et algorithmes pertinents.

Il en va de même pour la classification du contenu des images et pour plusieurs autres des éléments fonctionnels que nous avons mentionnés dans les chapitres précédents. Nous avons souligné à plusieurs reprises que la télédétection est une discipline qui est à la croisée de plusieurs avenues de recherches distinctes qui, sans être foncièrement codépendantes, peuvent toutes profiter des progrès réalisés dans les autres disciplines connexes. Nous pouvons encore ici penser aux enfants qui augmentent leur capacité d'analyse par la découverte de l'interrelation des éléments associés à différents concepts ce qui entraîne un raffinement de leurs capacités de discrimination et de classification abstraite qu'ils peuvent par la suite utiliser à de nouvelles fins.

Il est donc essentiel de poursuivre les travaux de recherche sur les fondements de chacun des concepts et mécanismes de résolution sous-jacents aux différentes composantes de la chaîne de traitement mise en œuvre par l'analyse d'images satellitaires et ultimement de la détection de différence et de changement automatique ou semi-automatique. Cependant, il n'est pas nécessaire de prendre quelque disposition que ce soit pour que ceci se produise. L'intérêt de la communauté internationale de recherche œuvrant dans chacun de ces domaines est fort et rien n'arrêtera le développement de nouvelles techniques d'analyse et de traitement permettant de résoudre toute une panoplie de problèmes préexistants ainsi que pour ceux qui apparaîtront dans le futur.

Là où il est essentiel, selon nous, de développer de nouveaux mécanismes efficaces est au niveau de l'intégration de ces nouveaux outils à la chaîne de traitement mise en œuvre par l'analyse d'images satellitaires. Il est essentiel de pouvoir évaluer la pertinence de ces développements en fonction des différentes facettes de la problématique du traitement d'images satellitaires pour nous permettre d'établir la performance de ces techniques en fonction de différentes conditions et de contextes d'utilisation et/ou de mécanismes de traitement. Une fois cette évaluation faite, il est impératif selon nous de diffuser les résultats aux intervenants du domaine pour qu'une phase d'essai et de documentation rigoureuse et quasi exhaustive des résultats nous permette d'établir ce qui peut être atteint avec ces nouveaux outils ainsi que la manière de procéder pour obtenir des résultats probants en les utilisant.

5.2 Le traitement d'image et de la détection de changement pratique

Il faut comprendre qu'il y a une différence considérable entre les chercheurs des différents domaines qui œuvrent au développement des méthodes de traitement permettant de résoudre l'une ou l'autre des sous-composantes de la problématique globale du traitement d'images satellitaires et les analystes qui utiliseront ces algorithmes une fois qu'ils seront mis à leur disposition.

Les chercheurs académiques possèdent toutes les notions théoriques nécessaires à la compréhension, à l'élaboration et à l'utilisation des algorithmes qu'ils ont développés, car ils sont des experts des sujets qu'ils traitent. Les analystes quant à eux doivent utiliser ces algorithmes efficacement sans toutefois posséder toutes les notions théoriques qu'ont les chercheurs qui les développent.

Nous devons comprendre de ceci, en considérant entre autres les résultats présentés à la fin du CHAPITRE 4 concernant le traitement des images des villes de Léogâne et de Carrefour par (Tiede et al., 2011) qui ont développé l'algorithme qu'ils ont utilisé pour effectuer l'analyse des dégâts survenus aux bâtiments après le tremblement de terre qui a ébranlé Haïti, que même les chercheurs qui développent les algorithmes de traitement d'image doivent investir beaucoup de temps pour arriver à obtenir des résultats probants même s'ils possèdent toutes les notions théoriques requises. Nous devons donc nous demander comment il pourrait en être autrement pour les analystes qui ne possèdent pas nécessairement toutes ces notions.

Naturellement nous en venons à la conclusion qu'il n'est pas logique de croire qu'il sera une chose simple d'utiliser ces méthodes de traitement efficacement sans avoir une bonne maîtrise des concepts et fondements théoriques requis pour développer les algorithmes élaborés par les chercheurs des différents domaines connexes mis en cause. De plus, il ne faut pas oublier que chacun de ces domaines est une discipline à part entière qui nécessite une quantité considérable de temps à les maîtriser suffisamment bien pour que les individus, les étudiants, soient en mesure de développer de nouvelles méthodes de traitement, de les évaluer en fonction de cas d'utilisation réalistes puis de les mettre en œuvre en tant qu'outils logiciels programmés efficacement.

En considérant ceci, il n'est pas surprenant que des intervenants généralistes, comme les analystes qui effectuent le traitement d'images satellitaires, aient à apprendre les particularités de ces techniques lorsque vient le temps d'utiliser les nouveaux algorithmes qui deviennent disponibles, car ils ne possèdent pas nécessairement toutes les notions théoriques sous-jacentes et n'ont pas le temps ou les outils leur permettant de les cultiver rapidement.

Conséquemment, lorsque les chaînes de traitements ou ces techniques d'analyse ne sont pas préassemblées et disponibles en tant qu'outils intégrés et bien documentés au sein des logiciels qu'ils utilisent, ils ont plutôt tendance à se fier sur ce qu'ils connaissent et savent faire et de s'y limiter. Ceci est surtout important dans un contexte de gestion de catastrophe, car dans cette situation il est presque impossible de prendre le temps qui serait requis pour apprendre à utiliser ces nouvelles méthodes et d'arriver à s'y habituer suffisamment rapidement pour arriver à des résultats probants dans un délai raisonnable.

Ceci serait peut-être différent s'il était possible d'acquérir les connaissances sous-jacentes rapidement, mais telle n'est pas la situation actuelle. Pour arriver à trouver et à assimiler les notions théoriques reliées à l'un ou l'autre des algorithmes que l'on peut vouloir utiliser, il faut mener des recherches assez étendues dans la littérature de différents domaines pertinents. Ensuite, il est nécessaire d'arriver à identifier les articles contenant les éléments fonctionnels utiles pour finalement les lire et tenter d'assimiler des concepts théoriques que d'autres passent des années, voire même des décennies dans certains cas, à accumuler et à réussir à utiliser efficacement. Comme la plupart des algorithmes mettent en jeu de nombreux concepts provenant de plusieurs domaines de recherche, nous devons nous demander comment les analystes pourraient arriver à faire ces recherches et à accumuler toutes les connaissances requises pour utiliser les nouveaux algorithmes développés efficacement, et ce, dans un délai suffisamment court pour qu'ils puissent être utilisés dans un contexte de gestion de catastrophe.

Selon nous la réponse à cette question est qu'ils n'entreprendront pas la recherche académique que nous venons de présenter à moins que le ou les analystes travaillant au traitement d'images satellitaires dans un contexte de gestion de catastrophe connaissent un algorithme ainsi que la chaîne de traitement permettant de l'utiliser au préalable. Conséquemment, peu importe la pertinence de l'algorithme, ce dernier ne sera pas utilisé dans cette situation. Ils opteront plutôt pour l'analyse « manuelle » des images, chose qu'ils savent faire sans difficulté et qu'ils peuvent réaliser peu importe les types et résolutions

d'images sources disponibles, ou pour toute autre technique de traitement qu'ils connaissent déjà.

Nous voyons ici l'impact qu'a la diffusion des notions théoriques reliées au traitement d'images satellitaires et à ses sous-composantes sur l'utilisation des algorithmes issus des derniers développements technologiques. Pour nous permettre de mettre en valeur ces nouveaux développements au sein de la communauté des analystes qui pourraient profiter de l'utilisation de ces derniers dans l'exercice de leurs fonctions, il faut, selon nous, continuer à miser en grande partie sur l'éducation et la formation continue. Parallèlement, une documentation efficace des contextes d'utilisation probants des différents algorithmes ainsi que la manière d'ajuster leurs paramètres pour arriver à différents types de résultats qui soient faciles à consulter permettrait de simplifier la tâche d'assimilation des concepts qui est essentielle à leur utilisation efficiente.

Le support qui nous permettra de réaliser cette documentation indexée reste à être déterminé, mais nous pouvons aisément concevoir que l'utilisation de bases de données ainsi que des outils de recherche de contenu qui leur sont habituellement associés soit un point de départ logique. Cette structure d'informations nous permettrait d'associer aux différents enregistrements de la base de données des exemples pertinents de traitement de chaque algorithme ou méthode de traitement ainsi que des liens vers des images déjà traitées s'il y en a. De plus nous pourrions communiquer avec les acteurs et chercheurs ayant réalisé ces traitements par le biais de messagerie ou d'interface de dialogue qui pourrait être intégrées à même le « Super catalogue conceptuel » et son logiciel de support.

Nous ne pouvons pas assez souligner que le partage et la réutilisation de connaissance allant de pair avec la communication sont le point névralgique qui permettra d'arriver à un traitement collaboratif efficient d'images satellitaires dans un contexte de gestion de catastrophe.

5.3 L'évolution des images et du cycle de la problématique

Un autre aspect important de ce contexte de développement et d'analyse qui vient rendre la tâche de traitement des images satellitaires encore plus complexe est l'évolution des formats et le raffinement de leurs résolutions. Nous avons mentionné que l'évolution des formats et des résolutions d'images nous force à continuellement réévaluer la pertinence et la performance d'algorithmes qui fonctionnent très bien à des résolutions moindres en fonction des nouveaux formats qui deviennent disponibles. Ceci peut provenir d'une multitude de facteurs comme la taille minimale des objets décelables ou encore de l'impact que peut avoir l'amplitude croissante des distorsions géométriques reliées aux effets de perspective et de projection des scènes sur un support bidimensionnel.

Si nous y pensons un peu nous remarquons rapidement que ce phénomène nous place dans une situation difficile si nous la considérons du point de vue des analystes. L'impact qu'ont les nouveaux formats d'images sur les algorithmes, les méthodes de traitement d'images et donc des outils informatiques utilisés par les analystes est assez simple à expliquer, mais pas du tout aussi simple à contourner.

En somme, nous pouvons résumer ce phénomène en soulignant que dans une situation de gestion de catastrophe il est souhaitable d'utiliser les images les plus descriptives qui soient disponibles pour que nous soyons en mesure de créer des produits cartographiques dérivés qui sont aussi précis que possible. Nous sommes conscients que ces images seront fort probablement issues des dernières générations de capteurs et qu'elles auront des résolutions aussi fines que possible. Les analystes qui exécutent les opérations de classification et de comparaison du contenu des images qui permettent de créer les produits cartographiques dérivés sont en mesure de réaliser ces analyses efficacement, peu importe le type d'image, car ils ont acquis les connaissances permettant d'interpréter ces images en fonction de différents thèmes d'intérêt. Ces connaissances ainsi que leur expertise leur permettent de rapidement s'ajuster à de nouveaux formats d'images et de réussir à mener ces analyses grâce à l'interprétation et à la mécanique d'inférence qui sont inhérentes aux processus intellectuels

humains. Les analystes arrivent en quelque sorte à bâtir le support d'analyse requis parallèlement à l'action de classification et d'interprétation des images.

Le cas est tout autre lorsque nous considérons les algorithmes de traitement dédiés à ce type de tâche. Nous comprenons à la suite de tout ce qui a été mentionné dans ce texte que l'élaboration d'un algorithme d'analyse d'image ou d'une chaîne de traitement dédiée est le résultat de travaux exigeants qui mènent à une solution plus ou moins généralisable qui n'est très souvent utile que dans certains contextes très spécifiques. Il n'est pas du tout inhabituel qu'un algorithme ou une méthode d'analyse ait différentes variantes qui permettent de traiter différents cas en utilisant le même concept de base. Il faut donc savoir comment l'image et son format affectent la performance des différentes variantes d'un algorithme pour arriver à identifier celle qui présente un intérêt à être utilisée dans un contexte d'analyse donné.

Comme nous l'avons souligné, les algorithmes sont très souvent développés pour analyser certains types d'images ou de thèmes d'intérêt et ne permettent pas d'atteindre les mêmes résultats si nous les utilisons sur d'autres images ou dans d'autres contextes d'analyse. Ceci est plus prépondérant lorsque l'on parle d'images ayant des résolutions différentes, mais dans certains cas la représentation radiométrique modélisée pour permettre une analyse ne peut être utilisée pour traiter des images provenant de différents capteurs sans qu'une normalisation des données soit réalisée afin de rendre les images aussi comparables que possible du point de vue des variables.

La variation de la performance des algorithmes et techniques de traitement et d'analyse d'image est un problème considérable qui est mis en évidence par ce que nous venons de mentionner au sujet des connaissances. Afin que les analystes utilisent ces outils efficacement, il faut qu'ils les possèdent. Pour nous permettre d'établir les limites de pertinence des algorithmes en fonction des types d'images et de leurs résolutions il faut forcément que nous les évaluions itérativement pour tous les formats et types d'images, et ce de manière analytique et exhaustive. Une fois ces analyses réalisées, nous pouvons publier

les résultats afin d'aider les différents intervenants, qui peuvent avoir à les utiliser, à réussir à les mettre en œuvre d'une manière efficiente et d'arriver à des résultats probants.

L'évolution des formats et des résolutions d'images rend certains algorithmes inutilisables, ou du moins peu pertinents, ceci en fonction des résultats espérés de leur utilisation à des résolutions plus fines que celles pour lesquelles ils ont été développés comme nous l'avons mentionné au CHAPITRE 3. C'est de cette particularité que provient la nécessité de réévaluer continuellement la performance des algorithmes.

Il est assez évident, si nous considérons l'évolution des techniques et algorithmes de traitement d'image, que le traitement et l'analyse d'images à basse et à moyenne résolution sont bien maîtrisés dans plusieurs contextes d'utilisation. Nous trouvons un nombre important d'articles et de travaux de recherches qui traitent d'algorithmes automatiques, ou quasi automatiques, qui permettent d'obtenir d'excellents résultats de classification et de comparaison de contenu.

Le traitement des images à haute résolution n'est pas aussi avancé. Il y a à l'heure actuelle beaucoup de recherches théoriques et pratiques qui sont en cours qui donnent d'excellents résultats. Dans certains cas il y a même des concepts qui sont généralisables à certaines catégories d'images. Lorsque l'on parle d'images à très haute résolution, la question est tout autre. Pour le moment nous n'en sommes pas encore arrivés à des techniques de traitement généralisables bien que dans certains cas très pointus, nous arrivons tout de même à d'excellents résultats d'analyse.

Ceci n'est pas surprenant, car les images les plus récentes, celles que nous utilisons depuis peu, n'ont pas encore été assez manipulées et utilisées pour que nous puissions les comprendre aussi bien que celles que nous utilisons depuis plus de 30 ou 40 ans. Cette particularité ne peut surprendre que ce soit, car toute évolution de nos connaissances fonctionne selon ce principe.

Ici encore nous pouvons penser aux mécanismes d'assimilation des jeunes enfants qui doivent continuellement réapprendre leurs modèles de compréhension du monde en fonction de nouvelles constatations jusqu'à la stabilisation de ces modèles. Cette stabilisation se produit lorsque l'élément de nouveauté est soit moins prépondérant ou que les mécanismes d'augmentation incrémentale de la représentation conceptuelle sont acquis, ce qui vient plus tard dans leur évolution.

Pour nous permettre de réaliser cette mise en relation des concepts sous la contrainte des formats de représentation, nous avons deux éléments à retenir. D'une part, les algorithmes sont plus ou moins performants selon les types et résolutions d'images ainsi que ce que l'on cherche à y trouver. D'autre part, les nouveaux formats d'images sont plus propices à permettre l'extraction de certains types d'informations que d'autres. Ceci est surtout pertinent dans des contextes urbains. Nous voyons encore ici qu'il s'agit d'un problème de représentation et d'accès à des notions théoriques et conceptuelles qui sous-tendent l'utilisation efficace d'images ou d'algorithmes que nous pourrions gérer à l'aide d'outils d'indexation de connaissances.

Si un cas de traitement ne justifie pas l'utilisation des toutes dernières générations d'algorithmes qui peuvent être en cours de développement ou d'évaluation, il serait utile que le système même puisse faire des suggestions de types et de formats d'images pertinents à utiliser en fonction du contexte. Ainsi, nous éliminerions le tâtonnement inhérent à l'exploitation de techniques expérimentales lorsqu'elles ne sont pas pertinentes. De cette manière, les analystes obtiendraient automatiquement des suggestions d'outils de traitement et de paramètres d'ajustements des algorithmes adaptés aux cas traitables en fonction du but d'une analyse. Ceci permettrait de maximiser l'utilisation de techniques ayant fait leurs preuves lorsque les contextes d'analyse sont critiques.

Parallèlement, le système pourrait très bien permettre de faire des suggestions de techniques plus expérimentales lorsque le contexte d'analyse est moins critique. Cela donnerait l'opportunité aux analystes, s'ils y sont disposés, de participer à l'analyse de la pertinence

des nouveaux algorithmes et de par ce fait, bâtir le référentiel de connaissances qui est requis pour que les algorithmes deviennent indexés en fonction de leur performance ainsi que leurs contextes d'utilisation pertinents. Subséquemment, nous pourrions les suggérer dans des contextes d'utilisation plus critiques.

Nous voyons donc que les algorithmes de traitement, les types et formats d'images ainsi que les données d'utilisation pertinentes à leur utilisation efficiente sont intimement liées et que pour que l'utilisation d'images aux nouvelles résolutions et des derniers algorithmes développés puisse être maximisée il est essentiel de développer une mécanique de travail intégrée qui tienne compte de tous ces éléments. Ici aussi nous voyons que le concept des bases de données pourrait être utilisé à bon escient. Nous commençons à voir cependant que l'utilisation d'un tel catalogue de connaissance doit être reliée à un outil de traitement complet pour qu'il soit possible de mettre en référence les images, les outils et les contextes d'utilisation et de nous permettre d'arriver à augmenter le contenu du catalogue de manière incrémentale au fur et à mesure que de nouvelles constatations deviennent disponibles.

Si, de plus, des mécanismes de mémorisation des variables et de la structure des méthodes de classification pertinentes à utiliser dans une situation spécifique ou pour une région donnée pouvaient être mis en œuvre afin de permettre le référencement d'images aux enregistrements du catalogue, il serait possible d'accéder à des solutions pré définies, dans les cas où le traitement a déjà été réalisé, ou du moins de trouver des indices de solutions qui permettraient tout au moins de réduire le temps de traitement d'une nouvelle image. Nous reviendrons sur ce concept plus loin, car il faut faire intervenir d'autres notions qui sont d'importance capitale du point de vue de l'ensemble de la modélisation de la chaîne de traitement d'une image satellitaire.

Nous tenons à souligner que ce qui vient d'être exposé ici doit être analysé et conçu en fonction des utilisateurs de ces connaissances et outils, en l'occurrence les analystes et les photos interprètes, pour que la structure d'indexation et de recherche développée soit bien adaptée aux méthodes de travail reliées à l'analyse d'images satellitaires ainsi qu'à la

séquence typique de résolution qu'ils utilisent. Sans ceci l'effort de développement de l'outil de travail serait vain, car son utilisation ne pourrait être aussi naturelle que l'interprétation manuelle des images.

De tout ceci nous devons retenir que nous avons plusieurs types de données pertinentes à considérer lorsque nous cherchons à analyser des images satellitaires en fonction de différents buts et contextes de traitement. Certaines de ces notions sont théoriques et relèvent de la phase de développement de nouveaux algorithmes ou de l'analyse du potentiel de généralisation de différentes techniques connues à de nouveaux contextes d'utilisation. Ces notions découlent plus du contexte académique, mais rien ne nous permet de croire que les intervenants qui œuvrent à l'analyse d'images satellitaires ne puissent contribuer de manière significative à la progression des connaissances sous-jacentes aux techniques de traitement, aux algorithmes ainsi qu'à l'élaboration de protocoles de tests et d'évaluation pratique de la performance des algorithmes issus du monde académique.

Les connaissances théoriques reliées aux différents algorithmes sont utilisées en grande partie par les chercheurs qui développent les procédures de traitement, mais aussi par les analystes et les photo-interprètes qui les utilisent une fois qu'elles sont mises à leur disposition. Ces connaissances couvrent entre autres, les contextes d'utilisation et de développement qui ont été utilisés pour le développement ainsi que les valeurs des paramètres de chaque algorithme qui ont permis d'atteindre les niveaux de performance obtenus lors des essais. Comme les algorithmes sont développés à l'aide de données sources représentatives de cas d'utilisation spécifiques qui sont transformées pour permettre l'évaluation de la performance des techniques de traitement, nous comprenons qu'il y a forcément des résultats, souvent sous forme de carte d'occupation du territoire ou de carte de changements, qui pourraient être utilisés comme référence des types de produits cartographiques dérivés qui peuvent être obtenus à l'aide des différents algorithmes.

Aux connaissances théoriques viennent s'ajouter celles qui sont plus pratiques qui relèvent de l'utilisation des différentes techniques de traitement par les analystes et les photo-interprètes

dans des contextes d'utilisation réels. Ces connaissances ont une valeur inestimable pour tout intervenant qui a à utiliser une technique donnée qu'il ne connaît pas d'avance ou qu'il n'utilise que depuis peu de temps. La disponibilité de l'expérience d'autres intervenants les ayant utilisées ainsi qu'une explication de la valeur des différents paramètres qui ont été utilisés, en fonction d'un contexte donné, et de leur impact sur la performance de l'analyse permettrait de guider l'apprentissage d'une nouvelle technique en évitant les impasses frustrantes qui peuvent survenir dans certains contextes d'utilisation et d'arriver à des résultats probants plus rapidement.

Nous avons donc plusieurs types d'informations qui sont pertinentes à indexer en fonction des différents cas d'utilisation que l'on peut prévoir devoir traiter sous la contrainte de la gestion de catastrophe ou lors de travaux de télédétection plus usuels. Ces notions proviennent de plusieurs domaines et sont reliées à trois niveaux d'évaluation différents :

- Les notions théoriques, provenant du milieu académique, qui découlent des phases de développement et d'analyse de performance des algorithmes sur des cas de développement restreints, il s'agit de l'information initiale concernant le développement et la mise en œuvre d'un nouvel algorithme ou d'une technique de traitement dédiée et de sa performance sur les données de développement,
- Les notions théoriques et pratiques, provenant du milieu académique qui sont issues de l'évaluation du potentiel de généralisation des algorithmes, qui mettent en valeur les cas d'utilisation probants et les valeurs des paramètres pertinentes à utiliser en fonction de différents types de résultats visés, cette information couvre habituellement les étapes de raffinement d'un algorithme ainsi que son évaluation en fonction de données différentes de celles qui ont servi à l'élaboration de l'algorithme, de la technique ou encore de l'évaluation du potentiel de généralisation qu'elles peuvent avoir et de la performance à laquelle nous pouvons nous attendre en fonction de différents contextes d'utilisation,
- Les connaissances pratiques reliées à l'utilisation des algorithmes par les analystes et autres intervenants qui utilisent ces algorithmes pour résoudre des cas réels à l'aide de

différents types et résolutions d'images que celles utilisées pour le développement des algorithmes par les chercheurs académiques. En fait ces informations proviennent de l'utilisation des algorithmes pour résoudre des cas réels et permettent de faire ressortir les contextes d'utilisation des différents algorithmes les plus appropriés en fonction de la performance et de la manière de procéder pour les utiliser de manière efficiente.

Nous constatons que ces différentes informations, qui sont toutes très pertinentes et révélatrices lorsque l'on tente de choisir une technique à utiliser en fonction d'une analyse à réaliser, proviennent de différents moments du cycle de développement et d'utilisation d'un algorithme. Les sources de ces informations sont aussi différentes et mettent à contribution les chercheurs qui ont développé les algorithmes, ceux qui cherchent à les raffiner ou à établir leurs domaines et contextes de pertinence, leurs performances comparatives ou encore les analystes qui les utilisent et qui sont le plus en mesure d'établir leur pertinence en fonction d'un contexte d'utilisation réel qui fait souvent ressortir des lacunes ou des limites fonctionnelles qui n'avaient pas encore été décelées.

Il faut réaliser que chaque algorithme ou technique de traitement a des informations de ce type qui lui sont rattachées et qui permettent de les utiliser efficacement. Comme leurs contextes de pertinence, niveaux de résolutions fonctionnels et paramètres d'ajustement sont tous différents et qu'il est même possible, dans certains cas, qu'il y ait de nombreuses combinaisons de ces derniers qui soient pertinents en fonction de différents contextes d'utilisation, il est assez facile d'accepter que pour nous permettre d'établir un catalogue de références et d'exemples facile à utiliser et intuitif, qu'il faille développer une structure de stockage et d'indexation de contenu très élaborée. Cette structure devra permettre d'entreposer et de récupérer toutes ces informations ainsi que des liens vers des exemples traités et/ou des produits dérivés déjà réalisés pour aider à la sélection de méthodes ou d'algorithmes qui sont le plus justifiés en fonction du but.

Nous avons donc plusieurs niveaux d'information qu'il nous faudra gérer. Ces données peuvent être regroupées en deux grandes classes. La première regroupe toutes les données

pertinentes pour aider au choix d'algorithmes ou de techniques appropriées à considérer en fonction d'un cas à traiter. La seconde est reliée directement aux images et à leurs paramètres propres qu'il est probant d'utiliser en fonction des différents contextes d'analyse plausibles. Nous donnons ici une courte liste de ce que ces données peuvent être pour chaque classe d'information afin d'aider à souligner les types de données, mais aussi leurs interrelations.

Données reliées aux algorithmes et techniques de traitement :

(Notions théoriques et pratiques reliées aux algorithmes et techniques de traitement et à leur utilisation en fonction de contextes d'utilisation spécifiques)

- Types d'images utilisées pour le développement d'algorithmes et/ou de techniques de traitement et leurs résolutions et métadonnées,
- Types de contextes d'analyse et/ou de classification ou de transformations résultantes visées par une technique ou un algorithme spécifique,
- Valeurs de base des paramètres fonctionnels d'un algorithme ou d'une technique en fonction d'un type d'image ou d'un contexte d'analyse donné,
- Performance des algorithmes et techniques de traitement en fonction des différents contextes d'utilisation ou de valeur des paramètres fonctionnels,
- Rapidité d'exécution et autres contraintes d'ordre technique,
- Disponibilité des algorithmes en fonction des différentes plateformes de travail et les variantes d'utilisation leur étant reliées.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais permet de mettre en valeur le caractère commun que partagent ces données qui proviennent du développement théorique et de l'utilisation pratique des algorithmes et techniques de traitement qui sont disponibles à la communauté de l'analyse d'images satellitaires.

Données reliées aux images et aux contextes de traitement :

(Notions théoriques et pratiques reliées aux images en fonction de contextes d'utilisation spécifique)

En fonction des types et résolutions d'images disponibles et/ou de la classification de l'usage du territoire désiré :

(Informations générales sur les images et sur leur contenu sémantique)

- Type de classification et/ou de transformation probante en fonction des types d'images et des résolutions,
- Résolutions d'images les plus propices à permettre d'extraire différents types d'information,
- Algorithmes et/ou techniques pertinents à considérer en fonction d'un type et/ou d'une résolution d'image donnée,
- Types de classifications de l'occupation du territoire qui peuvent être extraits à l'aide d'un algorithme ou d'une technique de traitement donnée pour différents types d'images,
- Performance comparative des différents algorithmes et/ou techniques de traitement permettant d'obtenir le même type d'information d'images ayant les mêmes types et résolutions en fonction d'un contexte de traitement spécifique,
- Disponibilité d'images de référence de différents types et résolutions en fonction de la position géographique de la région d'intérêt.

Ici encore nous ne mettons que quelques-uns des éléments qui pourraient présenter un intérêt à être indexés, mais il ne faut pas oublier que cette liste n'est pas exhaustive.

En fonction d'images spécifiques :

(Informations sur les images disponibles)

- Type et résolution de l'image,
- Date d'acquisition de l'image,
- Bandes d'information disponibles pour l'image,
- Conditions météorologiques lors de l'acquisition,
- Positionnement géographique de la région représentée par l'image,

- Information sur les prétraitements effectués sur l'image,
- Si l'image identifiée a déjà été utilisée pour mener des analyses,
 - Si oui, quel type de traitement a été réalisé ou d'algorithme a été utilisé, par qui, quand, en fonction de quel but et quelle est la performance atteinte,
- Si l'image transformée est disponible et comment l'obtenir si le cas le permet,
- Les données reliées aux différents acteurs qui ont réalisé les différents traitements utilisés pour la transformation et l'analyse d'une image donnée.

Nous remarquons en considérant ces trois listes que plusieurs des éléments y figurant se rejoignent d'une certaine manière ou d'une autre. Ceci souligne, à notre sens, la nécessité de bien analyser la structure d'indexation qui permettra aux différents intervenants ayant à travailler avec des images satellitaires d'accéder à tout ce savoir de manière efficace et intuitive. Nous pouvons tout de même prévoir que l'utilisation de bases de données indexées ayant des références croisées, permettant de relier tous les concepts pertinents à un thème spécifique, serait une bonne option à évaluer comme point de départ.

Pour conclure cette section nous donnerons quelques exemples de situations pour lesquelles il serait un atout, pour les analystes, d'avoir accès à un catalogue d'informations indexées traitant des différents éléments que nous venons de souligner. Ces exemples sont hypothétiques, mais pourraient très bien être représentatifs de situations plausibles.

En un premier temps, pensons à un analyste qui travaille sur une application permettant d'estimer les dégâts provoqués par des bourrasques de vent sur les champs de blé et donc sur le rendement prévisible des récoltes en fonction de la surface cultivée et des conditions météorologiques. D'un point de vue visuel les zones d'un champ qui sont affectées par ce phénomène auront un aspect considérablement différent du reste du champ, car les épis se font rabattre au sol par le vent.

L'analyste comprend donc qu'il faudra miser sur la texture pour être en mesure d'estimer le pourcentage de surface d'un champ qui a changé suite à un orage ou tout autre phénomène

météorologique associé à de grands vents. En premier lieu, par contre, il est primordial d'extraire les champs et de les étiqueter pour pouvoir analyser les variations de leur texture qui permettront d'identifier les portions des champs qui ont été dévastés.

Dans cette situation, si l'analyste n'a pas déjà les connaissances requises pour mener l'analyse, il pourrait consulter le catalogue pour identifier des algorithmes ou techniques de traitement qui permettent d'identifier des champs et de les extraire d'une image satellitaire ainsi que d'identifier celles qui sont le plus propices à permettre cette opération. Puis, il pourrait se pencher sur la question de trouver des méthodes d'analyse texturales qui lui permettraient de réaliser une classification de la surface des champs en deux classes : régulière et chaotique. Le résultat serait un décompte de pixels réguliers avant l'orage qui serait comparé à ceux extraits d'une image décrivant la même zone après l'événement. Cette mesure permettrait d'estimer l'étendue des dégâts survenus.

Comme second exemple, pensons à un analyste qui cherche à classer le plus rapidement possible une image multispectrale en classes d'occupation du territoire suite à une inondation majeure située sur une île quelconque dans une zone rurale. Il connaît déjà la provenance de la première image qui sera disponible après la catastrophe et l'aura pour continuer son analyse dans disons 15 heures.

L'analyste sait donc quel type d'image il aura à traiter ainsi que la plateforme d'acquisition d'où elle proviendra. De plus, il sait que la classification de l'usage du territoire dans une zone rurale sera principalement constituée de champs avec les bâtiments qui leur sont reliés, de routes, de cours d'eau et de quelques agglomérations que nous pouvons considérer comme des petites zones urbaines.

Dans cette situation, le premier élément d'intérêt qui pourrait être identifié à l'aide d'un catalogue du type proposé serait la disponibilité d'une image de référence correspondant à celle qu'il aura prochainement pour poursuivre l'analyse. En second lieu, il pourrait voir s'il n'y a pas déjà des cartes d'occupation du territoire de la zone d'intérêt qui ont été produites et

qui sont disponibles. Par la suite, il pourrait interroger le système pour tenter d'identifier des algorithmes ou des techniques de traitement qui existent permettant de traiter le type d'images qu'il doit utiliser et d'obtenir les classes d'occupation du territoire qu'il a identifiées comme étant propices à permettre l'analyse en cours. S'il en trouve, il pourrait par la suite les comparer du point de vue de leurs performances individuelles et du temps de traitement requis par chacune d'elles pour identifier celle qui semble la plus probante. Par contre, s'il ne trouve qu'une image de référence, il pourra immédiatement entamer sa classification. Ensuite, s'il trouve une image de l'occupation du territoire en plus de l'image de référence il pourrait se livrer à la comparaison des résultats qu'il a obtenus avec la technique de classification retenue à l'image d'occupation du territoire pour lui permettre d'évaluer la performance de la technique pour le scénario en cours d'analyse. Finalement, s'il constate une différence de performance notable, il pourrait ajouter son expérience et les résultats qu'il a obtenus à la définition de la technique et ajouter des données de performance et d'utilisation contextuelles pour que d'autres utilisateurs puissent en profiter par la suite de même que les images résultant du traitement qu'il a réalisé.

Comme dernier exemple, prenons une zone géographique essentiellement urbaine, mais comportant une couronne de zones agricoles à son pourtour qui a été ébranlée par un tremblement de terre. Dans cette situation l'intérêt principal est l'analyse de la zone urbaine, car c'est là que la population locale sera le plus affectée. L'analyste sait qu'il aura une image multispectrale à très haute résolution à traiter, mais ne sait pas de quel satellite elle proviendra. Il sait aussi que la plupart du temps il faut extraire les zones urbaines des images en un premier temps pour par la suite tenter d'évaluer l'étendue des dégâts survenus aux bâtiments individuels si cela est possible. Il sait aussi que pour extraire les zones agricoles il est préférable d'utiliser des images ayant une moins bonne résolution que celle qu'il aura, ce qui permet un traitement plus rapide.

Dans ce contexte l'analyste pourrait utiliser le catalogue dans le but d'identifier des techniques et/ou des algorithmes propices et obtenir de l'information à propos de la résolution optimale pour extraire les zones agricoles d'une image multispectrale ayant une

occupation du territoire partagée. À partir de la description des algorithmes retenus, il pourrait identifier les résolutions les plus propices à permettre l'extraction des zones rurales ainsi que les techniques de réduction de la résolution qui sont suggérées par les auteurs des différents algorithmes. Par la suite, le catalogue pourrait être utilisé pour identifier des techniques de classification de la toile urbaine qui lui permettront d'obtenir une représentation propice à permettre d'évaluer les dommages survenus aux bâtiments. Une fois que les images sont disponibles pour le traitement il pourrait aisément revenir sur les notions consultées et les filtrer en fonction du ou des types d'images qui sont à sa disposition ainsi que sur la performance désirée pour chacun des paliers de traitement.

Nous n'avons donné que quelques exemples ici, mais nous comprenons rapidement ce que pourrait représenter un catalogue de ce type pour les analystes d'une part et pour les étudiants et enseignants du domaine de la télédétection d'une autre. Il s'agirait en quelque sorte d'un système d'auto-instruction sur l'analyse d'images satellitaires qui permettrait d'explorer les algorithmes et les techniques de traitement en fonction de la majorité des thèmes d'intérêt qui pourraient faire surface dans des contextes de travail professionnel ou académique.

La question demeure à savoir comment un tel catalogue pourrait fonctionner et être maintenu à jour. Si nous ne prenons pas en considération les coûts qui sont associés avec l'élaboration d'un tel outil et en excluant l'influence des compagnies privées qui développent des progiciels commerciaux dédiés à l'analyse d'imagerie satellitaire, nous pouvons établir ce que les données, gérées et disséminées par un tel système, devraient être et comment les mettre à la disposition des intervenants du domaine.

5.3.1 Les métadonnées de classification et de contenu

Nous revenons ici sur l'indexation du contenu une fois le traitement des images réalisé. Nous tenons à rappeler que ce qui nous intéresse dans ce document est la détection des changements ou des différences existants entre des images satellitaires de la même zone géographique dans le contexte de la gestion de catastrophe. Nous comprenons de ce qui a été

présenté dans le CHAPITRE 3, qui traite de la détection de changement proprement dite, que dans un contexte de gestion de catastrophe nous n'aurons pas de contrôle sur les images qui deviendront disponibles pour effectuer les analyses, ni sur la disponibilité d'images de référence pertinentes. Nous savons, par contre, que peu importe les images qui seront disponibles, il faudra pouvoir les traiter et les analyser puis de comparer leur contenu pour arriver à créer les produits cartographiques dérivés qui sont requis pour la planification des efforts de secours.

Nous avons aussi souligné dans le CHAPITRE 3 que dans bien des situations nous aurons des images qui ne seront pas directement comparables que ce soit à cause de leur type, de leur résolution ou encore de variations importantes de leur condition d'acquisition. Nous savons que dans plusieurs situations, pour certaines combinaisons spécifiques d'images, il y a des algorithmes semi-automatiques ou même presque complètement automatiques qui performant bien et qui permettront de réaliser les analyses requises. Par contre, la probabilité qu'il soit possible d'utiliser ces algorithmes dans un contexte de gestion de catastrophe est assez limitée compte tenu de la grande diversité de combinaisons d'images avec lesquelles nous devrons travailler.

Nous avons donc conclu que l'utilisation de la codification résultant de l'analyse de l'usage du territoire serait une manière simple et directe de permettre la comparaison du contenu des images. Ceci est surtout probant si nous nous attardons à considérer comment les images sont codifiées après leur analyse. Essentiellement, peu importe où nous nous trouvons et peu importe le logiciel avec lequel nous travaillons, un champ de pommes de terre sera nommé un champ de pommes de terre. Pour nous permettre de dire qu'il s'agit d'un champ de pommes de terre, nous aurons premièrement mené une analyse qui nous aura permis d'extraire les zones agricoles pour par la suite établir qu'il s'agit d'un champ de pommes de terre.

Nous parlons évidemment d'analyses par étapes successives qui nous permettent de « dégrossir » l'information et de raffiner la description en fonction de divers critères de

traitement et d'analyse de contenu. Nous remarquons ici une similitude considérable entre notre méthode d'interprétation conceptuelle, qui repose sur l'identification de groupes composés de membres similaires explicités plus clairement par d'autres descriptions qui se rapportent aux membres d'un sous-groupe, puis d'un autre sous-groupe jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'ambiguïté reliée à la description des membres d'une des classes finales.

En soi, cette représentation hiérarchique du contenu des images est assez simple d'un point de vue conceptuel et a été présentée à la section 2.7 qui traite de la technique de classification utilisée par (Pu, Landry et Yu, 2011) dans leurs travaux sur la ville de Tampa en Floride. Ce qui est similaire est regroupé puis progressivement explicité.

Il y a déjà des modèles de représentation hiérarchiques de ce type qui existent et qui sont utilisés pour représenter les différentes classes d'occupation du territoire pertinentes en télédétection. Ces structures ont été définies par des organismes qui chapeautent les efforts de traitement et d'analyse d'images satellitaires. En Amérique du Nord, nous avons le *United States Geological Survey* (USGS) et en Europe l'Agence européenne de l'Environnement (AEE) qui ont défini des structures de classification et de codification de l'occupation du territoire.

De l'initiative européenne est issue la structure de codification CORINE (Coordination de l'Information sur l'Environnement) Land Cover qui regroupe les différents types d'objets d'intérêt de la télédétection en classes hiérarchiques mutuellement exclusives. Le principe est essentiellement le même pour la classification du territoire reposant sur la représentation développée par l'USGS, bien que cette dernière ait un niveau de représentation de l'information de moins que celle de CORINE.

Si nous partons de l'idée qu'une interface de traitement dédiée, comprenant tous les éléments fonctionnels requis par l'analyse d'images satellitaires, est disponible et utilisée par un grand nombre d'acteurs du domaine de la télédétection, nous pourrions inclure à ce système un menu composé d'étiquettes requises pour représenter le contenu des images en fonction

d'une codification de l'usage du territoire accepté par la communauté d'utilisateurs du système. Cette fonctionnalité permettrait de gérer plusieurs éléments qui pourraient être problématiques et rendre l'indexation et la recherche de contenu difficile.

Premièrement, le lexique de terme serait essentiellement statique et permettrait donc d'exclure la possibilité que des termes comportant des fautes d'orthographe ne viennent entraver la recherche de contenu. Bien que nous soyons toujours activement en train d'essayer de nous assurer de la validité des arguments et des termes que nous utilisons, il arrive invariablement que nous utilisions des termes similaires dans certaines circonstances qui rendent l'interprétation de ce que nous tentons de dire difficile. Que ce soit pour des raisons d'orthographe ou de terminologie ce phénomène est omniprésent dans nos communications interpersonnelles et professionnelles. L'utilisation d'un lexique de termes restreint et quasi immuable permettrait de minimiser l'impact de ce phénomène.

Ceci est très important, car si nous voulons pouvoir trouver tous les champs de pommes de terre, il faut absolument qu'il n'y en ait pas un qui ait été classé comme étant un champ de patates. Au Québec nous n'aurions aucune difficulté à comprendre de quoi il s'agit, mais qu'arriverait-il si un allemand cherchait à comprendre cette étiquette conceptuelle? Il chercherait sans doute dans un dictionnaire et trouverait qu'une patate est une patate douce, selon la traduction correcte de patate, et conséquemment il se tromperait dans son interprétation de l'information. Si par contre, il n'y avait pas de possibilité d'étiqueter incorrectement un objet image le problème s'autogèrerait.

De plus, cette mise en œuvre de l'étiquetage a un autre avantage considérable qui est relié au développement d'outils logiciels dédiés à un usage général. La langue d'utilisation, et donc la traduction des termes d'étiquetage, peut être choisie par l'utilisateur parmi un nombre d'options disponibles. Ceci nous permettrait de bâtir un lexique avec une indexation des termes de codification constituée de références croisées qui permettrait d'effectuer des recherches de contenu qui ne seraient pas affectées par la langue d'utilisation de l'intervenant qui a réalisé une analyse donnée. Nous pourrions de cette manière nous abstraire de la

nécessité de bâtir un engin de consultation de terminologie qui tiendrait compte de toutes les variantes linguistiques d'un terme ainsi que de toutes ses représentations orthographiques plausibles. Par contre, une faute de frappe est une erreur commune et incontournable que, bien que nous en soyons conscients, nous n'arrivons pas à éviter complètement.

Le Tableau 5.1 présente la structure de classification proposée dans le cadre de l'initiative CORINE. La codification de l'USGS ne se rend qu'au deuxième niveau de celle-ci, mais elle est constituée des mêmes concepts séparés de la même manière que celle de CORINE Land Cover.

Nous constatons que l'information est représentée de manière hiérarchique qui procède progressivement du niveau d'abstraction le moins élevé vers une représentation univoque des différents phénomènes qui peuvent être d'intérêt lors de la classification de l'usage du territoire.

La version de l'USGS est très proche de celle-ci. Elle pourrait être incluse au système parallèlement à la codification de CORINE moyennant une procédure de veille qui soit en mesure d'identifier laquelle des codifications est utilisée et qui soit conçue pour remonter d'un niveau de description pour permettre une interopérabilité entre la nomenclature de CORINE et celle de l'USGS. Il serait également possible d'arriver à un consensus au sujet de l'étiquetage conceptuel et d'établir une normalisation des termes et codes qui soit judicieuse et acceptée de tous les intervenants du domaine. Cela rendrait la codification du contenu des images plus simple et uniforme.

Les étiquettes textes, ou les codes numériques, qui sont associés aux différentes classes d'occupation du territoire de la nomenclature CORINE, ou d'une autre codification de l'occupation du territoire, nous éviterait de trouver des modèles de correspondances analytiques permettant de naviguer entre les différents jeux de descripteurs. Ici, il faut penser aux variables numériques de traitement auxquels nous aurons inévitablement recours pour effectuer la classification du contenu des images.

Tableau 5.1 Nomenclature CORINE land cover

Tiré de http://liris.cnrs.fr/gom/JFO_2007/7.pdf

Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
1- Territoires artificialisés	1.1- Zones urbanisées	1.1.1- Tissu urbain continu
		1.1.2- Tissu urbain discontinu
		1.1.3- Bâti isolé
	1.2- Zones industrielles, commerciales et réseau de communication	1.2.1- Zones industrielles et commerciales
		1.2.2- Réseaux routier, ferroviaire et espaces associés
		1.2.3- Zones portuaires
		1.2.4- Aéroports
	1.3- Mines, décharges et chantiers	1.3.1- Extraction de matériaux
		1.3.2- Décharges
		1.3.3- Chantiers
	1.4- Espaces verts artificialisés, non agricoles	1.4.1- Espaces verts urbains
		1.4.2- Equipements sportifs et de loisirs
2- Territoires agricoles	2.1- Terres arables	2.1.1- Terres arables hors périmètres d'irrigation (serres)
		2.1.2- Périmètres irrigués en permanence
		2.1.3- Rizières
		2.1.4- Zones à forte densité de serres
	2.2- Cultures permanentes	2.2.1- Vignobles
		2.2.2- Vergers et petits fruits
		2.2.3- Oliveraies
		2.2.4- Lavandin
	2.3- Prairies	2.3.1- Prairies
	2.4- Zones agricoles hétérogènes	2.4.1- Cultures annuelles associées aux cultures permanentes
		2.4.2- Systèmes culturaux et parcellaires complexes
		2.4.3- Territoires principalement occupés par l'agriculture, avec présence de végétation
		2.4.4- Territoires agroforestiers
3- Forêts et milieux semi-naturels	3.1- Forêts	3.1.1- Forêts de feuillus
		3.1.2- Forêts de conifères
		3.1.3- Forêts mélangées
	3.2- Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	3.2.1- Pelouses et pâturages naturels
		3.2.2- Landes et broussailles (Landes subalpines)
		3.2.3- Végétation sclérophylle (Maquis et garrigues)
		3.2.4- Forêts et végétation arbustive en mutation
	3.3- Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	3.3.1- Plages, dunes et sable
		3.3.2- Roches nues
		3.3.3- Végétation clairsemée
		3.3.4- Zones incendiées
		3.3.5- Glaciers et neiges éternelles
		4.1.1- Marais intérieurs
		4.1.2- Tourbières
4- Zones humides	4.1- Zones humides intérieures	4.2.1- Marais maritimes
		4.2.2- Marais salants
	4.2- Zones humides maritimes	4.2.3- Zones intertidales
		5.1.1- Cours et voies d'eau
5- Surfaces en eau	5.1- Eaux continentales	5.1.2- Plans d'eau
		5.2.1- Lagunes littorales
	5.2- Eaux maritimes	5.2.2- Estuaires
		5.2.3- Mers et océans

Cette représentation alphanumérique serait aussi propice à l'utilisation d'analyses lexicosyntaxiques, de décomposition syntaxique ou de langages de description ontologique comme le *Web Ontology Language* (OWL)²⁷ pour effectuer l'encodage de l'information et les recherches de contenu en plus de nous permettre de créer des outils de découverte de contenu efficaces. Ces derniers consomment le moins de ressources mémoire possible pour le stockage des descriptions de contenu des images indexées.

Nous soulignons ici que ce qui sera accepté ou utilisé par la communauté de la télédétection est à établir, car pour le moment il ne semble pas y avoir de norme acceptée de tous. Il faudra donc entamer des discussions portant sur la structure d'information avant même qu'il ne soit probant d'essayer d'établir comment les mécanismes d'indexation et de recherche de contenu fonctionneront. Par contre, nous sommes convaincus qu'il sera possible de trouver un compromis entre les représentations CORINE et celle de l'USGS permettant de développer des outils de recherche de contenu efficaces et simples à utiliser.

De plus, il faudra prévoir un outil supplémentaire qui permettra d'effectuer la codification et l'indexation de contenu pour les utilisateurs d'autres logiciels de traitement, car rien ne nous permet de croire que tous les acteurs du domaine seront prêts à utiliser un système de traitement comme celui que nous proposons. Il faudra donc trouver un mécanisme permettant de générer la même codification du contenu des images afin de profiter d'un catalogue « intelligent » d'images qui soit aussi complet que possible et qui permette l'interopérabilité de nombreux systèmes de traitement d'images satellitaires.

5.4 La problématique du support de traitement

Nous comprenons maintenant mieux la pertinence d'avoir accès à un catalogue de connaissances pour aider à la dissémination du savoir et des progrès reliés au domaine de la télédétection. De plus, il permet l'indexation des images sources et des produits cartographiques dérivés créés dans le cadre de divers projets d'analyse d'images satellitaires

²⁷ http://fr.wikipedia.org/wiki/Web_Ontology_Language, consulté le 24 octobre 2012.

tout autant que la batterie de fonctions et de séquences de traitement qui ont mené à la création de ces produits à valeur ajoutée. Nous savons aussi qu'il est impératif de trouver des méthodes qui nous permettront d'évaluer et de classifier les progrès qui font surface avec les nouveaux algorithmes en fonction de leur potentiel de généralisation ainsi que de leurs performances en fonction de différents contextes d'utilisation et d'indexer les résultats de ces analyses pour les rendre simples à consulter. Or, comme les images satellitaires sont souvent difficiles à obtenir dans un format qui permet une évaluation équitable de tous les algorithmes, il est aussi important de voir à rendre le plus d'images disponibles et faciles à trouver et à obtenir pour permettre de mener des analyses comparatives des différents algorithmes qui existent déjà ou qui seront développés dans un avenir rapproché efficacement.

Dans ce qui suit, nous utiliserons le terme métadonnées pour tout ce qui concerne les données autres que les données image au sens propre. Par données image, nous entendons toutes les images, qu'elles soient brutes, orthorectifiées et/ou géoréférencées ou même transformées par des prétraitements ou des analyses complètes qui ont permis de créer des produits cartographiques dérivés. Toutes ces images ainsi que les produits dérivés ont leurs utilités dans un contexte d'analyse d'images satellitaires et devraient pouvoir être utilisées par tout intervenant qui peut en avoir besoin.

Par contre, nous devons souligner que toutes ces données images représentent une quantité faramineuse d'information et qu'il ne serait pas raisonnable de penser que nous puissions centraliser leur stockage à moins d'y dédier une quantité considérable d'espace mémoire redondante. Plusieurs techniques peuvent être envisagées pour mettre toutes les images et notions mentionnées en relation, mais l'identification d'une technique spécifique ne fait pas partie de notre objectif dans ce document.

La Figure 5.1 donne une vue d'ensemble de la séquence d'actions et de concepts qui entrent en considération lors de l'analyse d'images satellitaires dans un contexte de gestion de catastrophe. Les éléments conceptuels du catalogue de connaissances n'y figurent que sous

l'auspice de métadonnées de classification et de modèles de traitement ainsi que dans la codification étiquetée du contenu des images. Nous pouvons aisément étendre ce modèle pour inclure toutes autres informations qui pourraient être pertinentes à indexer.

Tout ce qui a trait au catalogue de connaissances peut être conceptualisé comme un élément parallèle à un système de traitement de ce type qui doit pouvoir interagir avec le ou les modules de traitement principaux et qui conséquemment pourrait être développé comme un élément programmé indépendant. Nous tenons à souligner que la même mécanique de consultation et de mise à jour des connaissances présentée ici pourrait être utilisée pour le catalogue de connaissances moyennant quelques modifications au niveau des accès et droits de mise à jour des données de la base de connaissances.

L'interaction avec le système de traitement doit cependant être vue de deux manières différentes. Si nous avons un système central de traitement qui est utilisé par un grand nombre d'intervenants, il va de soi que les deux niveaux d'information, les données et métadonnées images ainsi que les connaissances théoriques et pratiques reliées aux algorithmes et aux techniques de traitement, pourraient être liées au sein du même outil de traitement et d'analyse. La situation est bien différente si nous considérons les autres outils logiciels qui sont disponibles pour effectuer des analyses de ce type, car il serait beaucoup plus difficile de permettre une interaction de tous ces outils avec un système central développé selon une autre conception et/ou un autre paradigme de programmation. Ceci sans mentionner les difficultés d'ordre économique et politique reliées à la centralisation des traitements et à l'interaction de nombreux intervenants qui prônent tous différentes visions de ce qu'un outil efficace est. Nous ne nous attarderons pas à cette question, car elle ne relève pas de ce que nous visons ici, soit l'élaboration de la base conceptuelle d'un tel outil, mais il sera indispensable de la résoudre dans un proche avenir pour nous permettre de progresser sur la question du partage de connaissances.

À l'heure actuelle, nous retrouvons deux approches de développement qui sont soit en cours d'élaboration ou en phase initiale d'évaluation. Ces deux approches diffèrent principalement

en ce qui est considéré comme étant central à la problématique de l'analyse d'images satellitaires dans un contexte de gestion de catastrophe et de ce qui est mis en cause par de tels travaux. Dans ce qui suit, nous ne nous préoccupons pas des logiciels commerciaux, comme Envi ou eCognition par exemple, car comme nous l'avons mentionné, plusieurs de ces logiciels ne permettent pas de modifier ou d'ajouter des fonctions de traitement aux banques de fonctions disponibles et bien souvent ne comprennent pas toutes les fonctions requises pour mener une analyse complète. Ceci entraîne l'utilisation de nombreux logiciels et de transcriptions intermédiaires des données que nous considérons être une augmentation des efforts requis pour mener des analyses d'images qui diminue l'efficacité du travail des analystes. Nous nous concentrerons donc sur les logiciels qui tentent, conceptuellement du moins, de mettre tout ce qui est requis à la disposition des intervenants au sein d'un seul outil de travail.

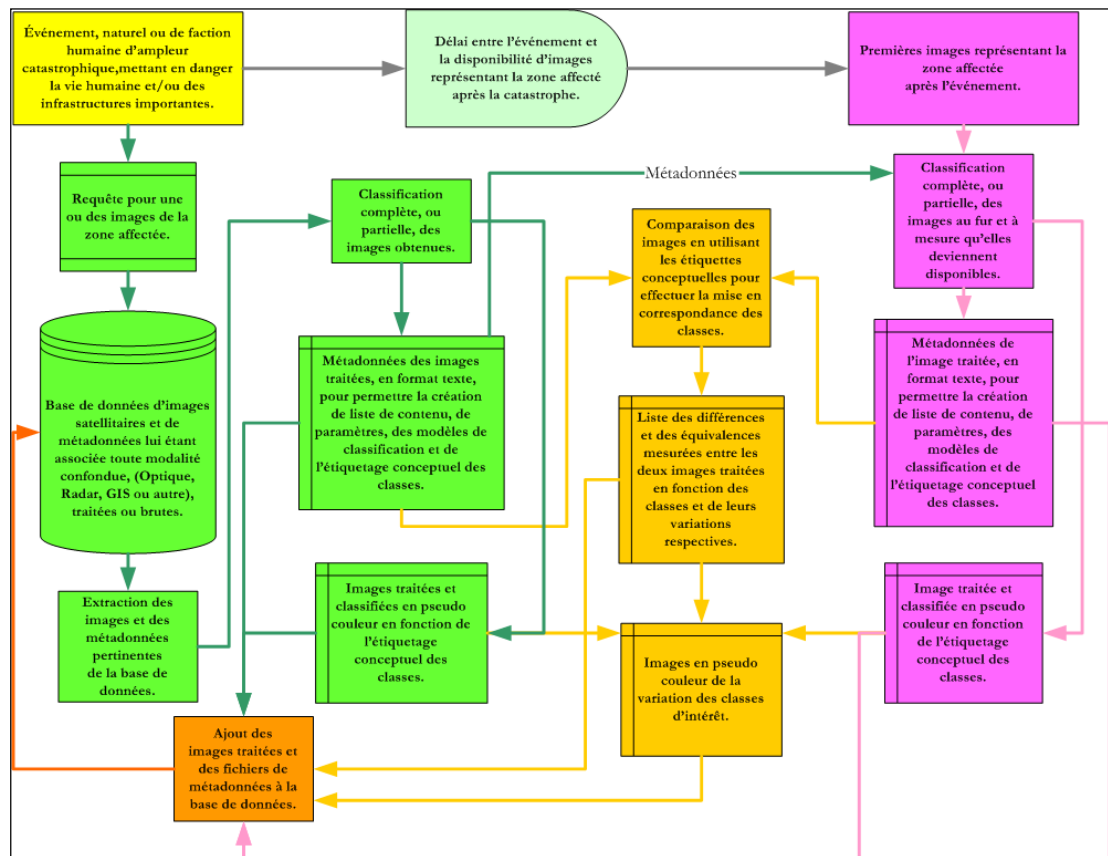


Figure 5.1 Séquence de traitement typique

La première vision de développement porte sur l'aspect algorithmique et tente de développer des outils et des algorithmes adaptés au traitement de différents scénarios d'analyse et des types et résolutions des images utilisées. La boîte à outils OTB, que nous avons mentionnée plus tôt, fait partie de cette catégorie d'optique de développement. L'idée directrice est de développer des algorithmes performants qui permettent de traiter différents cas d'analyse et de les programmer à l'aide d'une banque de fonctions préexistantes qui sont soit modifiées, combinées ou entièrement programmées ou reprogrammées pour traiter certains scénarios spécifiques puis de les rendre disponibles soit comme programmes exécutables ou comme composantes modulaires d'interfaces de traitement dédiées.

Cette vision de développement nous permet de maximiser l'efficacité de programmation et d'exécution des fonctions développées. Par contre, dans plusieurs situations il est nécessaire de modifier et de recompiler le code source pour nous permettre de changer de plateforme de travail ou de reconfigurer la chaîne de traitement afin de l'adapter à de nouveaux contextes d'utilisation. Nous devons comprendre que pour que des outils logiciels réalisés sous ce paradigme de développement puissent être utilisés, les intervenants ayant à les utiliser doivent posséder des connaissances en programmation et avoir accès à la dernière version de l'environnement de programmation ainsi que du code source sur leurs postes de travail pour leur permettre de compiler les programmes et de créer les fonctions exécutables désirées.

La gestion des codes sources et des versions des composantes logicielles requises pour le développement et la compilation de nouvelles fonctions est donc un élément important de cette approche de travail. Les programmes réalisés sous cette optique peuvent dans bien des cas être extrêmement performants, mais doivent être développés par des programmeurs ferrés si nous voulons pouvoir tirer profit de traitements parallèles ou d'autres techniques permettant d'optimiser l'utilisation des ressources informatiques disponibles.

Nous comprenons, par contre, que s'il y a un programme qui est conçu et réalisé pour être utilisé sur un système qui permet l'exécution parallèle du traitement, il est inévitable de réaliser une autre version du même code afin de pouvoir utiliser un algorithme donné sur un

système qui ne permet pas le traitement parallèle. Ceci entraîne au minimum un dédoublement des fonctions développées pour permettre de traiter les différentes combinaisons de plateformes de travail et de ressources informatiques disponibles.

En soi, cette caractéristique n'est pas un problème insurmontable, mais il demeure tout de même que la nécessité d'avoir des connaissances avancées en programmation pour être en mesure de modifier le code source des différentes fonctions ou encore pour créer des cascades d'opérations qui n'ont pas déjà été réalisées peut, dans certains contextes, être une barrière majeure en ce qui concerne la convivialité et la flexibilité d'utilisation des programmes développés sous ce paradigme de réalisation.

La seconde vision de développement part de l'utilisation prévue et tente d'identifier et de développer des mécanismes de traitement et d'accès aux données. Ceux-ci permettent de mettre tout à la disposition de l'intervenant sans qu'il soit nécessaire d'avoir un logiciel de traitement spécifique installé localement sur les postes de travail qui sont utilisés ou d'employer un logiciel propriétaire permettant une communication avec un système de traitement à distance. Cette optique de développement mise sur le traitement distribué et permettrait de tirer profit de serveurs de calculs physiques, virtuels ou du traitement infonuagique.

Nous pouvons penser aux services web comme modèles de conception de ce type de système. Ici, l'idée directrice est de développer une batterie d'outils qui sont intégrés à une plateforme de traitement qui serait disponible pour un accès à distance à l'aide d'interfaces de travail. Les fonctions et les outils qui sont mis à la disposition des utilisateurs sont essentiellement les mêmes que ceux qui sont développés selon le modèle local, mais peuvent être mis à jour à même le système sans que les utilisateurs ne soient obligés de refaire l'installation du logiciel de traitement.

Cette manière de considérer le problème a l'avantage de libérer l'utilisateur de toutes considérations techniques qui sont reliées à la mise à jour du logiciel et à la gestion des

versions de code les plus récentes. Par contre, cette optique de développement repose sur un effort de réalisation intense de la part de l'organisme gérant l'interface et les protocoles de transaction de données s'y rapportant ainsi que le code des fonctions mises en ligne pour le traitement des images satellitaires. Cependant, cette vision faciliterait considérablement la tâche de mettre en liaison toutes les métadonnées que nous avons mentionnées à la section précédente à même une seule interface de travail et de consultation.

Un exemple de cette optique de développement est la plateforme de traitement d'images satellitaire « GeOnAs »²⁸ qui est en cours de développement par un partenariat d'intervenants du monde de la télédétection, du domaine académique et de la NASA²⁹. Cette plateforme de travail vise la réalisation non seulement des traitements d'images satellitaires, mais aussi la possibilité de faire des recherches dans des bases de données d'images à partir de la même interface de travail. Le développement de ce système est fortement basé sur les applications WEB, ce qui nous aide à nous abstraire la composante de gestion de la version locale du logiciel de traitement qui est inhérente à l'optique locale de développement que nous avons mentionnée.

Il y a aussi un effort d'encapsulation de certaines des fonctions de l'outil OTB à même une interface de travail intégrée qui permet de consulter des catalogues d'images, de concepts et de thèmes d'intérêt tout en intégrant les outils algorithmiques requis pour réaliser une variété de traitements sur les images découvertes à même le système ou importées d'autres sources. Ce logiciel se nomme KAOS³⁰ et fait partie de travaux de développement reliés au concept d'observation de la terre en fonction des connaissances, en anglais on parle de *Knowledge-centered earth observation* (KEO)³¹. Ce logiciel et ses sous-composantes sont une réalisation collaborative de l'Agence spatiale européenne (ESA), du *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR), l'Agence spatiale allemande, et du Centre national d'études spatiales (CNES), l'Agence spatiale française, entre autres partenaires. Le logiciel KAOS est une

²⁸ <http://geobrain.laits.gmu.edu/OnAS/>, consulté le 31 octobre 2012.

²⁹ <http://geobrain.laits.gmu.edu/partners.htm>, consulté le 31 octobre 2012.

³⁰ <https://wiki.services.eoportal.org/tiki-index.php?page=Connecting+KAOS+to+KEO++at+ESRIN>, consulté le 20 février 2013.

³¹ <http://rssportal.esa.int/deepenandlearn/tiki-index.php?page=KEO+Project>, consulté le 20 février 2013.

encapsulation de KEO et de plusieurs autres modules de traitement et d'exploration de connaissance qui ont été développés au cours des dix dernières années.

Bien que l'outil KAOS soit conceptuellement très intéressant, nous ne pourrions que donner des informations sur cet outil qui sont issues des manuels d'utilisation (ACS, 2010) disponibles en ligne. Ceci provient de l'optique de sécurisation des données et des procédures de traitement qui est inhérente au développement de cet outil et qui est justifié si nous considérons ce que nous avons souligné au sujet de la validation de fonctions et des procédures de traitement développées par les utilisateurs que nous avons mentionnées plus tôt. Conséquemment, bien qu'une version du logiciel soit disponible en ligne, cette version est extrêmement limitée et ne nous a pas permis de mener de tests élaborés portant sur les possibilités que nous offre cet outil de travail.

Le développement des systèmes GeOnAs et KAOS est, comme OTB, essentiellement axé sur le paradigme de programmation à source libre, *open source* en anglais, et donc permet théoriquement à tous les utilisateurs de contribuer à l'avancement et à l'amélioration du logiciel. Les fondements du développement initial du système GeOnAs sont exposés dans le mémoire de maîtrise de (Perez, 2008) qui traite de la recherche d'images satellitaires et dans la thèse de doctorat de (Deng, 2009) qui porte sur l'ensemble de l'interface de traitement comprenant un volet d'exploration et d'accès aux images sources ainsi que sur la structure de traitement distribué et de l'usage de service WEB pour réaliser les traitements à distance.

Ces travaux ne sont pas les seuls qui traitent de cette optique de développement, mais sont parmi les plus élaborés de ceux que nous avons trouvés lors de nos recherches documentaires. D'autres chercheurs travaillent sur certaines portions du problème comme (Bielski, Gentilini et Pappalardo, 2011) qui se penchent sur la question du traitement infonuagique et des protocoles de sécurité requis pour permettre des transactions sécuritaires entre les fournisseurs de données images et les utilisateurs des produits dérivés.

D'autres aspects connexes de cette problématique comme la recherche d'image en fonction de leur contenu conceptuel sont traités dans (Datcu, Seidel et Walessa, 1998) et (Datcu et al., 2007). Ces travaux sont à la source du module d'exploration de données en fonction de connaissances et de concepts, *Knowledge-based Information Mining (KIM)*³², qui est intégré à l'outil KAOS. Ces travaux portent sur l'indexation des métadonnées des images traitées, donc des résultats d'analyse et d'interprétation des images permettant une recherche efficace en fonction de différents concepts sémantiques contenus dans les images. Nous soulignons ici qu'il y a un certain parallèle entre ce que nous disions au sujet de l'étiquetage conceptuel et de l'indexation de contenu dans ce qui est proposé par ces auteurs. La principale différence est au niveau de la description qui est utilisée. Nous prôtons dans ce document une description textuelle qui est simple à consulter, mais difficile à automatiser tandis que les travaux de M. Datcu et de ses collaborateurs se penchent sur l'extraction automatique de descripteurs, au sens des variables numériques de traitement, qui sont représentatifs de différents concepts sémantiques des images.

Il est à noter que peu importe la description qui est utilisée pour indexer le contenu des images, le concept demeure le même et il est inévitable que les mécanismes de découverte d'information, *Data Mining* en anglais, qui seront utilisés pour effectuer les recherches dans les bases de données, puissent être développés pour travailler avec une vaste panoplie de descriptions. De plus, la mise en œuvre d'un catalogue de concepts, du type que nous avons proposé, pourrait très bien permettre d'utiliser de nombreuses différentes représentations de l'information.

Ce qui doit être retenu est que toutes les informations, qui peuvent être pertinentes à rendre disponibles pour aider les différents intervenants à mener des analyses reliées au domaine de la télédétection, peuvent être considérées comme des couches d'information complémentaire qui pourront être indexées afin de permettre plusieurs différents types de requêtes d'information. La structure de gestion des données qui sera utilisée reste à établir ainsi que celle de la mécanique d'indexation. La conception du système de gestion d'information doit

³² <http://rssportal.esa.int/deepenandlearn/tiki-index.php?page=KIM+Project&highlight=KIM>, consulté le 20 février 2013.

cependant être réalisée en fonction des informations qui seront identifiées comme étant pertinentes à mettre à la disposition des usagers du système. Avant que ceci soit défini, nous ne pouvons que penser en termes abstraits à ce que cette structure devra permettre, car la complexité du problème d'indexation du contenu ne peut pas être établie clairement pour le moment.

La Figure 5.2 présente les blocs de traitement de base d'un système d'accès à distance générique avec ressources de traitement, de consultations et d'exécution centralisée. Cette représentation est simplifiée, mais présente tout de même les éléments fondamentaux d'un tel système.

Plusieurs autres mécanismes de réalisation d'un système de ce type pourraient être envisagés mais les éléments fonctionnels représentés à la Figure 5.2 devraient tout de même être tenus comme des blocs conceptuels de base d'un tel système. Ces blocs peuvent être implémentés de différentes manières mais le choix d'une architecture spécifique doit suivre l'identification des besoins ainsi que l'identification des contributeurs qui collaboreront au développement du système.

Le développement et le maintien d'un système de ce type représentent une tâche complexe, car il faudra développer des protocoles de collaboration ayant plusieurs paliers pour permettre de contrôler l'ajout de nouvelles fonctionnalités et/ou de données. Il est évident que toute nouvelle fonction qui pourrait être ajoutée, suite à des travaux de recherche par exemple, doit être testée et validée par des pairs pour que la validité et la performance d'un nouvel algorithme puissent être établies avant de rendre la nouvelle fonction ou le nouvel algorithme disponible aux utilisateurs.

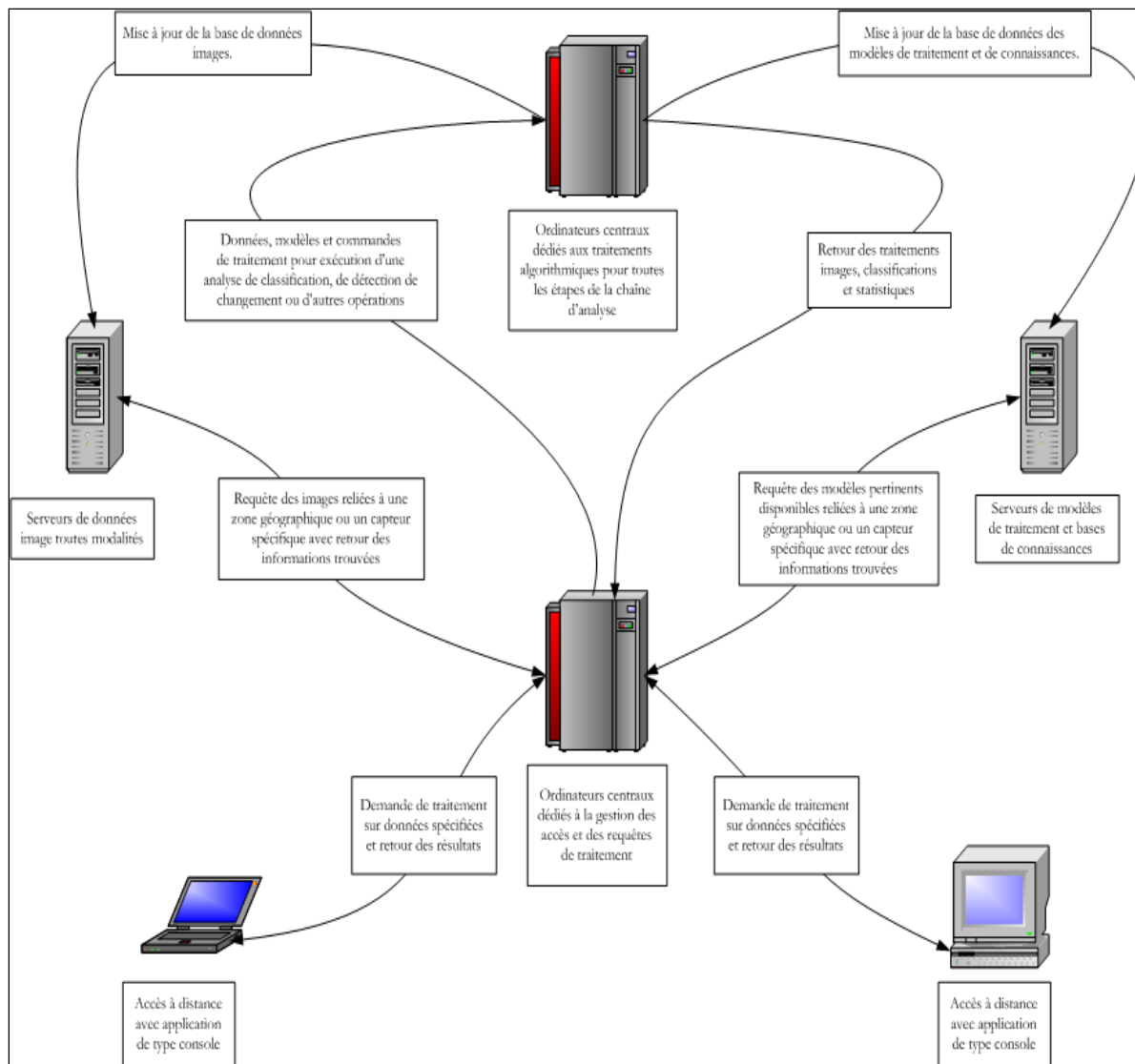


Figure 5.2 Modèle d'accès et structure des ressources

Nous tenons à souligner que le système GeOnAS vise à être un outil autant académique que professionnel et devra être bien analysé pour développer les protocoles d'évaluation des algorithmes en fonction du niveau de connaissance des utilisateurs. Il en va de même pour le système KAOS, qui comporte déjà des mécanismes de gestion d'accès, bien que ce dernier ne vise pas autant la communauté académique que GeOnAs. Nous comprenons qu'un étudiant en géographie n'a pas nécessairement les connaissances requises pour développer le code dans le langage de programmation du système de traitement et à notre avis, il n'est pas

raisonnable de s'attendre à ce que des intervenants généralistes aient à apprendre à réaliser de la programmation avancée pour pouvoir contribuer au développement de nouvelles fonctionnalités.

Nous pouvons donc prévoir plusieurs niveaux d'accès au système qui permettraient d'effectuer le triage entre étudiants, chercheurs, utilisateurs professionnels et programmeurs qui permettrait d'indexer le niveau de vigilance et d'évaluation en fonction des compétences des utilisateurs qui développent de nouvelles fonctionnalités.

De plus, ceci permettrait de pousser à l'avant du carnet d'évaluation les fonctions développées par des chercheurs d'expérience et d'acheminer ces fonctions vers des processus d'évaluation de performance sur des cas de traitement similaires à ceux qui ont servi pour leur développement. Puis, ces mêmes fonctions pourraient être évaluées par des pairs afin d'analyser leur potentiel de généralisation et les bornes de performances qui peuvent être atteintes en les utilisant. Si la nouvelle fonction est acceptée suite au processus d'évaluation, elle pourrait être ajoutée aux fonctions disponibles, si le code développé est compatible, ou encore elle pourrait être reprogrammée par des programmeurs ferrés pour tirer profit des ressources informatiques disponibles et les rendre chaînables.

Les fonctions ou séquences de traitement développées par des étudiants pourraient être soumises à des tests plus rigoureux et être acheminées par la suite à des programmeurs d'expérience qui seraient en mesure de les programmer plus efficacement en tenant compte de la mécanique de fonctionnement interne du logiciel de traitement. Nous voyons que l'usage d'un tel système permettrait une collaboration efficace entre les intervenants des différents domaines qui sont reliés au développement d'outils dédiés au traitement d'images satellitaires en premier lieu, mais aussi d'images d'autres types, car n'oublions pas que le traitement d'image repose souvent sur les mêmes concepts peu importe le type d'image.

Un point que nous tenons à mentionner ici est que bien que les deux optiques de développement sont fondamentalement différentes, rien n'empêcherait que des fonctions

développées avec des systèmes de développement de type local, comme OTB ou encore la bibliothèque de fonction de traitement d'image OpenCV³³ par exemple, puissent être par la suite incorporées à un système distribué. Le groupe de recherche travaillant au développement de l'interface de travail GeOnAs a déjà prévu cette éventualité et a entamé le développement de classes enveloppantes, des classes *wrapper* en anglais, qui permettraient de « transcrire » du code développé indépendamment pour lui permettre de fonctionner au sein du système. Conséquemment, nous pourrions inclure l'énorme catalogue de fonctions de traitement et d'analyse d'image qu'est la suite de fonctions disponibles dans la bibliothèque OTB et de l'inclure dans le système GeOnAs pour les rendre disponibles à des utilisateurs qui n'ont pas nécessairement les connaissances en programmation C et/ou C++ nécessaires pour qu'ils puissent en tirer profit directement avec les outils requis pour utiliser d'OTB directement. Le manuel d'utilisation d'OTB (OTB, 2009) présente les différentes fonctions de la bibliothèque OTB qui pourraient être incluses à d'autres outils de traitement par l'entremise de mécanismes d'encapsulation du type de ce qui est prôné par les groupes de développement de GeOnAs et de KAOS.

Le logiciel KAOS est aussi une interface de travail qui permet d'encapsuler des fonctions développées localement, avec la bibliothèque OTB entre autres, pour les rendre plus simples à utiliser par des utilisateurs qui n'ont pas nécessairement les connaissances requises pour développer leurs propres fonctions en les codant et les compilant eux-mêmes. Il faut évidemment que les fonctions soient déjà disponibles au sein des outils de traitement inclus dans le logiciel pour qu'un utilisateur puisse en tirer profit, mais dès qu'elles le sont, il devient possible de créer des programmes exécutables ou des chaînes de traitement complexes directement à partir de l'interface KAOS.

Un autre outil mettant en œuvre des fonctions et des applications développées avec la bibliothèque OTB est en cours de développement par le groupe de recherche travaillant à l'élaboration d'OTB. Cet outil est l'interface Monteverdi³⁴ qui permet d'utiliser des fonctions et des applications de traitement prédéveloppées à partir d'une interface graphique permettant

³³ <http://opencv.org/>, consulté le 2 mars 2013.

³⁴ <http://www.orfeo-toolbox.org/otb/monteverdi.html>, consulté le 26 février 2013.

de configurer les paramètres fonctionnels des différents algorithmes et fonctions inclus à l'aide d'interfaces dédiées. Une différence notable de ce système par rapport à GeOnAs et KAOS est que pour y inclure de nouvelles fonctions il est indispensable de les développer selon le paradigme local d'OTB axé sur la programmation C/C++ puis d'encapsuler ces fonctions pour qu'elles puissent fonctionner avec l'interface Montéverdi. Cette particularité ne nous semble pas propice à permettre de développer et de modifier des composantes de traitement d'une manière simple, flexible et intuitive. L'outil Montéverdi pourrait tout de même être pertinent à explorer dans certains contextes pour lesquels les outils et fonctions requis pour un traitement donné sont déjà intégrés au système.

Un autre aspect qui est particulièrement intéressant de l'optique de développement distribué, comme c'est le cas avec l'outil GeOnAs reposant sur le concept des services WEB, est la possibilité d'utiliser des outils informatiques limités, comme les ordinateurs portables, les tablettes ou les téléphones intelligents pour configurer une tâche et lancer son exécution. Comme ni le logiciel, ni les ressources de traitement, ni les images sources ne sont requis localement pour effectuer une analyse, il devient possible d'utiliser des outils informatiques moins puissants, et donc moins dispendieux, pour configurer et lancer les traitements.

Concrètement, cela nous permet d'entrevoir la possibilité qu'un spécialiste d'un type spécifique de traitement d'image puisse configurer et lancer une analyse pendant qu'il est dans un train en route vers le travail, par exemple, à l'aide de son téléphone 4G puis de récupérer le résultat du traitement à son arrivée au bureau pour poursuivre l'analyse entamée pendant son déplacement. Cette caractéristique, bien qu'elle ne soit pas fondamentalement essentielle au fonctionnement d'un système de ce type, se prête bien à l'optique de télétravail qui prend de plus en plus d'ampleur dans notre société. De plus, elle permettrait de faciliter la coopération entre des experts de différents domaines qui sont répartis aux quatre coins de la planète lorsque leurs compétences complémentaires seront requises pour traiter des images dans des contextes de gestion de catastrophe.

5.4.1 L'accès aux images sources et transformées.

Comme nous l'avons mentionné, la recherche d'images disponibles et leur acquisition sont des éléments importants de toute entreprise reposant sur l'utilisation des concepts et techniques relevant de la télédétection. Ceci est présenté dans l'extrait de la thèse de (Deng, 2009) qui suit et qui souligne que la recherche de données propices est un élément qui prend souvent une quantité considérable de temps et de ressources.

« Currently, datasets from data centers are very diverse. The data products may differ in spatial/temporal extent and resolution, origin, format, name convention, and map projection. Scientists spend considerable time assembling the data and information into a form ready for analysis, even if the analysis is very simple. An estimated 50% ~ 80% of researchers' time is spent on data and information discovery and assembling [Di and McDonald, 1999]. The fundamental problem is that the systems, data, and information available from the different data repositories are not interoperable. »

Que ce soit pour mener une analyse de l'utilisation du territoire, pour établir une référence de contenu, pour mener une analyse de changement ou encore pour permettre d'évaluer des algorithmes afin d'établir leur pertinence et leur performance en fonction de différents contextes d'utilisation, il est indispensable de pouvoir trouver et obtenir les images les plus probantes et les plus récentes possible. Ceci devrait pouvoir être réalisé le plus rapidement possible pour que les efforts déployés par la communauté de recherche travaillant sur la problématique de la télédétection puissent être concentrés sur les concepts théoriques et les techniques de traitement qu'elle développe plutôt que sur la recherche de données propices.

Cela s'entend qu'un système qui permet de réaliser les opérations de recherche et d'acquisition d'images, qui soit intégré à même l'interface principale utilisée pour réaliser le traitement, serait un atout indéniable et permettrait de travailler plus efficacement et de nous abstraire de la contrainte de transcription et de préparation des données avec laquelle nous devons composer la plupart du temps. L'utilisation d'un tel outil nous aiderait à définir des fonctions de validation de la qualité des images et de transcription standardisées si le cas les requiert.

Comme ce volet de la problématique ne fait pas partie de l’optique de développement de l’outil Montéverdi, nous n’inclurons pas de plus amples détails concernant ce logiciel dans ce document. Bien que cet outil soit intéressant à explorer pour réaliser certains types de traitements, il nous semble que le gain en productivité, qui découlerait de l’intégration des outils de recherche et d’indexation de contenu à même l’interface de travail utilisée pour réaliser le traitement d’images satellitaires dans des contextes de gestion de catastrophe, est d’une importance capitale. C’est pour cette raison que nous choisissons d’exclure Montéverdi de nos considérations pour le reste de ce document.

Un premier pas dans la direction du développement d’une interface de recherche d’images satellitaires a été réalisé dans le cadre des travaux de (Perez, 2008). Il s’est penché dans le cadre de sa maîtrise sur comment gérer et rendre les images faciles à trouver et à récupérer de sites de stockage distribués de par la planète. L’interface de consultation développée dans ce contexte a permis de développer l’outil *Geospacial Data Products Download*³⁵ qui a été adapté par la suite pour servir de module de recherche et d’acquisition d’images à la plateforme de traitement GeOnAs.

Pour le moment, cet outil ne permet d’accéder qu’à des images ayant des résolutions basses ou moyennes qui ont été mises à la disposition du groupe de développement de ce logiciel. Rien ne nous porte à croire que le même mécanisme ne puisse être adapté pour permettre l’indexation et la gestion d’images à haute ou à très haute résolution.

Le concept de gestion des images qui est sous-jacent au fonctionnement de cet outil est propice à la gestion des données peu importe leur taille, car le système ne repose pas sur un stockage local des images, ce qui représenterait comme nous l’avons mentionné, une consommation de capacité de mémoire irréaliste. Le système repose plutôt sur un stockage local des métadonnées reliées aux différentes images et de pointeurs permettant de récupérer les images sélectionnées de leur lieu d’entreposage, peu importe où elles se trouvent. Ceci permet de minimiser la consommation locale de mémoire et du même coup d’éviter les

³⁵ <http://geobrain.laits.gmu.edu/GeoDataDownload/index.jsp>, consulté le 31 octobre 2012.

problèmes de dédoublement des sources de téléchargement que nous avons mentionnés en référence à l'expérience d'Haïti à la section 4.3.

Les Figure 5.3 à 5.6 présentent les interfaces de consultation et de téléchargement du catalogue d'images disponibles par l'entremise de l'outil *Geospatial Data Products Download* dans sa configuration actuelle.

Figure 5.3 Interface de configuration des requêtes image

Cette interface donne accès à plusieurs catalogues d'images provenant de différents fournisseurs et de différentes plateformes d'acquisition à l'aide de menus déroulants et de champs dédiés. En fonction du ou des catalogues et du satellite choisis, il peut y avoir plusieurs choix de capteurs disponibles.

Si nous choisissons la plateforme LANDSAT-5 par exemple, il est possible de spécifier par la suite si nous nous intéressons aux données du *Thematic Mapper* (TM) ou encore à celles

du *Multi Spectral Scanner* (MSS). À la suite de cette sélection de paramètres concernant le satellite et le capteur, le système nous permet d'affiner la requête d'information en fonction de collections de données image différentes. Après cette configuration initiale de la requête d'information, il reste à préciser la zone d'intérêt de la recherche.

Nous remarquons que le choix de la zone d'intérêt peut être défini de plusieurs manières. La première, de loin la plus simple, est d'utiliser la fenêtre *Google Maps* pour établir un zoom de la région pour laquelle nous cherchons des images. Le choix de cette fonctionnalité exprime bien la relation entre l'utilisateur, ses besoins de simplicité et l'utilisation de procédures WEB constituées de composantes de consultation qui sont déjà bien connues pour tenter de minimiser le temps relié à l'apprentissage du mode de fonctionnement des composantes périphériques de l'analyse d'images satellitaires. Il est aussi possible de contraindre les recherches par nom de pays ou encore en donnant les coordonnées de la région concernée en fonction de différentes projections cartographiques. Pour les États-Unis d'Amérique, il est aussi possible d'effectuer les requêtes en fonction du nom des états à l'aide d'un menu déroulant.

Il y a aussi des champs de l'interface qui sont prévus pour permettre de limiter l'étendue des recherches à une certaine période temporelle. Ceci est particulièrement utile dans le contexte de gestion de catastrophe et surtout de détection de changement, car, comme nous l'avons mentionné plusieurs fois, dans ce contexte il est toujours préférable d'utiliser les images les plus récentes qui sont disponibles pour une région donnée et qui présentent les mêmes conditions climatiques et saisonnières.

Cette option nous permettrait par exemple, de configurer l'exploration des données disponibles pour trouver des images qui proviennent du satellite AQUA et de son capteur MODIS pour la région de Montréal au Canada prise entre le 9 septembre 2010 et le 9 septembre 2012 puis de lancer la requête. Dans ce cas de configuration, le système nous retourne une liste de 146 enregistrements répondants aux critères imposés.

Une fois cette étape préparatoire terminée, le système nous donne une liste des images disponibles qui répondent aux critères de recherche utilisés et qui présentent les détails généraux des métadonnées associés aux images pour permettre de guider la sélection d'une ou de quelques images de la liste en fonction des besoins de l'utilisateur.

La Figure 5.4 est une des pages de cette liste d'images disponibles avec une représentation visuelle du recoupement entre la surface couverte par l'image et la zone d'intérêt définie à même l'interface de configuration de la requête. Si nous nous intéressons au jeu de données complet dans son format d'encodage natif, il est possible de le télécharger directement à partir de cette interface sans plus d'étapes. Si par contre nous ne nous intéressons qu'à certaines des bandes d'information, il est possible d'explorer le contenu du jeu de données à l'aide de la fonctionnalité de téléchargement avec personnalisation des données qui est à la droite de chaque élément de la liste.

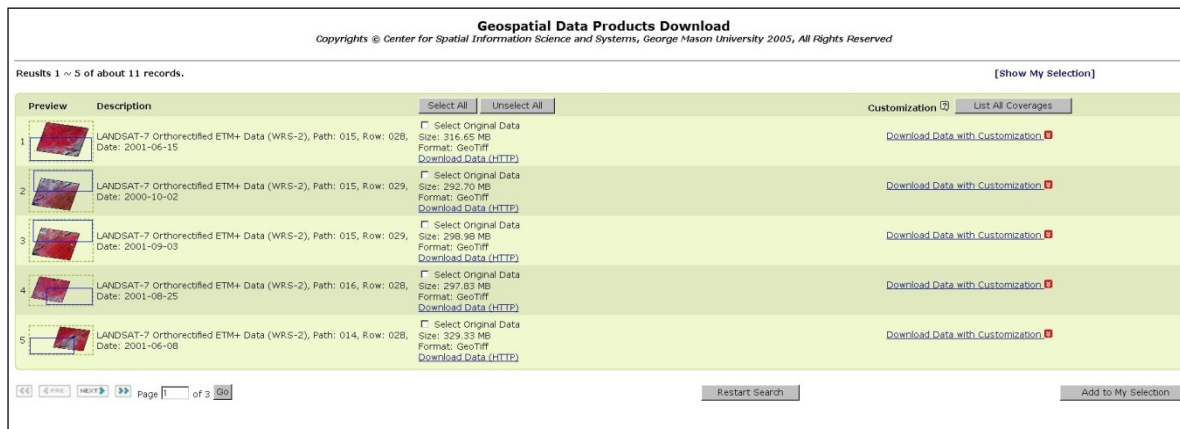


Figure 5.4 Interface de sélection d'images

La Figure 5.5 est un exemple des choix de bandes que nous pouvons faire. Ici, pour une image LANDSAT-7 ETM+, les choix disponibles sont évidemment les bandes d'information que le capteur ETM+ permet d'obtenir. Dans ce cas spécifique il s'agit de couches composées de :

- Bleu, allant de 0,450 à 0,515 μm avec une résolution de 30 m,

- Vert, allant de 0,525 à 0,605 μm avec une résolution de 30 m,
- Rouge, allant de 0,630 à 0,690 μm avec une résolution de 30 m,
- Panchromatique, allant de 0,520 à 0,920 μm avec une résolution de 15 m,
- Proche infrarouge, allant de 0,750 à 0,900 μm avec une résolution de 30 m,
- Moyen infrarouge, allant de 1,550 à 1,750 μm avec une résolution de 30 m,
- Moyen infrarouge, allant de 2,080 à 2,320 μm avec une résolution de 30 m,
- Infrarouge thermique, allant de 10,400 à 12,500 μm , gain bas, avec une résolution de 60 m,
- Infrarouge thermique, allant de 10,400 à 12,500 μm , gain haut, avec une résolution de 60 m.

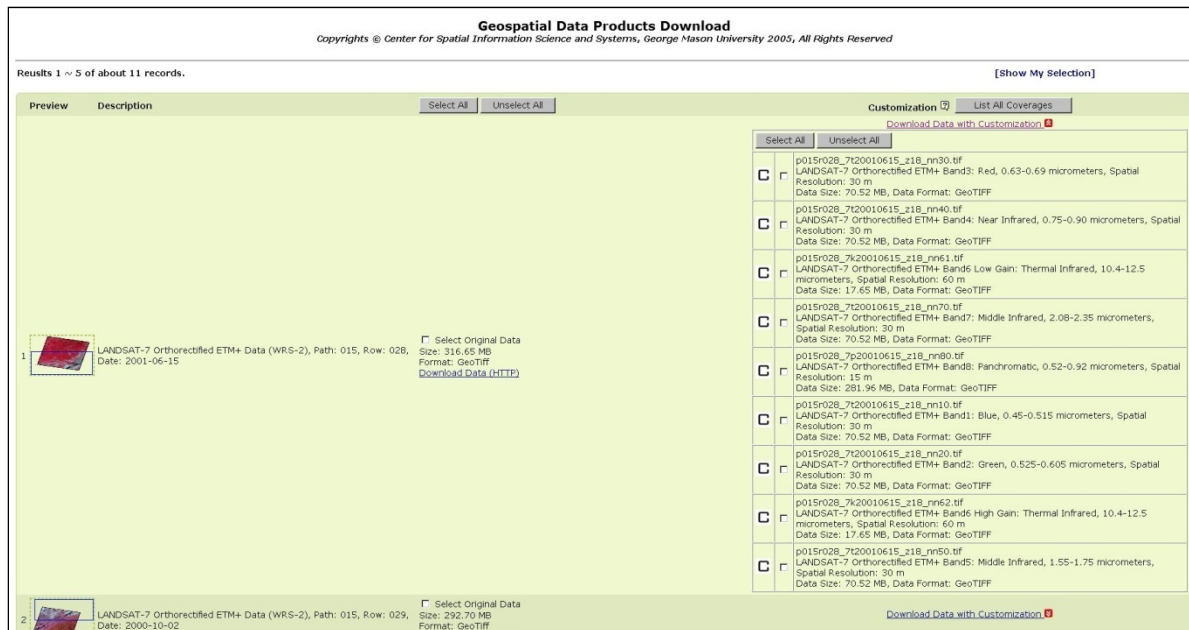



Figure 5.5 Interface de sélection des composantes de l'image

Nous pouvons donc soit récupérer toutes les bandes d'information en un seul paquet dans le format natif d'acquisition ou de stockage, tel qu'utilisé par le fournisseur de donnée, ou encore effectuer une sélection des composantes images qui nous intéressent en fonction de ce que nous sommes en train d'analyser. Cette fonctionnalité nous permet de réduire la taille du jeu de données lorsque nous n'avons pas besoin de toutes les composantes de l'image et

conséquemment, de réduire la quantité d'information à télécharger et à stocker localement. Cela serait, dans certaines situations, un atout important. Pour nous en convaincre, nous n'avons qu'à penser aux images à très haute résolution qui représentent des gigaoctets d'information. Si nous n'avons pas besoin de toutes les bandes d'information, la possibilité de choisir celles qui sont probantes en fonction de l'analyse en cours nous permet de minimiser l'utilisation de bande passante ainsi que des ressources informatiques dédiées au stockage local des données de traitement.

Geospatial Data Products Download
 Copyrights © Center for Spatial Information Science and Systems, George Mason University 2005, All Rights Reserved

You have selected the coverage "p015r028_7t20010615_z18_nn30.tif"
 LANDSAT-7 Orthorectified ETM+ Band3: Red, 0.63-0.69 micrometers, Spatial Resolution: 30 m
 Data Size: 70.52 MB, Data Format: GeoTIFF
 We can process this coverage through OGC WCS service.

Spatial Extent 
☐ Granule Bounding Box
☐ Query Bounding Box
☒ Intersection Bounding Box

Export Format

Export Size
☒ Specify Width / Height
 Width: Height:
☐ Specify Resolution on X / Y
 Res. on X axis: Res. on Y axis:

☒ Apply these parameters to other coverages within the same granule, if they have the same projection.
☐ Apply these parameters to all the other coverages I selected, if they have the same projection.

Figure 5.6 Interface de téléchargement d'image

Une fois la sélection des composantes d'image réalisée, nous procédons à la validation de la sélection ce qui nous permet d'accéder à la dernière fenêtre de configuration de la requête qui est représentée à la Figure 5.6. Cette interface nous donne de plus amples détails concernant le jeu de données et les composantes images sélectionnées ainsi que de l'information concernant le catalogue ou le fournisseur de données selon le cas. De plus, comme nous n'avons pas choisi de télécharger les données dans leur format natif, le système nous donne l'option de choisir le format des données qui seront empaquetées selon nos besoins puis téléchargées. Plusieurs des options de cette interface sont reliées à la mise en forme du jeu de données et nous donnent plusieurs choix en ce qui concerne l'étendue de l'image qui sera préparée.

En fonction des choix de configuration de la région d'intérêt de la requête, le système nous donne un aperçu de la taille en pixel de l'image qui sera exportée. Nous comprenons bien sûr que l'image telle qu'elle a été prise aura la plus grande surface de couverture suivie de la taille de la région définie soit à l'aide de la fenêtre *Google Maps* ou de coordonnées géographiques dans son ensemble. Finalement, la plus petite des images est en général obtenue par l'intersection de l'image originale et de la boîte englobant la zone ciblée.

Pour un jeu de données LANDSAT-7 par exemple, nous pourrions les obtenir dans l'un des formats d'exportation suivants :

Géo référencés :

- GoeTIFF,
- NTIF,
- ESRI avec étiquetage .hdr,
- ENVI avec étiquetage .hdr,
- Image ERDAS Imagine,
- ELAS,
- HDF4,
- Fichier de base de données PCI Geomatics,
- Données image et d'analyse,
- USGS ASCII DEM.

Non géo référencés :

- JPEG JFIF,
- Bitmap Windows,
- PCI AUX étiqueté,
- PNG,
- GIF,
- Pixmap X11,
- Portable Pixmap format.

Une fois la configuration de la requête complétée le système nous donne accès à un volet de vérification des données. Cette étape nous permet de réviser la demande d'information avant de lancer le transcodage et le téléchargement de composantes images choisies.

Nous comprenons que les images ne sont pas stockées dans tous les formats d'exportation plausibles. Il y a donc nécessairement une composante du logiciel qui est invoquée au moment de l'empaquetage qui permet d'effectuer la transcription des données de leur format natif vers le format requis sur demande avant que les données ne soient prêtes pour le téléchargement. Ce type de fonctionnalité, considérée du point de vue de ce que nous avons mentionné concernant le besoin de normaliser les formats, nous permet d'entrevoir qu'il serait possible d'automatiser une portion de la préparation des données en combinant des fonctions de validation de la qualité des images et de leurs métadonnées selon leurs types à des fonctions de préparation, de transcription et d'indexation. Ces dernières pourraient être invoquées automatiquement aussi tôt que de nouvelles images sont ajoutées au catalogue.

L'interface de recherche d'images devrait permettre ce type de consultation simple et, autant que cela soit possible, permettre d'automatiser la validation des nouvelles données image ainsi que leur ajout à la base de données peu importe la vision de développement utilisée pour l'élaboration d'un catalogue de ce type. Que ces fonctionnalités soient automatiques et systématiques ou seulement utilisées lorsque les requêtes d'information sont lancées, il va de soi que la qualité des images et de leurs métadonnées est primordiale pour toute analyse reliée à la télédétection.

5.4.2 Le traitement distribué et de l'accès aux ressources algorithmiques

L'interface de recherche d'image que nous venons de présenter a servi de départ pour le développement du module d'importation de composantes image qui est inclus dans le logiciel de traitement GeOnAs que nous avons mentionné précédemment. Le développement de ce logiciel suit les travaux de doctorat de (Deng, 2009) qui portent sur l'élaboration d'un outil de traitement plurifonctionnel adapté aussi bien aux besoins de traitement qu'à l'analyse

d'images satellitaire autant du milieu académique que professionnel. Comme nous l'avons souligné, le logiciel KAOS vise aussi ce même type d'intégration. Il utilise tous les outils et toutes les fonctions requises pour mener le type de traitements mis en cause par l'analyse d'images satellitaires. Il y a certaines différences en ce qui concerne les protocoles d'accès et de la vision de développement de KAOS mais il s'agit essentiellement d'un autre système qui maximiserait la performance des utilisateurs en leur permettant de réaliser toutes les opérations requises pour mener une analyse donnée à même un seul outil.

Le logiciel KAOS diffère de GeOnAs en ce qui concerne l'acquisition de données images de plusieurs manières bien qu'il y ait plusieurs éléments très similaires entre les deux interfaces de consultation des catalogues d'images. La plus notable, et selon nous la plus importante en vue de ce que nous avons présenté, est que l'interface de consultation d'images disponibles permet de mener les recherches d'images en fonction des mêmes critères que ce qui a été présenté au sujet de l'outil *Geospatial Data Products Download* avec essentiellement les mêmes mécanismes de consultation des catalogues, mais aussi en fonction de thèmes d'intérêt et/ou du contenu sémantique étiqueté des images. Le logiciel KAOS permet aussi de créer, de gérer et de manipuler des STIS en fonction des mêmes critères que ceux qui sont utilisés pour les images. Cette fonctionnalité est très intéressante dans un contexte de gestion de catastrophe pour les raisons que nous avons soulignées à la section 1.1.7 qui traite des STIS.

La vision de stockage est cependant différente et repose sur un stockage local des images au sein d'un parc de serveurs. Ceci peut mener à des problèmes si nous considérons la création de base de données images exhaustives ce qui représente une quantité faramineuse de mémoire ainsi qu'une gestion efficace. Cette vision permettrait tout de même de minimiser l'impact que peut avoir un dédoublement d'images sources. De plus, elle nous permettrait d'utiliser des mécanismes d'identification de doublons qui pourraient servir à épurer l'inventaire d'images soit automatiquement ou en soulignant aux administrateurs du système leur existence. Cette vision a aussi un impact sur un usagé qui voudrait utiliser cet outil pour analyser des images qu'il entrepose localement et qui ne font pas partie des bases de données

associées au système de traitement. Dans cette situation les images doivent être téléversées sur les serveurs du système afin de pouvoir par la suite les analyser avec les outils inclus dans l'outil KAOS. Ceci peut entraîner des délais considérables selon la taille et le nombre de fichiers à téléverser.

Suite à ce que nous avons exposé il est, selon nous, assez évident qu'un outil permettant de regrouper la majorité des fonctionnalités, si pas toutes, requises par l'analyse d'images satellitaires allant de la sélection d'images à la classification et la codification finale du contenu permettant d'exporter les produits dérivés, nous permettrait de maximiser la performance des analystes. Mais, il faut se demander pourquoi un tel outil devrait inclure des volets académiques et professionnels comme c'est le cas avec le logiciel GeOnAs.

Le concept derrière cette prise de position est assez simple à exprimer. Essentiellement, l'idée est que si les étudiants actuels, qui deviendront les analystes de demain, peuvent utiliser un outil efficace et bien intégré, ils pourront profiter plus pleinement de leur expérience académique. Ils travailleraient sur le traitement des images et sur l'utilisation des algorithmes pertinents plutôt que de passer une grande partie de leur cheminement académique à la recherche des données et des outils dont ils ont besoin pour mener diverses analyses.

De plus, un outil de ce type, s'il est combiné à un catalogue de consultation de connaissances indexées qui est jumelé à un dispositif de communication interne reliant les chercheurs et intervenants du domaine, leur permettrait d'accumuler les connaissances théoriques et pratiques requises plus rapidement. Ceci en leur permettant d'entrer en communication directement soit avec les chercheurs ou d'autres intervenants ayant les connaissances concernant les algorithmes ou les techniques de traitement qu'ils cherchent à utiliser s'ils ne les trouvent pas dans le catalogue même.

Ceci vient rejoindre directement ce que nous disions au sujet du partage de connaissance et du travail collaboratif. Les travaux de cours pourraient être axés sur le sujet même plutôt que

sur les composantes périphériques comme la recherche de données ou l'analyse de documents provenant de recherches théoriques qui expliquent les différents algorithmes qui sont disponibles pour effectuer les analyses requises par différents projets de traitement et d'analyse d'images satellitaires.

Comme nous l'avons mentionné, plusieurs auteurs présentent des analyses et des débuts d'élaboration portant sur certaines des composantes fonctionnelles que des systèmes intégrés de traitement d'images satellitaires devraient comporter. Par contre, après avoir consulté des articles et documents variés dans le cadre des recherches documentaires de ce mémoire, il nous semble que la thèse de (Deng, 2009) s'accorde bien avec la plupart des constatations que nous avons mises de l'avant dans ce texte. Les fonctionnalités incluses dans le logiciel KAOS sont aussi très à propos, mais nous n'avons pu les évaluer avec la version du logiciel qui est disponible en ligne.

Du travail de Deng découlent la conception et l'élaboration de l'interface de travail GeOnAs que nous avons mentionnée à la section 5.4. Ce logiciel inclut un module de recherche d'image ainsi que plusieurs fonctions de manipulation de données et de traitements d'image pertinents pour réaliser des analyses reliées à la télédétection. Il s'agit d'un logiciel qui est en cours de développement et donc qui n'a pas encore toutes les fonctionnalités que nous pourrions vouloir utiliser. Par contre, l'interface de travail, le module de recherche d'image et le support de traitement sont en place ainsi que certaines fonctions de traitement et d'analyse qui peuvent être utilisés pour évaluer le concept général du logiciel.

Nous commencerons par présenter l'outil GeOnAs dans un premier temps, puis nous présenterons le logiciel KAOS par la suite. En ce qui concerne GeOnAs nous avons pu mener quelques tests pour nous familiariser avec la mécanique de fonctionnement de ce système de traitement, ce qui n'est pas le cas avec KAOS. Pour ce dernier nous ne pourrions que présenter les concepts mis de l'avant dans le manuel d'usager du logiciel (ACS, 2010).

La Figure 5.7 présente l'interface de travail GeOnAs telle qu'elle est actuellement disponible. Nous remarquons en explorant l'interface que plusieurs des éléments que nous avons mentionnés dans ce document figurent déjà parmi les fonctionnalités qui sont prévues pour le développement de ce logiciel. Entre autres, il y a des menus qui sont en place pour les fonctions de traitement d'images en format vectoriel et en format matriciel. Cette caractéristique nous permettrait de travailler avec tous les formats d'images que nous avons mentionnés au CHAPITRE 1 et ceci qu'elles soient optiques, RADAR ou même issues d'un logiciel SIG. L'interface de recherche d'image a conséquemment été modifiée pour permettre des recherches d'images en format vectoriel aussi bien qu'en format matriciel.

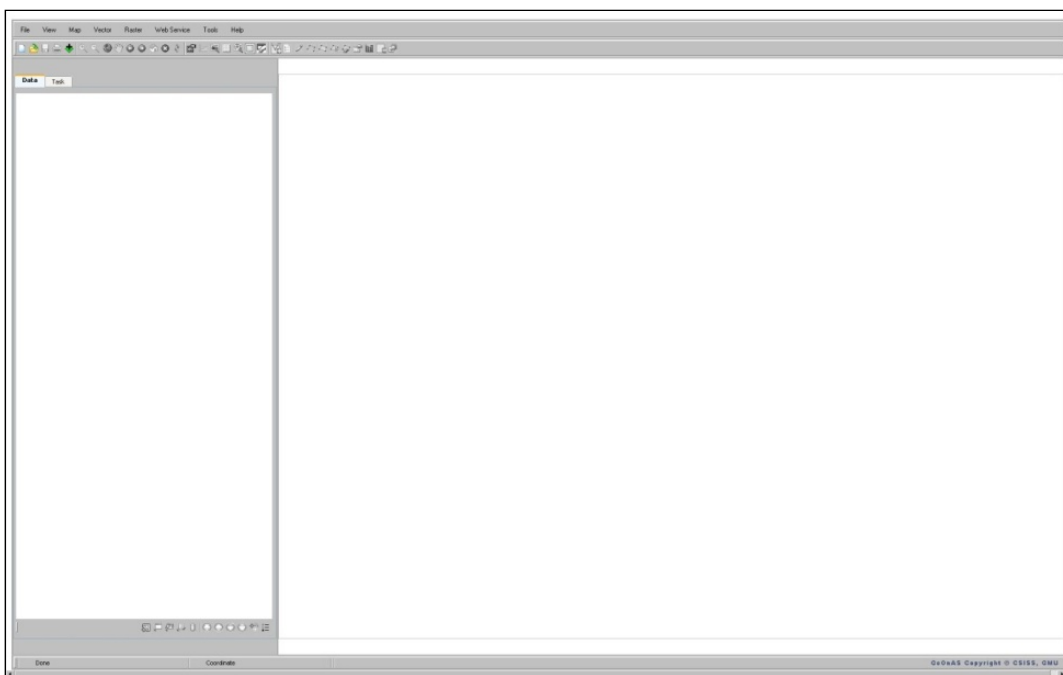


Figure 5.7 Interface de travail GeOnAs

Nous reconnaissons dans cette figure les composantes standards d'une interface logicielle, tel que nous y sommes habitués, avec des menus déroulants pour les listes de fonctions plus considérables et des barres d'outils regroupant les fonctions les plus communément utilisées. Il y a un volet pour la gestion des données importées ou produites par les différents traitements et une fenêtre centrale pour la visualisation des données et des résultats. Ceci est

évidemment directement dérivé de l'optique de développement qui veut que les utilisateurs aient le moins d'efforts à fournir pour s'habituer à l'outil afin qu'ils n'aient qu'à se concentrer sur l'utilisation des fonctions et des différents modules de traitement disponibles. En consultant les différents menus, nous remarquons qu'il y en a un qui est dédié aux services WEB et qui comporte deux types d'actions. L'une est prévue pour l'enregistrement de nouvelles fonctions et l'autre permet l'utilisation de procédures existantes. Sous cette deuxième rubrique, nous trouvons encore deux catégories, une composée de services WEB enregistrés, déjà inclus au logiciel et validés par des pairs, et l'autre pour permettre d'atteindre des procédures non enregistrées, mais compatibles avec le système de traitement. Pour utiliser une procédure externe, il faut donner le chemin d'accès de la fonction dans une interface dédiée afin de permettre au système de la retrouver et de l'exécuter.

Pour enregistrer de nouvelles fonctions, il faut être un utilisateur reconnu du système. Ceci permet de réduire la probabilité que des programmes caducs ne soient ajoutés à la banque de fonctions disponibles. Nous voyons ici que ce que nous avons mentionné au sujet des protocoles d'accès et des droits de mise à jour des bases de données, de métadonnées et d'algorithmes est déjà prévu par l'optique de développement qui est poursuivi dans le cadre du développement du logiciel GeOnAs.

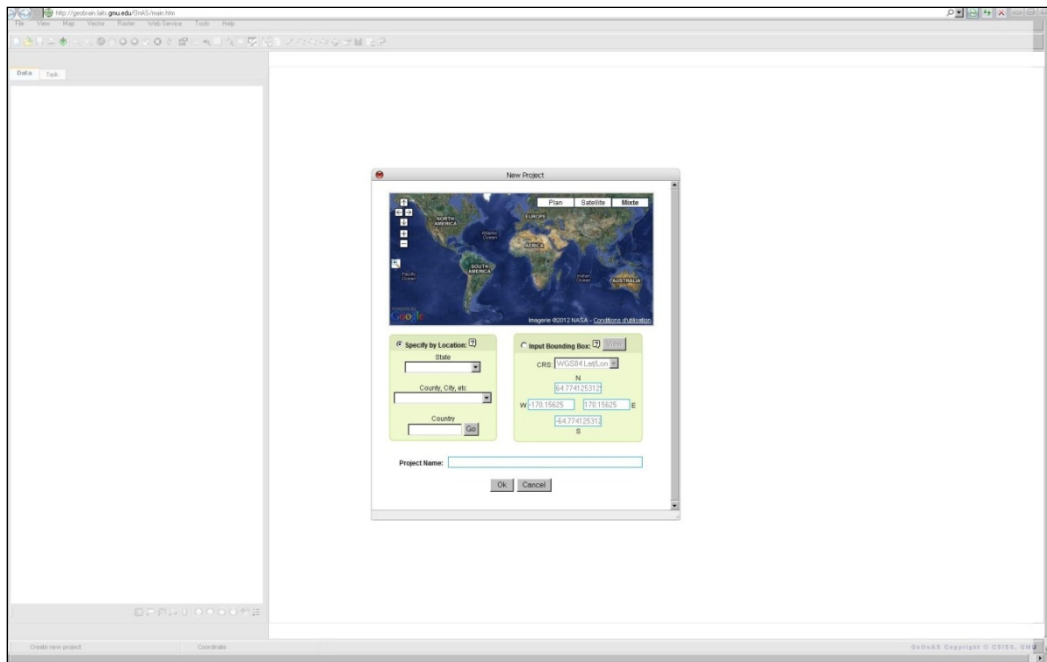


Figure 5.8 Interface de travail GeOnAs avec module de recherche d'image

La Figure 5.8 présente l'interface de recherche d'image telle qu'implantée dans GeOnAs. Nous y retrouvons toutes les fonctionnalités de l'outil de recherche *Geospatial Data Products Download* que nous avons présenté à la section 5.4.1, auxquelles sont ajoutées des fonctions permettant d'effectuer des recherches pour des images en format vectoriel comme celles issues de logiciels SIG par exemple.

La mécanique de fonctionnement de la sélection d'images matricielles est la même que celle présentée à la section précédente, comme nous pouvons le voir à la Figure 5.9. Nous retrouvons la même représentation de l'information qui peut être explorée pour identifier et sélectionner les composantes images qui nous intéressent. Il est à noter que dans cette version d'implantation il n'y a pas de volet de téléchargement, car les composantes images sélectionnées sont importées directement dans le projet au sein de l'interface de travail et conséquemment, n'ont pas besoin d'être téléchargées avant que l'analyse prévue ne soit effectuée puisque que le traitement complet est réalisé à distance sur des serveurs dédiés.

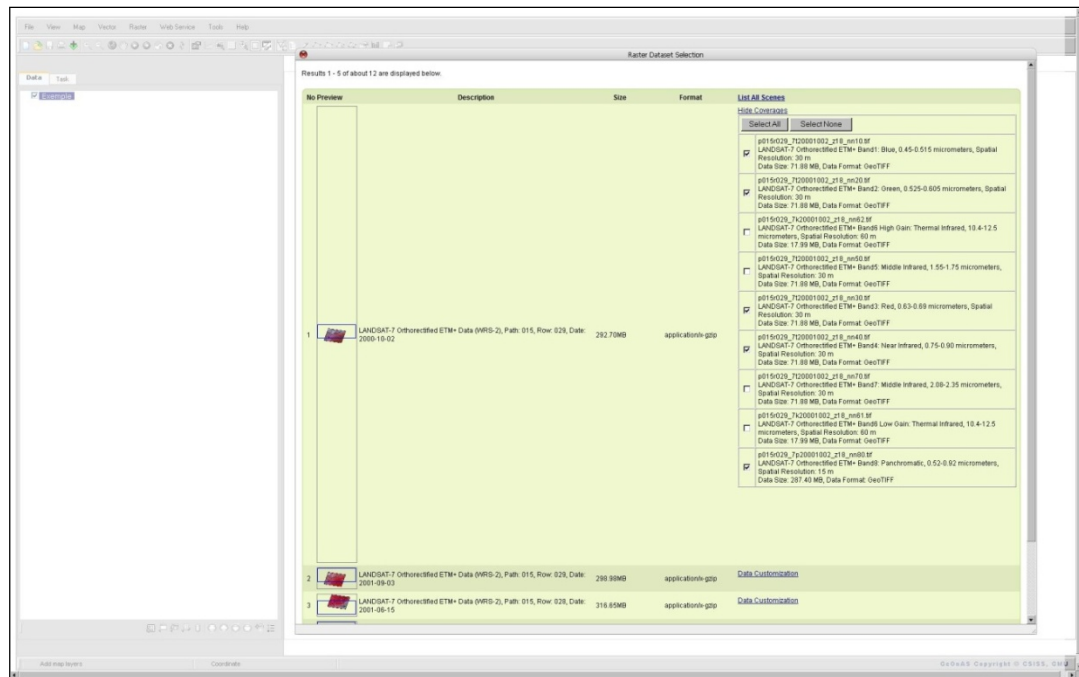


Figure 5.9 Interface de travail GeOnAs avec module de sélection de composantes d'image

Une fois les composantes images sélectionnées et validées, le système les importe directement dans le projet ouvert et nous y donne accès dans le volet d'exploration des données qui se trouve à la gauche de l'interface de travail.

Nous pouvons choisir les bandes que nous voulons afficher en cochant ou en décochant les cases correspondant à chaque bande d'information. Il est important de retenir que les couches d'information sont hiérarchisées et que seule la couche de donnée cochée qui est tout en haut de la liste est visible. Pour les autres bandes ou images incluses au projet, il faut donc décocher celles qui la précèdent si nous voulons pouvoir les visualiser.

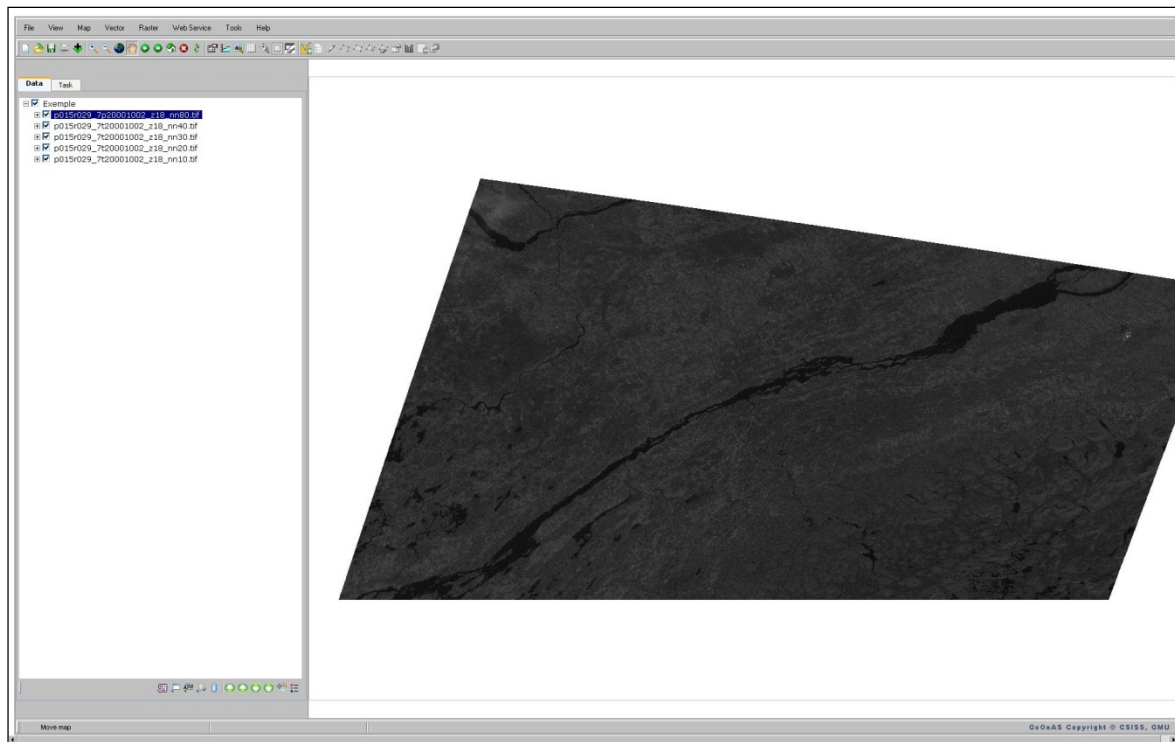


Figure 5.10 Interface de travail GeOnAs avec bandes d'information image

Les fonctions de traitement d'image sont à l'heure actuelle le point faible de ce logiciel. Il n'y a que certaines fonctions qui sont disponibles pour le moment. Par contre, comme nous l'avons mentionné, rien n'empêche l'ajout de nouvelles fonctions au système. Pour ce faire, par contre, il serait probant d'évaluer la possibilité d'utiliser les classes enveloppantes qui ont été développées pour tenter d'ajouter certaines fonctions disponibles dans la bibliothèque OTB, par exemple, au catalogue de fonctions disponibles dans GeOnAs.

Comme le catalogue des fonctions qui ont été développées dans le cadre du projet de développement de la bibliothèque OTB est considérable et déjà bien étoffé, il nous semble logique de chercher à développer un protocole de collaboration entre le groupe de développement d'OTB et le groupe de recherche qui travaille au développement de la plateforme de traitement GeOnAs. S'il était possible de réaliser l'importation des fonctions d'OTB à l'interface de travail de GeOnAs nous pourrions avoir très rapidement accès à un logiciel de traitement très versatile et peuplé d'un catalogue de fonctions étendu qui

permettrait de réaliser la majorité des traitements pertinents à utiliser dans le contexte de l'analyse d'images satellitaires et de la gestion de catastrophe.

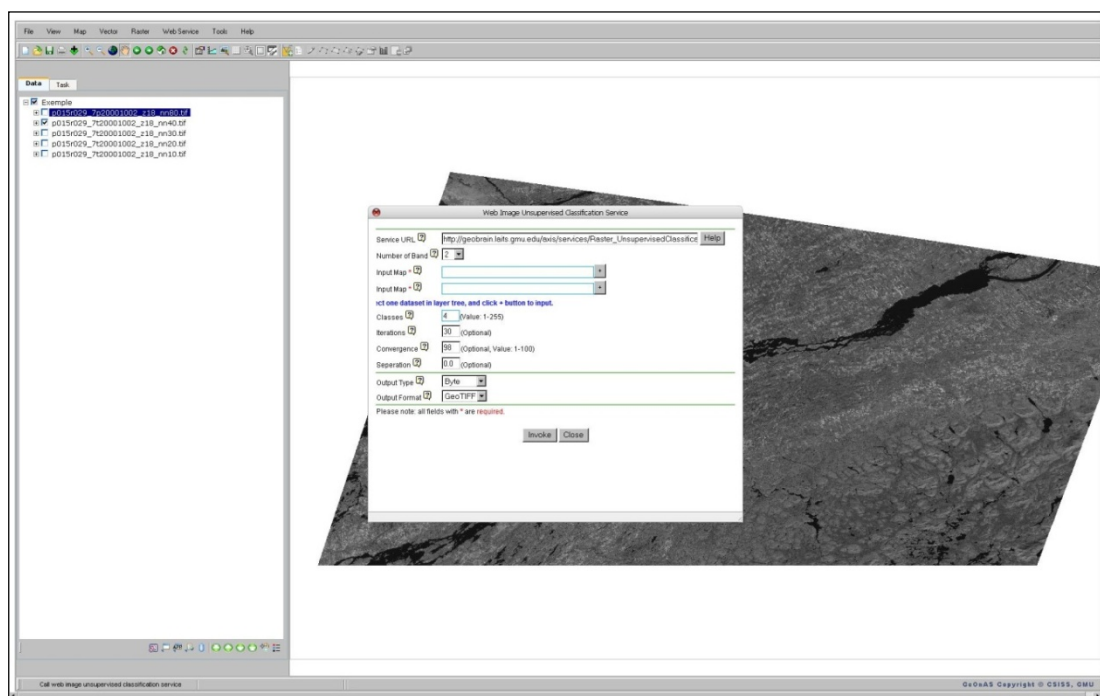


Figure 5.11 Interface de travail GeOnAs avec fonction de classification non supervisée

La Figure 5.11 présente l'interface de configuration rattachée à une des fonctions de classification non supervisée de GeOnAs.

La Figure 5.12 présente le résultat d'une classification non supervisée qui a été réalisée en utilisant les bandes rouge, bleu, verte et proche infrarouge avec comme composante finale l'image panchromatique. Nous avons forcé la classification à 7 classes de sortie sans aucune autre modification aux paramètres par défaut de l'interface.

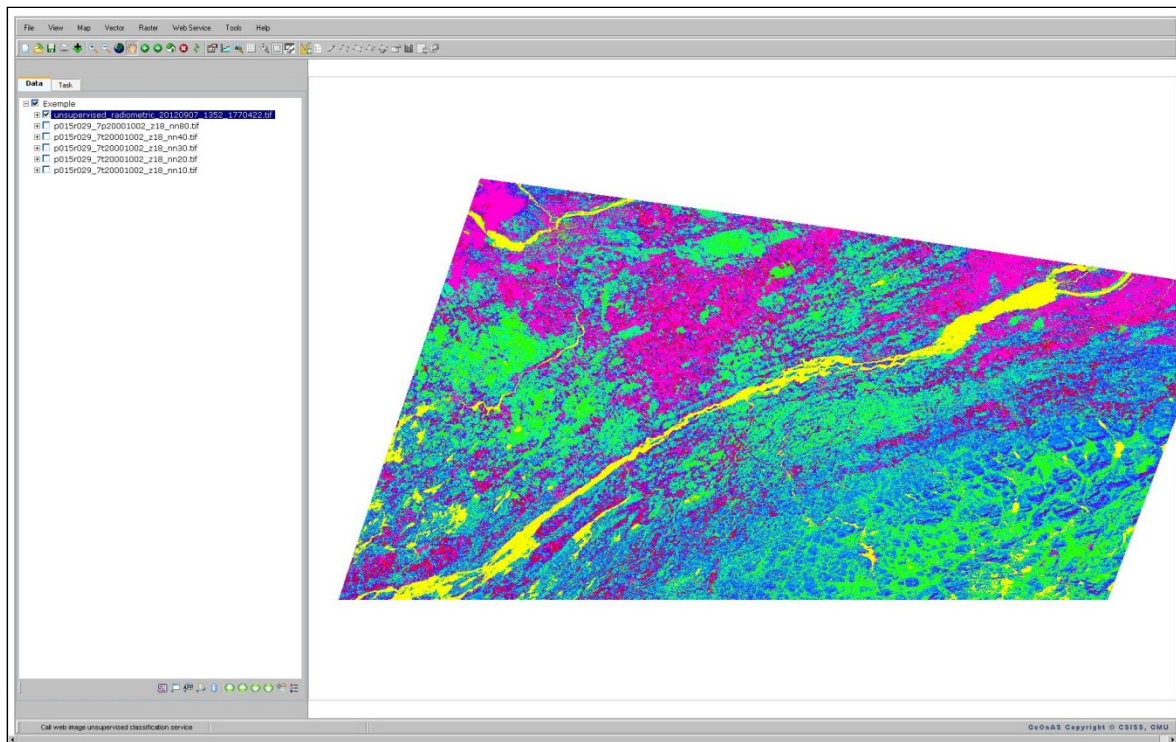


Figure 5.12 Interface de travail GeOnAs avec le résultat de la classification non supervisée

Le choix de l'image, l'importation des données et le traitement pour obtenir le résultat de la Figure 5.12 ont pris moins de dix minutes pour une image de 8885 par 5324 pixels. Ceci inclut une part de tâtonnement relié à l'identification des bandes pertinentes ainsi que la manière d'utiliser l'interface de configuration de la tâche de classification.

Nous considérons que cette interface de traitement présente la majorité des éléments conceptuels que nous avons mentionnés en ce qui concerne l'accessibilité des données et l'intégration de la recherche d'image à la plateforme de traitement. Il faudrait explorer les mécanismes d'indexation d'image et d'accès pour évaluer s'il serait possible de gérer des images à haute et à très haute résolution avec le même outil. Si ceci est réalisable, il serait très important d'entamer des discussions avec d'autres fournisseurs d'images que ceux qui ont déjà contribué au peuplement de la base de données et de tenter de les convaincre de la pertinence d'accorder des accès à certains de leurs catalogues d'images des plus récents satellites et capteurs pour favoriser la diffusion à plus grande échelle des connaissances

requis. Ceci dans le but de travailler efficacement avec des images à haute ou à très haute résolution.

Nous terminons ici au sujet de GeOnAs, en mentionnant que pour le moment il n'y a pas encore de version de cet outil qui soit parfaitement compatible avec les dispositifs mobiles comme les tablettes ou les téléphones intelligents. Ceci sera peut-être développé bientôt, mais nous comprenons que la reprogrammation du système pour en avoir une version adaptée aux outils mobiles n'est pas forcément une priorité du groupe de développement. Par contre, si l'intérêt de la communauté de recherche pour cet outil de traitement devient suffisamment grand, il sera inévitable, avec la croissance de la base d'intervenants, qu'il devienne plus facile d'identifier de nouvelles fonctionnalités d'intérêt général et d'avoir accès aux ressources requises pour les réaliser.

Le système KAOS comporte le même type de fonctionnalités bien qu'elles soient traitées différemment dans plusieurs cas. Ici aussi nous constatons que la majorité des concepts que nous avons soulignés dans ce texte se retrouve sous une forme ou une autre parmi les modules qui composent KAOS. La base conceptuelle du développement de cet outil est de mettre à la disposition des intervenants menant des analyses de l'occupation du territoire, ou de tout autre thème d'intérêt relié à la télédétection ou au traitement d'image, tous les outils dont ils peuvent avoir besoin au sein d'une seule interface de travail. Nous retrouvons, comme nous l'avons mentionné plus tôt, une interface de consultation du catalogue d'images permettant d'effectuer des recherches en fonction de différents critères. Ces derniers peuvent être de nature géographique, thématique, en fonction d'un capteur, d'un type d'image ou encore du contenu sémantique des images, d'une date ou d'une période temporelle bornée ou même en fonction de la disponibilité de STIS. Les résultats des recherches peuvent être soit filtrés à l'aide de différentes combinaisons des critères que nous venons de mentionner ou réalisés dès le départ en tenant compte de critères préétablis.

Cette flexibilité de description associée à un catalogue d'images et à ses mécanismes de consultation et d'exploration est un atout prépondérant dans un contexte de gestion de

catastrophe, car ceci nous permettrait de mener des recherches étendues d'images disponibles non seulement en fonction des coordonnées géographiques des zones affectées par une catastrophe majeure, mais aussi en fonction d'un thème d'intérêt et/ou d'un contexte d'analyse spécifique en plus de récupérer des exemples de traitements du même type. Ceci pourrait dans bien des situations nous permettre d'explorer des combinaisons de techniques et d'images qui soient propices à atteindre un niveau de performance élevée rapidement et de ce fait d'arriver à créer les produits cartographiques dérivés requis efficacement avec le niveau de la qualité requise pour une situation donnée en un minimum de temps.

La Figure 5.13 présente l'interface de travail du logiciel KAOS tel qu'elle est actuellement configurée. Nous retrouvons ici, tout comme avec GeOnAs, les composantes usuelles d'une interface logicielle avec des menus déroulants et des barres d'outils pour lancer les fonctions les plus utilisées. Nous voyons ici aussi un souci en ce qui concerne la convivialité de l'interface ainsi que l'utilisation de concepts de configuration connus, ce qui permet de minimiser le tâtonnement relié à l'apprentissage de l'interface.

La mécanique de consultation et d'indexation du contenu que nous avons mentionnée au sujet des images et de leur contenu sémantique est aussi utilisée à plusieurs autres fins par les développeurs de ce logiciel. Comme ce système est voué à une utilisation plus générale que ne l'est GeOnAs, KAOS est conçu de manière à permettre de travailler sur un nombre de thèmes issus des différentes disciplines mises en cause par l'analyse d'images satellitaires. Les développeurs ont prévu d'étendre les outils d'annotation et d'indexation à l'étiquetage des fonctions, des outils d'analyse et des séquences de traitement pour permettre de les explorer efficacement en fonction de différents critères de recherche.

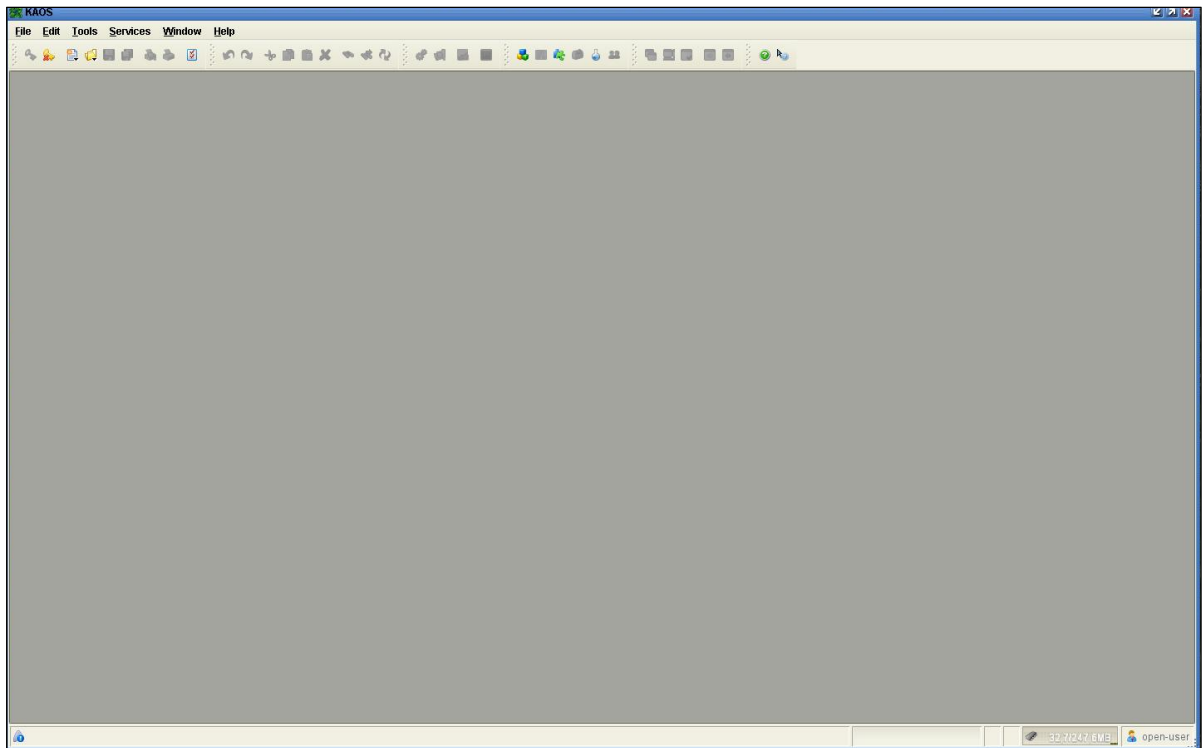


Figure 5.13 Interface de travail du logiciel KAOS

Tiré de ACS, Advanced Computer Systems. 2010. *KAOS User's Manual 2.2.0*. Software Guide (ACS, 2010)

Nous comprenons, suite à ce que nous avons souligné dans ce document, que la combinaison de ces mécanismes d'indexation et de recherche de contenu est tout à fait à propos lorsque nous parlons de simplifier la tâche de l'intervenant qui mène l'analyse d'images satellitaires en mettant les outils requis pour explorer autant les images de références et leur contenu sémantique que les techniques de traitement et d'analyse à leur disposition. Et de plus, comme la mécanique de consultation est similaire pour les deux types d'information nous comprenons que la courbe d'apprentissage liée à leur utilisation est réduite augmentant de la sorte l'efficacité d'utilisation du système dans son ensemble.

Comme nous pouvons le voir sur les Figure 5.14 et 5.15, les outils de configuration des critères de recherche que nous venons de souligner font partie des interfaces de consultation de contenu comme le module « *Image Browser* » qui est l'interface principale de consultation

du catalogue d’images de KAOS. Nous mettons deux vues de cette interface ici pour nous permettre de présenter différentes configurations des outils de recherche et d’indexation qui font partie de ce module.

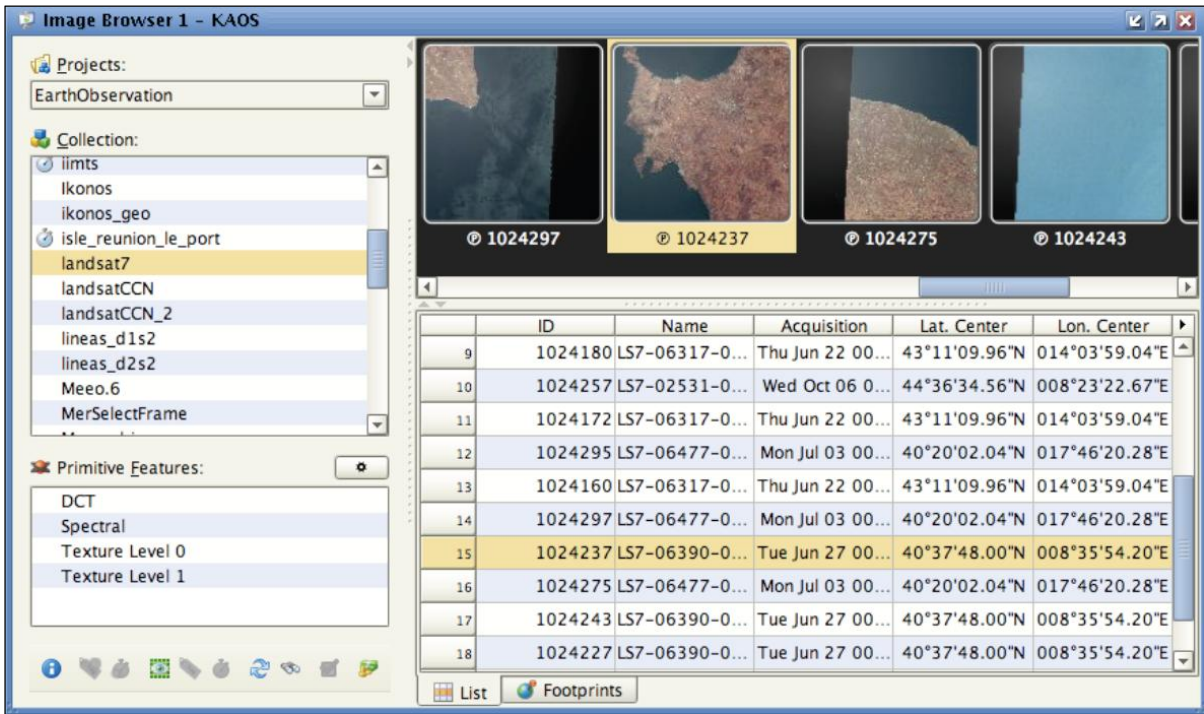


Figure 5.14 Image Browser en format liste de KAOS

Tiré de ACS, Advanced Computer Systems. 2010. *KAOS User's Manual 2.2.0*. Software Guide (ACS, 2010)

Sous cette configuration nous avons une liste des images disponibles issues du satellite LANDSAT-7 faisant partie du projet « *EarthObservation* » ainsi qu’un aperçu de leurs métadonnées. Nous remarquons que les descripteurs primitifs, les variables donc, sont un autre des éléments qui figurent dans cette interface. Ils peuvent aussi être utilisés comme base pour effectuer des recherches dans les catalogues d’images. Nous tenons à souligner que les deux éléments de la liste des collections disponibles qui sont précédées d’un chronomètre sont des collections d’images de type STIS.

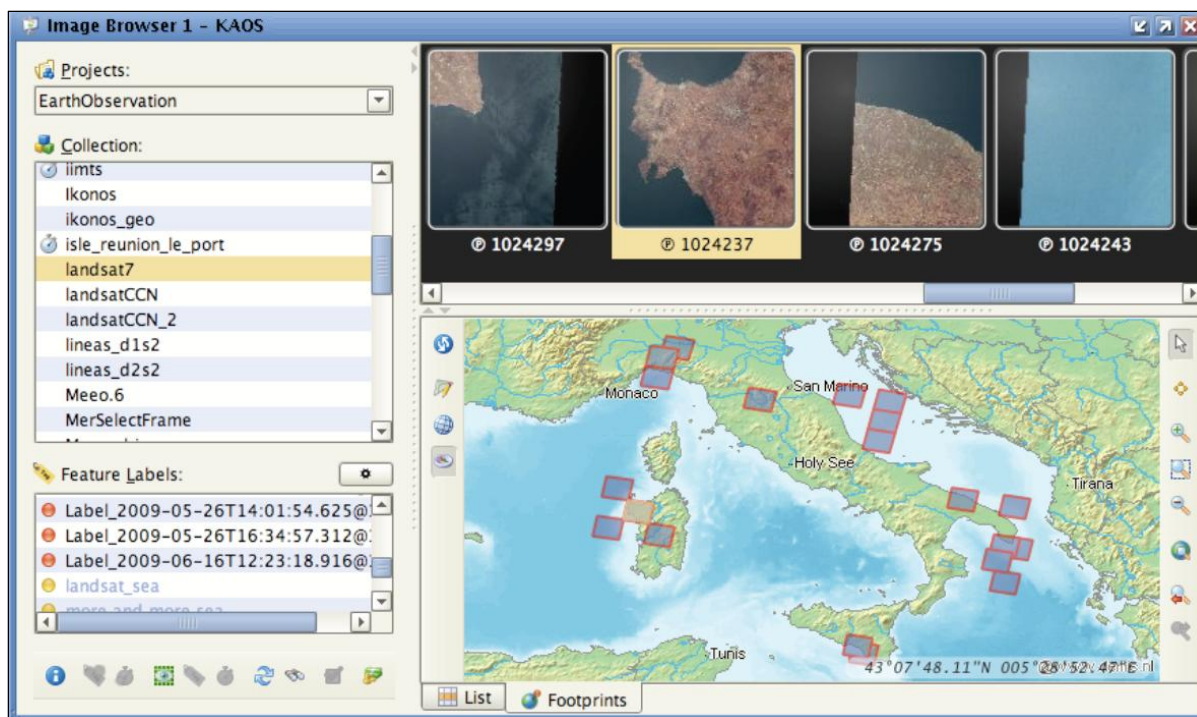


Figure 5.15 Image Browser en format empreinte au sol de KAOS

Tiré de ACS, Advanced Computer Systems. 2010. *KAOS User's Manual 2.2.0*. Software Guide (ACS, 2010)

À la Figure 5.15 nous avons une autre configuration de l'explorateur d'images pour le même projet et pour les mêmes images qu'à la figure 5.14. Nous remarquons que le mode liste y a été remplacé par un explorateur d'empreintes au sol qui nous permet de voir les régions pour lesquelles il y a des images LANDSAT- 7 qui sont disponibles. Nous voyons aussi que la portion de l'interface qui servait à explorer les descripteurs à la Figure 5.14 a été remplacée ici par un explorateur d'étiquetage. La combinaison de ces différents modes d'exploration des bases de données images nous semble être idéale pour permettre aux analystes qui mènent les analyses dans un contexte de gestion de catastrophe de gérer les différents scénarios de combinaison d'images pouvant se présenter dans un contexte réel de gestion de catastrophe efficacement.

En offrant aux utilisateurs la possibilité d'effectuer des recherches en fonction de tous les critères que nous venons de souligner autant dans les bases de données d'images que dans les

répertoires de fonctions de traitement nous leur donnons en quelque sorte la capacité de réaliser dans une certaine mesure ce que nous avons souligné à plusieurs reprises dans ce document au sujet de l'exploration de connaissances. Par contre, nous tenons à souligner que dans KAOS les étiquettes qui sont utilisées dépendent de l'utilisateur et conséquemment, il peut y avoir des situations pour lesquelles deux utilisateurs n'utilisent pas exactement la même codification pour le même phénomène. Ceci pourrait entraîner certaines ambiguïtés descriptives qui risqueraient de fausser certaines recherches de contenu. Cette possibilité pourrait tout de même être minimisée en établissant des nomenclatures standardisées et en les mettant à la disposition des utilisateurs à l'aide de menus dédiés à l'étiquetage.

L'étiquetage du contenu des images est créé et géré à partir d'une interface dédiée qui permet de créer des étiquettes conceptuelles et de leur associer des modèles de classification. Pour ce faire, un utilisateur a recours à l'interface « *Feature Label Designer* » qui est un des nombreux modules de KAOS. La Figure 5.16 présente cette interface. Cet outil permet aux utilisateurs de voir simultanément l'image source et le résultat de la classification qui y est développée. Nous voyons sur l'image de gauche, l'image source, les points d'apprentissage qui ont été utilisés. En vert nous avons les exemples positifs et en violet les contre-exemples. Sur l'image de droite, nous voyons en rouge les portions de l'image qui correspondent au modèle de classification développé à l'aide des échantillons fournis au système. La bordure bleue est associée aux pixels pour lesquels la ou les caractéristiques descriptives n'ont pu être calculées à cause des effets de bord reliés au calcul de descripteurs reposant sur des fenêtres d'échantillonnage bornées.

Nous comprenons qu'il s'agit d'un système de classification qui utilise le concept « Ceci est ce que je cherche, le reste ne m'importe peu » que nous avons mentionné à plusieurs reprises. Il n'est pas clair dans la documentation de KAOS s'il est possible de créer des modèles taxonomiques plus complexes que ce type de classification binaire. Il se peut qu'en utilisant de nombreuses itérations de classification de la même image qu'il soit possible d'effectuer la ventilation complète de l'usage du territoire pour une image qui serait par la suite disponible

en tant que couches de classification un peu à la manière des bandes d'information composant une image.

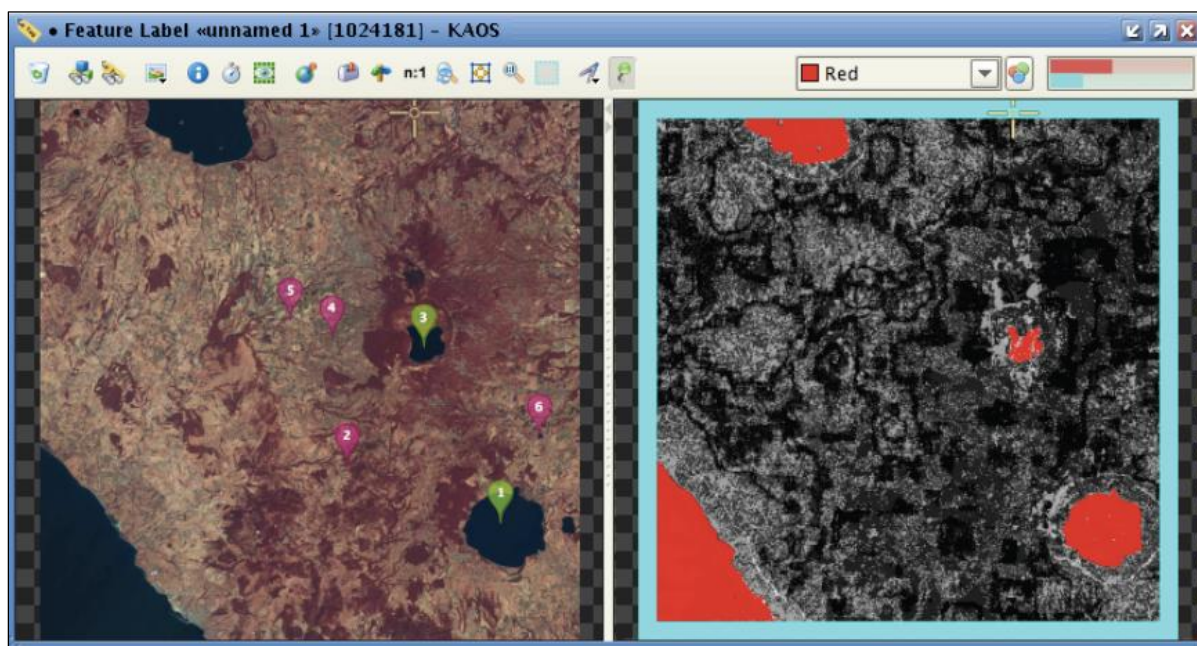


Figure 5.16 Image Browser en format empreinte au sol de KAOS

Tiré de ACS, Advanced Computer Systems. 2010. *KAOS User's Manual 2.2.0*. Software Guide (ACS, 2010)

Le même mécanisme de classification peut être utilisé avec les STIS moyennant une exécution itérative de la classification sur toutes les images de la série si le modèle développé à l'aide de la première ne permet pas d'atteindre la même classification pour les autres images de la série. Par contre, si le modèle est généralisable pour une STIS, toutes les images d'une série peuvent être traitées à l'aide du modèle développé et le résultat peut être utilisé pour modéliser le comportement et /ou l'évolution temporelle de certains phénomènes.

Nous pouvons penser à la crue des cours d'eau par exemple qui est un phénomène qui se reproduit annuellement avec certaines variations en fonction des conditions climatiques. Dans ce cas de figure, l'utilisation d'une classification binaire d'une STIS nous permettrait d'évaluer la « normalité » de la crue pour une année en analysant son étendue en fonction de

celles de toutes les années incluses dans la STIS. De cette manière, si la surface couverte par la crue d'une année donnée dépasse la surface combinée de toutes celles qui composent la STIS, nous pourrions conclure que la crue de l'année en considération est inhabituelle. Il faut retenir que ceci serait plus concluant pour des STIS composées de nombreuses images s'échelonnant sur de nombreuses années en raison de la modélisation des phénomènes saisonniers qui présentent des caractéristiques d'évolution cyclique à long déploiement.

KAOS comporte plusieurs modules qui sont reliés à l'utilisation de STIS. Entre autres, un utilisateur peut afficher une classe d'occupation du territoire isolée dans toutes les images d'une STIS simultanément comme nous pouvons le voir à la Figure 5.17. Cela permet, en fonction de l'angle d'observation de la pile et des couleurs utilisées, de voir l'étendue d'un phénomène.

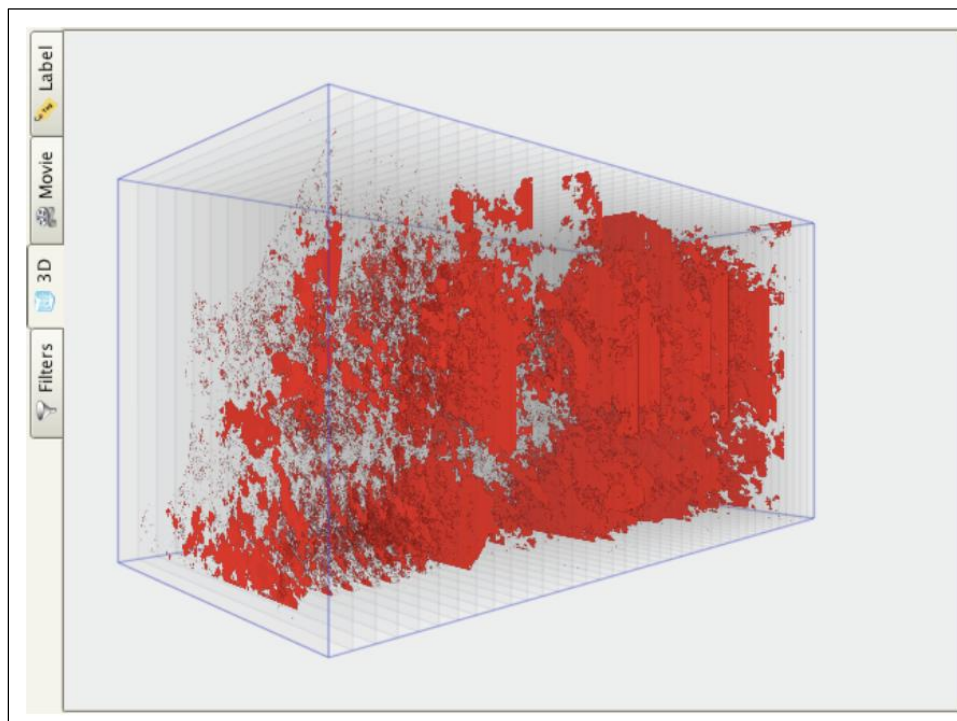


Figure 5.17 Affichage d'une classe extraite d'une STIS en fonction du temps

Tiré de ACS, Advanced Computer Systems. 2010. *KAOS User's Manual 2.2.0*. Software Guide (ACS, 2010)

En reprenant l'exemple de la crue d'un cours d'eau, nous comprenons que cette représentation nous permettrait d'évaluer immédiatement la « normalité » de la surface couverte par la crue d'une année en l'affichant à l'aide d'une couleur différente de celles des autres tranches de la STIS. Sous cette configuration, avec un affichage du type de celui de la Figure 5.17, nous comprenons que si nous observons la pile d'images superposées que la couleur de l'année en cour d'analyse sera soit visible dans le cas où la surface couverte par la crue déborde de celles des autres années représentées ou ne le sera pas si cette même surface suit la tendance pour cette région.

Nous pouvons aisément trouver de nombreux exemples de ce type qui pourraient être traités essentiellement de la même manière à l'aide de cette représentation. Un autre outil, qui est relié à l'affichage et la visualisation des images que l'on peut utiliser avec KAOS, est la composition de vidéos à partir d'une sélection d'images. Nous comprenons que les STIS sont particulièrement bien adaptées à ce type de représentation, mais cette fonctionnalité peut être pertinente pour visualiser d'autres séries d'images qui peuvent être constituées d'images de même type et résolution, mais provenant de capteurs différents.

En fait, ce mode de visualisation nous permet de configurer et d'exécuter automatiquement une technique qui est d'usage courant en analyse d'images satellitaires, le visionnement cyclique d'images. Le concept sur lequel repose cette méthode est que si nous observons une séquence d'images affichées une à la fois et l'une à la suite de l'autre, qu'il est possible d'observer et de suivre l'évolution de différents phénomènes pour une région donnée en fonction du temps. Typiquement le nombre d'images utilisées est limité à quelques images au plus. Le fait de pouvoir créer des séquences mettant en œuvre une grande quantité d'images, comme c'est le cas avec des STIS par exemple, et de contrôler leur défilement avec des paramètres simples comme la fréquence de rafraichissement et d'affichage des images, nous permet de suivre l'évolution de différents phénomènes à des échelles temporelles bien plus considérables. Alors, nous pouvons donc suivre l'évolution de ces phénomènes et observer l'aspect cyclique que peuvent avoir certains phénomènes comme la crue d'un cours d'eau par exemple.

Comme nous le constatons, le concept de fonctionnement de KAOS est différent de celui de GeOnAs. La différence principale entre les deux est que KAOS met en jeu un grand nombre de composantes différentes qui remplissent chacune une ou plusieurs fonctionnalités qui peuvent être invoquées séparément pour réaliser des actions simples, ou en tant qu'une séquence d'opérations complexes permettant de réaliser une séquence de traitement complète.

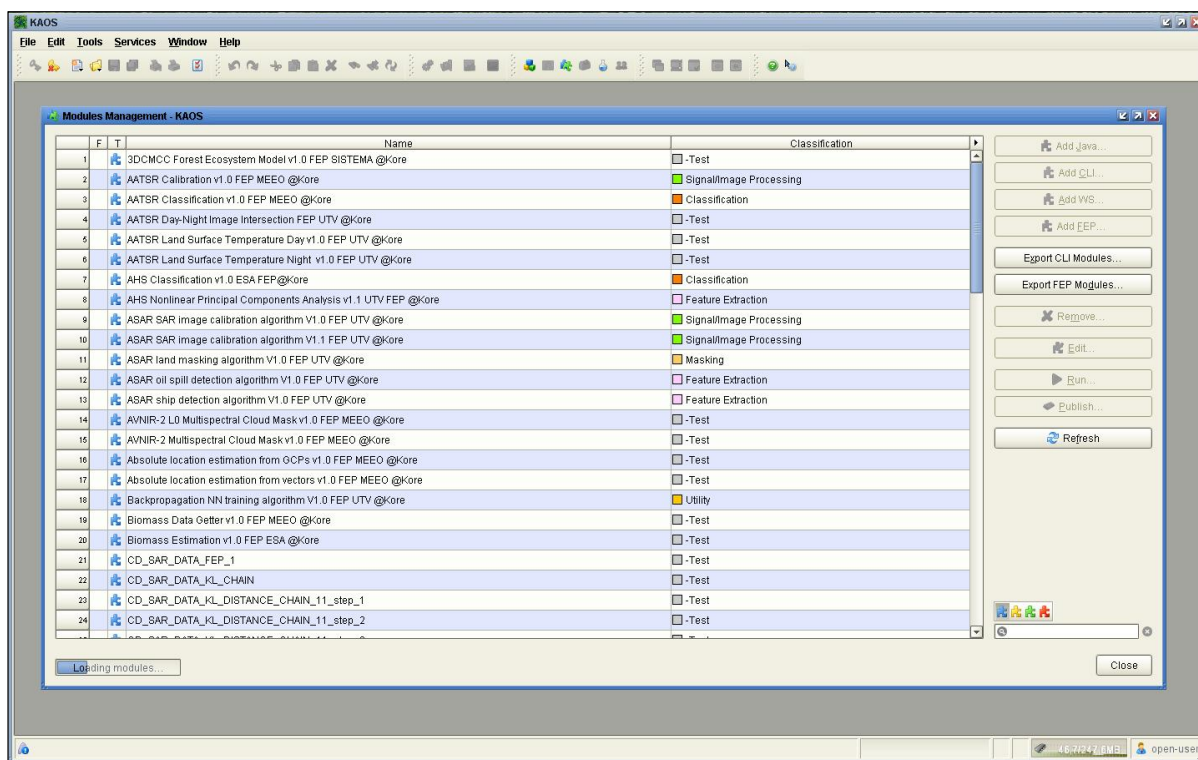


Figure 5.18 Modules Manager de KAOS

Tiré de ACS, Advanced Computer Systems. 2010. *KAOS User's Manual 2.2.0*. Software Guide (ACS, 2010)

Qu'il s'agisse de créer des programmes exécutables classiques appelés à partir d'une console, *Command Line Interface* (CLI), des modules d'extraction de caractéristiques, appelés *Feature Extraction Processors* (FEP), ou encore des services WEB avec l'interface de gestion de module, le *Module Manager* de KAOS, qui est présenté à la Figure 5.18, ou encore de la création et de la gestion des collections d'images avec le *Collection Manager*,

cette vision modulaire permet de mettre toute une série de fonctionnalités en cascade d'une manière efficace et interopérable.

Nous pouvons voir sur la Figure 5.18 ce que nous mentionnions plus tôt en ce qui concerne l'étiquetage des fonctions par concept et/ou domaine d'application. À la droite de la liste des noms des modules disponibles pour une catégorie de type de traitements, ici il s'agit de modules FEP, nous apercevons les codes de classification des modules en fonction de leur domaine et/ou de leur utilité. Ces codes de classification peuvent être utilisés pour filtrer les modules en fonction de différents critères comme c'est le cas pour l'exploration des catalogues d'images avec l'*Image Browser* ou des étiquettes créées à l'aide du *Feature Label Designer*.

Plusieurs autres composantes forment l'ensemble des fonctionnalités de KAOS mais nous reviendrons sur certains de ces autres modules un peu plus loin dans ce chapitre.

5.4.3 La réutilisabilité des modèles de traitement et de classification

Il nous reste à traiter de la réutilisabilité des modèles de classification et des chaînes de traitement qui peuvent être utilisées pour résoudre différents cas d'analyse d'images satellitaires. Nous espérons que la pertinence d'utiliser un mécanisme permettant d'encoder les séquences d'opérations que les chercheurs et autres acteurs du domaine de la télédétection ont développé a bien été mise de l'avant dans ce texte.

Nous tenons à souligner que la même mécanique de consultation de celle qui sera développée pour traiter l'indexation des images, de leurs métadonnées, ainsi que le catalogue de connaissances d'algorithmes et de techniques de traitement, pourrait être étendue pour inclure les séquences de traitement développées et leurs scénarios d'utilisation pertinents. Il ne s'agit en fait que d'un cas spécial de ce qui sera mis dans le catalogue de connaissances et qui sera affecté d'un pointeur vers une fonction de traitement d'un type différent. En soi, nous ne voyons pas comment le traitement de ces éléments pourrait avoir à différer de

l'ensemble du système. De plus, ceci minimiserait la courbe d'apprentissage tout en ayant accès à ces modèles de la même manière que pour tous les autres éléments d'intérêt que nous avons mentionnés.

Un des éléments les plus importants qui découlerait, selon nous, du développement d'une méthode de représentation unifiée de l'information contenue dans les images satellitaires traitées, de leurs métadonnées et des connaissances pertinentes incluses dans un catalogue, serait la réutilisabilité des modèles descriptifs et de classification développés.

Sans qu'il soit toujours possible d'utiliser ces derniers directement, pour cause de variation des conditions d'acquisition de deux images du même capteur par exemple, il en demeurerait tout de même que la « recette » utilisée pour atteindre un certain niveau de classification et de performance serait disponible pour consultation. Ceci permettrait de reproduire la logique d'analyse utilisée et, de par ce fait, d'accélérer le traitement d'autres images du même type. Pour poursuivre avec l'analogie culinaire, les ingrédients demeureraient les mêmes ainsi que les méthodes de cuisson. Il ne resterait qu'à ajuster les quantités et les temps de cuisson en fonction des différences établies à l'aide de l'analyse des métadonnées reliées aux différentes images.

Nous ne parlons pas ici de fonctions programmées au sens propre, comme la procédure de classification non supervisée de GeOnAs que nous avons présentée ou de l'un ou l'autre des modules fonctionnels de KAOS comme un FEP par exemple, mais plutôt de l'enchaînement de plusieurs fonctions ou modules de base pour réaliser un traitement spécifique plus complexe. Ce traitement est donc formé de nombreuses composantes qui sont exécutées les unes après les autres, ou même simultanément dans certaines situations, pour effectuer une analyse complète. Une fois réalisées et évaluées, en fonction d'un niveau de performance désiré ou d'autres critères judicieux, ces séquences de fonctions pourraient être ajoutées au système et au catalogue dans le but de permettre leur réutilisation ultérieure dans des contextes de traitement similaires au même titre que les fonctions de traitement de base.

Ces séquences sont cependant fondamentalement différentes des fonctions de base qui sont disponibles, soit dans GeOnAs ou KAOS, pour réaliser l'une ou l'autre des composantes de la chaîne de traitement de par le fait qu'elles doivent être programmées en utilisant ces fonctions de bases et être conçues de manière à gérer le flux de données, et ce, du point d'entrée de l'exécution jusqu'à l'obtention du produit de traitement final quel qu'il soit.

En programmation procédurale la méthode classique utilisée pour réaliser ceci est d'enchaîner le code des fonctions pertinentes par appels successifs dans un programme principal, qui est par la suite compilé pour créer le nouveau programme exécutable qui réalise la chaîne de traitement complète. Cette méthode de développement est ce qui est requis pour utiliser la bibliothèque de fonctions OTB sans passer par une interface de travail intégrée comme KAOS. Le développeur doit donc écrire du code pour être en mesure de réaliser de nouvelles fonctionnalités qui utilisent des sous-fonctions déjà développées. Cette technique est valide et très usuelle dans un contexte de programmation. Par contre, comme nous l'avons souligné plus tôt, cette optique de réalisation présuppose que l'utilisateur a des connaissances assez avancées en programmation ce qui n'est pas forcément vrai de tous les intervenants généralistes qui mènent les analyses dans le contexte de la télédétection.

La vision que poursuit le groupe de développement du logiciel GeOnAs est différente et repose sur l'utilisation de services WEB précompilés plutôt que sur des fonctions développées puis appelées dans un programme enveloppant. À l'heure actuelle, les outils requis pour le chaînage de fonctions sous GeOnAs ne sont pas encore complètement implantés. De plus, pour le moment, l'interface de travail permettant le chaînage de services WEB est en ligne, mais elle est non peuplée. Par contre, le développement du système est prévu pour tirer profit des protocoles *Business Process Execution Language* (BPEL)³⁶ et *Web Service Definition Language* (WSDL)³⁷ afin de permettre de créer des applications constituées de services WEB chaînés. Comme le module de chaînage n'est pas encore complètement implanté, nous ne pouvons nous prononcer au sujet de ce paradigme de

³⁶ <http://fr.wikipedia.org/wiki/BPEL>, consulté le 25 octobre 2012.

³⁷ <http://fr.wikipedia.org/wiki/WSDL>, consulté le 25 octobre 2012.

développement. Le lecteur intéressé par ce thème peut consulter la thèse de (Deng, 2009) où nous retrouvons beaucoup d'informations sur la vision de chainage qui y est mise de l'avant.

Comme nous l'avons souligné à la section précédente, le logiciel KAOS permet de créer des séquences de traitement complexes directement à partir de l'interface de travail. Le concept de base est similaire à ce qui est utilisé par le système GeOnAs et repose sur l'utilisation de composantes modulaires préprogrammées qui peuvent être utilisées pour créer des programmes plus complexes en encapsulant plusieurs sous-fonctions en soi des CLI, des FEP, des services WEB ou des programmes JAVA. Ces composantes de base sont les blocs qui sont utilisés pour créer d'autres modules. La mécanique de réalisation de ces programmes demeure tout de même près de la programmation procédurale classique. En soi, nous pouvons considérer cette facette de la méthode de fonctionnement de KAOS comme un hybride de programmation procédurale et de programmation basée sur des composantes précompilées comme c'est le cas avec GeOnAs ou un logiciel comme MATLAB par exemple.

Nous pensons, par contre, que pour simplifier la tâche de développement de séquences de traitement complexes, il conviendrait d'utiliser une interface de configuration graphique des séquences de traitement permettant de créer des chainages de fonctions précompilées. Cette approche de modélisation des chaines de traitement est utilisée par plusieurs logiciels et permet d'offrir aux utilisateurs une simplicité de configuration et de modification des séquences développées qu'il est difficile de surpasser. Nous ne donnerons que quelques exemples de cette technique de travail qui est bien représentée par l'interface de la programmation visuelle SIMULINK du logiciel MATLAB entre autres.

5.4.4 La programmation graphique des modèles de traitement et de classification

Plusieurs différents logiciels visant à mettre ce type de fonctionnalité à la disposition d'intervenants traitants d'images sont déjà disponibles. Nous pouvons penser, entre autres, à

l'interface Ariane³⁸ qui est le module de programmation visuelle de la bibliothèque de fonctions de traitement d'image Pandore³⁹. Ce logiciel utilise plusieurs concepts et représentations similaires à ceux qui sont à la base de SIMULINK ainsi que de nombreux autres logiciels offrant le même type de mécanismes de modélisation. Nous ne nous attarderons donc pas à présenter ce logiciel Ariane dans ce document et procéderons plutôt à la présentation de SIMULINK et de quelques autres exemples de ce paradigme de développement.

Il convient cependant de souligner que pour utiliser Pandore et Ariane il est nécessaire de gérer les versions afin d'avoir à notre disposition la dernière version du code source pour réaliser la compilation et l'installation du logiciel. Ceci est un point qui nous semble moins intéressant et qui entraîne une certaine mesure de veille des versions du logiciel que nous pensons souhaitable d'éviter. De plus, ce logiciel doit être compilé en fonction du système d'exploitation du poste sur lequel nous voulons les installer qui, comme nous l'avons mentionné, ne nous semble pas être idéal.

Le module SIMULINK utilise une structure de représentation des fonctions et de la séquence de traitement qui est utilisée par plusieurs logiciels permettant l'utilisation d'interface de programmation graphique. Les composantes usuelles qui sont utilisées sont les blocs, des objets graphiques, qui sont composés d'une certaine séquence d'actions qui se déroulent entre l'entrée des données et la sortie des résultats. Les blocs peuvent être composés d'autres blocs, de fonctions précompilées de base qui sont disponibles, ou d'un code propriétaire développé séparément et intégré à un bloc de traitement après compilation du code.

Pour réaliser un « programme » entier, il ne faut donc qu'ajouter à la fenêtre de travail les composantes de traitement requises qui sont représentées par les blocs et lier les entrées et sorties appropriées des blocs en fonction de la séquence de traitement à réaliser. Une fois l'ensemble configuré, il ne reste qu'à l'exécuter, car comme les fonctions utilisées pour créer

³⁸ <http://www.greyc.ensicaen.fr/~regis/Ariane/>, consulté le 25 octobre 2012.

³⁹ <http://www.greyc.ensicaen.fr/~regis/Pandore/index.html>, consulté le 25 octobre 2012.

les blocs sont précompilés il n'est pas nécessaire de procéder à la compilation du code pour que ce dernier puisse être exécuté.

Cette mécanique de fonctionnement comporte un autre élément qui est selon nous très propice à permettre une utilisation efficace des séquences de traitement disponibles. Il s'agit de la configuration des paramètres d'exécution des blocs fonctions. Sous SIMULINK et plusieurs autres logiciels permettant une modélisation des séquences de traitement de ce type, la configuration des paramètres, qu'il s'agisse de paramètres fonctionnels reliés aux algorithmes ou encore des entrées et sorties du flux de données, se fait en cliquant sur le bloc et en remplissant les champs prévus à cet effet. Nous pouvons donc réaliser toute la configuration d'une séquence de traitement directement à partir de l'interface de travail. Ceci nous permet de recharger un modèle qui a déjà été développé pour résoudre un problème donné et de reconfigurer les paramètres pour permettre de traiter un cas différent qui peut profiter du même traitement général moyennant quelques ajustements.

La Figure 5.19 est un exemple de ce qu'une séquence de traitement développée avec le module SIMULINK du logiciel MATLAB est, ainsi que certaines des composantes que nous venons de mentionner. Nous retrouvons dans cette figure le volet de sélection des blocs fonction qui se trouve à gauche. Ce volet est constitué de différentes catégories de fonctions regroupées par domaine d'application. Nous avons aussi une interface de configuration de l'un des blocs de la chaîne qui est au centre de l'image à droite du volet d'exploration de fonction. Au coin supérieur droit, nous voyons la séquence de traitement constituée des différents blocs réalisant le traitement relié les uns aux autres pour établir l'ordre d'exécution du traitement et l'acheminement du flux de données. Finalement au bas de l'image nous retrouvons deux fenêtres de visualisation qui permettent de voir les résultats du traitement à différents points de la chaîne de traitement.

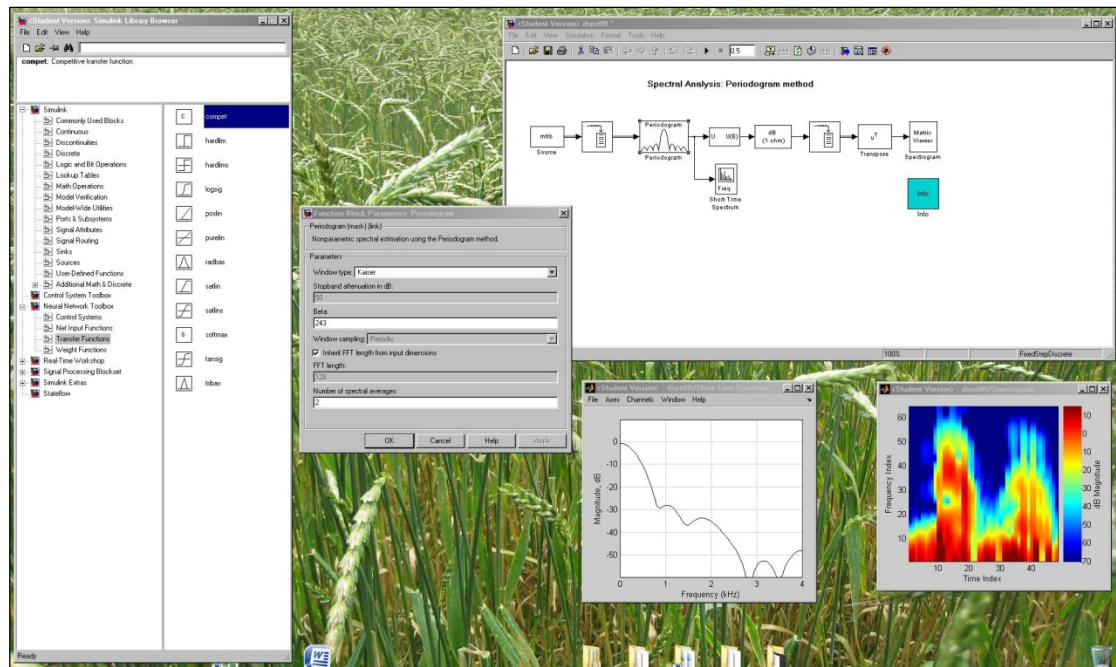


Figure 5.19 Exemple de séquence d'actions modélisée avec SIMULINK sous MATLAB

Nous voyons sur cette figure une des configurations possibles d'un logiciel de programmation graphique. Ici nous avons plusieurs fenêtres qui sont ouvertes au fur et à mesure que nous en avons besoin pour afficher différentes informations. D'autres logiciels de traitement de ce type proposent plutôt une interface unifiée, comme celle de GeOnAS, composée de différents champs et fenêtres qui sont conçus en fonction des tâches qui seront exécutées avec le logiciel. Parmi ces derniers, nous retrouvons l'outil Ariane qui est l'interface de configuration, d'enchaînement et d'exécution de la bibliothèque de fonctions de traitement d'image Pandore que nous avons mentionnée précédemment.

Nous présenterons ici un produit logiciel commercial qui relève du domaine du traitement d'image, mais qui est adapté aux besoins du monde du cinéma. La raison derrière ce choix de présenter un outil qui provient d'un autre domaine d'application est de souligner que le concept de programmation de séquences réutilisables à l'aide d'interfaces graphiques n'est pas seulement d'intérêt dans notre contexte d'analyse, mais aussi dans d'autres domaines tout aussi exigeants du point de vue de la complexité des traitements, de l'efficacité de la réalisation et de l'utilisation de l'outil dans son ensemble.

Le logiciel en question s'appelle NUKE. C'est un logiciel de traitement d'image spécifiquement adapté aux besoins de l'industrie du cinéma qui est développé par la compagnie THE FOUNDRY⁴⁰. Ce qu'il est particulièrement important de souligner ici est que dans ce contexte, la réutilisabilité des modèles développés a une importance primordiale. Ceci découle du fait que le traitement d'images dans le contexte du cinéma n'est pas exécuté que deux ou trois fois comme c'est le cas dans une situation de traitement d'images satellitaires dans un contexte de gestion de catastrophe, mais plutôt des centaines et même dans certains cas, des milliers de fois pour effectuer le traitement de toutes les images d'une séquence filmée. Nous comprenons donc que dans cette situation la réutilisabilité des modèles de traitement est d'une importance capitale dans le but d'atteindre un niveau de performance et de rapidité d'exécution acceptables.

Nous retrouvons sur la Figure 5.20, qui présente l'interface de travail du logiciel NUKE, plusieurs des mêmes éléments que nous avons vus avec SIMULINK bien que les composantes soient intégrées à une seule fenêtre de travail. Nous y retrouvons des menus déroulants, des barres d'outils et une fenêtre de visualisation d'images qui est au-dessus de la fenêtre de configuration de la séquence de traitement. Les blocs fonction sont essentiellement représentés de la même manière que dans la plupart des logiciels de ce type par de petites boîtes comportant des étiquettes d'identification. Ces blocs sont reliés par des liens, comme dans SIMULINK, qui permettent de gérer le flux de données et de les acheminer de bloc en bloc jusqu'à la fin de la séquence de traitement. À la droite de ces deux fenêtres, nous retrouvons les panneaux de configuration des différents blocs fonction qui sont dans le modèle. Ceux-ci comportent tous les champs requis pour la configuration des paramètres fonctionnels des fonctions utilisées.

Nous voyons que les éléments conceptuels sous-jacents aux systèmes permettant d'utiliser la logique de la programmation graphique sont similaires. Ceci n'est pas surprenant, car ce qu'il est pertinent de mettre à la disposition des intervenants dans ce contexte peut être représenté de la même manière peu importe le domaine. La raison derrière ceci est que, peu importe le

⁴⁰ <http://www.thefoundry.co.uk/>

domaine, les fonctions qui permettent de réaliser différents traitements peuvent être « encapsulées » dans des fonctions génériques qui ne font que permettre de créer les blocs graphiques d'une part et d'offrir les éléments requis pour créer et configurer l'interface qui leur est associée. Cette dernière permet d'ajuster les paramètres des fonctions qui sont incluses dans les blocs. Nous parlons donc ici aussi de classes de fonction enveloppantes qui permettent de traiter tous les cas possibles de par leur nature générique.

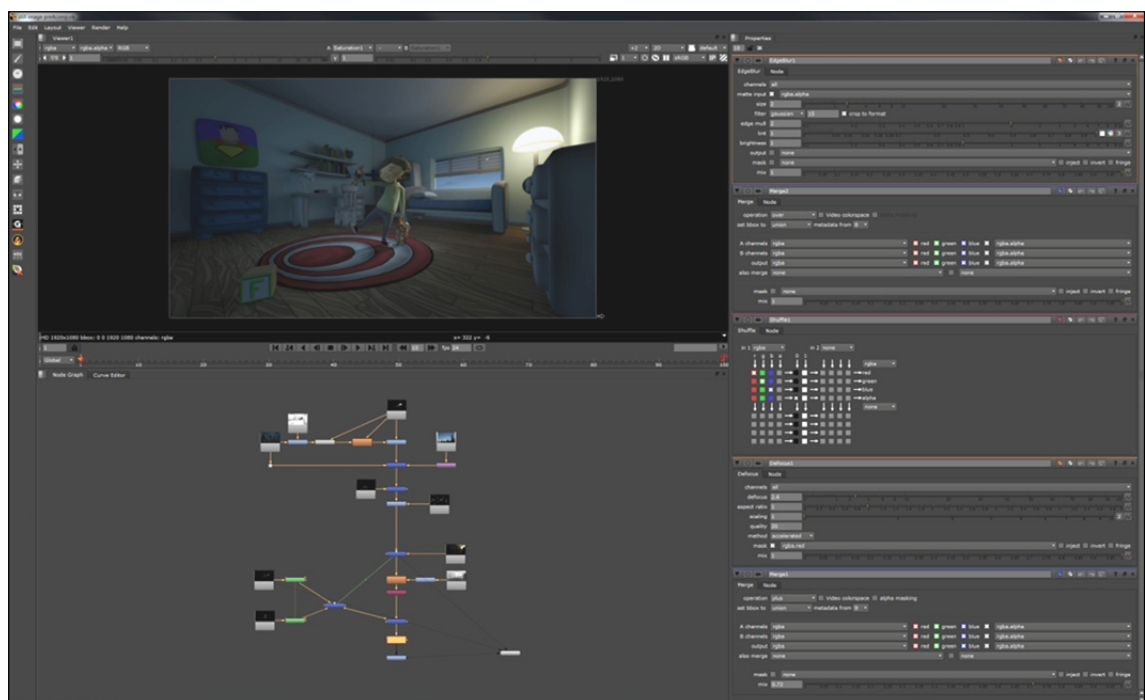


Figure 5.20 Interface de travail du logiciel de traitement d'image du logiciel NUKE

L'utilisation d'une représentation unifiée et standardisée pour tous les blocs permet à l'utilisateur de travailler de la même manière, peu importe le domaine concerné. Cette particularité est selon nous spécialement bien adaptée à ce que nous avons mentionné au sujet de la minimisation de la courbe d'apprentissage et du gain de performance que ceci peut représenter.

Un exemple probant de cette technique de travail est le module SIMULINK qui est inclus dans le logiciel MATLAB. En utilisant cet outil, un intervenant peut réaliser des traitements

reliés à chacun des domaines d'étude couverts par MATLAB de la même manière, peu importe la bibliothèque de blocs utilisée. Or, comme ce logiciel peut être utilisé pour effectuer des analyses et des traitements reliés à presque tous les domaines scientifiques, nous comprenons que l'utilisateur qui est habitué à l'outil peut facilement réaliser de nombreux types de traitements sans avoir à réapprendre le processus.

MATLAB est cependant d'un intérêt limité lorsque nous considérons le contexte de l'analyse d'images satellitaires. Premièrement, il s'agit d'un logiciel commercial dispendieux qui n'est pas nécessairement simple à modifier pour permettre une interaction avec d'autres outils de traitements. Deuxièmement, MATLAB a une limite en ce qui concerne la taille des jeux de données que l'on peut traiter. Comme les images satellitaires sont de dimension considérable, au sens de la quantité de mémoire utilisée pour les stocker, il serait difficile de les traiter à l'aide de MATLAB sans avoir recours à des artifices de traitement reposant sur le découpage du jeu de données en blocs d'information et de traiter ces blocs séquentiellement. Ceci est à notre sens indésirable et augmente le nombre d'opérations requises pour traiter une image indument. De plus, MATLAB est un outil qui trop lent pour nous permettre d'atteindre l'objectif de traitement rapide et efficace qui est indissociable de la problématique de gestion de catastrophes.

Nous comprenons que la simplicité d'utilisation ainsi que la nature générique de la méthode de travail qu'offre ce type de systèmes de développement modulaire sont à la base de l'intérêt que la programmation graphique a acquis au sein des entreprises réalisant des traitements d'image pour l'industrie du cinéma. Dans ce contexte, les utilisateurs des logiciels ne sont pas nécessairement des programmeurs professionnels, mais ils doivent pouvoir enchaîner de nombreuses fonctions pour réaliser différents traitements. En général, les entreprises œuvrant dans ce contexte ont des programmeurs au sein de leurs équipes, mais ces derniers sont souvent affectés à la gestion des systèmes informatiques et des serveurs de rendu requis pour réaliser le traitement des images. Ils participent souvent au développement et à la programmation de nouvelles fonctions, mais n'ont pas forcément le temps de développer les

séquences de traitement dont les intervenants généralistes ont besoin. Conséquemment, dans ce contexte de travail la programmation graphique est d'un intérêt primordial.

De ce que nous avons présenté au sujet de la complexité impliquée par le type d'analyse menée dans le contexte de la télédétection, nous espérons que l'intérêt que la programmation graphique peut représenter dans ce contexte de travail a bien été souligné. Il va sans dire qu'il n'est pas nécessaire d'avoir accès à un outil de programmation graphique pour réaliser le chainage des fonctions de base requises pour réaliser une séquence de traitement complète et de la rendre disponible pour une utilisation ultérieure. C'est la vision que propose le groupe de développement du logiciel GeOnAs en optant pour un outil externe *BPELPower*⁴¹ qui permet d'effectuer le chainage des fonctions de base pour créer des séquences de traitement réutilisables. De plus, sous KAOS, le même type d'encapsulation peut être effectué à l'aide du *Module Manager* avec les CLI, les FEP, les services WEB ou les modules Java pour créer de nouveaux modules ou programmes exécutables.

Cependant, nous trouvons que la programmation graphique et la flexibilité de configuration et de modification des séquences que cette technique offre sont des avantages prépondérants qui ne peuvent être ignorés. Cette méthode de travail permet aux intervenants de minimiser la courbe d'apprentissage en utilisant une représentation unifiée de tous les blocs fonction ainsi que de gérer le flux de données avec des liens qui relient les entrées et sorties des différents blocs. La mécanique de configuration des paramètres est aussi considérablement simplifiée par l'utilisation de fenêtres composées de champs et d'options de configuration pertinents pour le bloc qui leur est relié. Cette méthode de configuration des fonctions permet aussi d'inclure de l'information d'aide aux différents champs, ce qui a comme effet de minimiser le temps qu'un intervenant doit passer à consulter les menus d'aide du logiciel principal.

Le logiciel KAOS comporte un module de programmation graphique qui permet de réaliser le chainage des composantes CLI, FEP, des services WEB et des modules Java parmi les outils du système. Nous parlons de l'interface *FEP Designer* dans KAOS. La Figure 5.21

⁴¹ <http://geobrain.laits.gmu.edu:8099/bpelasync/>, consulté le 9 décembre 2012.

présente l'interface de travail du module *FEP designer*. Nous y retrouvons une fenêtre prévue pour l'assemblage des blocs fonction et la configuration des liens qui réalisent l'acheminement du flux de données à droite. À gauche se retrouvent deux fenêtres de configuration de paramètres. La fenêtre supérieure sert à manipuler les fonctionnalités et les paramètres des blocs et des liens qui se trouvent dans le modèle. La fenêtre inférieure permet de définir et d'étiqueter le module qui est en cours de développement. Dans ce cas spécifique, il s'agit d'un assemblage de modules FEP, caractérisés par l'icône d'un morceau de cassette bleue qui, comme nous pouvons le voir dans la fenêtre du bas à gauche, est dédié à l'extraction de caractéristiques. Les blocs fonctions, qui peuvent être utilisés à l'aide de cette interface, ne sont cependant pas limités aux modules FEP mais doivent être soit des CLI, des services WEB ou des composantes Java qui sont déjà disponibles parmi les outils et fonction de bases inclus dans KAOS.

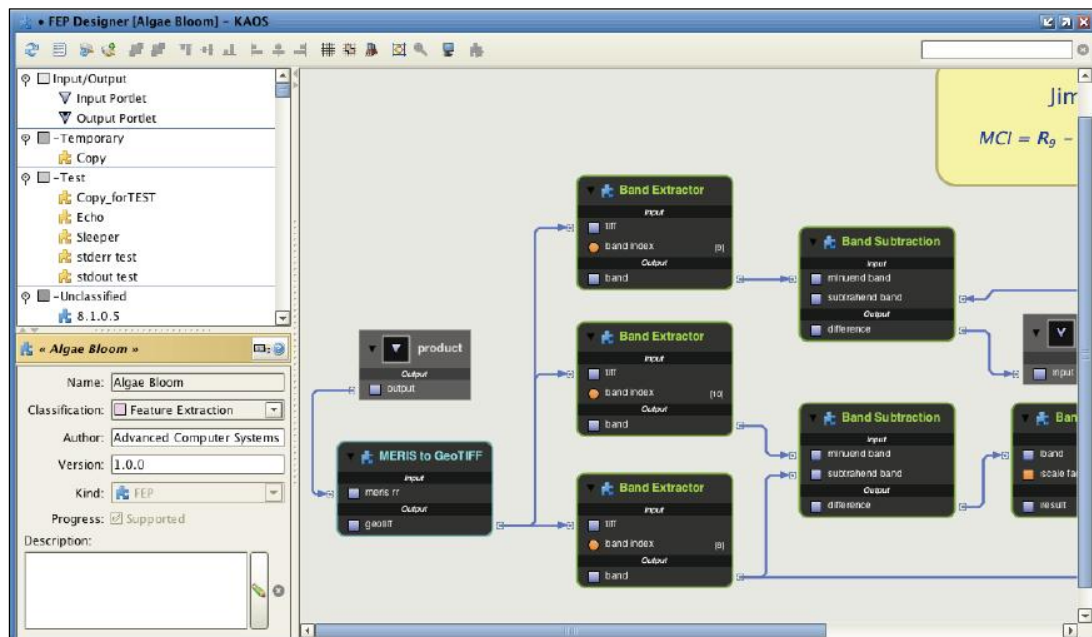


Figure 5.21 Interface du module *FEP Designer* du logiciel KAOS

Tiré de ACS, Advanced Computer Systems. 2010. *KAOS User's Manual 2.2.0*. Software Guide (ACS, 2010)

Finalement, nous considérons que la possibilité de sauvegarder et de stocker des séquences de traitement complexe, comme celles qui peuvent être créées avec le *FEP Designer* de KAOS par exemple, en un format propice à la reconfiguration, du point de vue des paramètres d'exécution, nous permettrait de mieux réagir aux difficultés qui sont reliées aux variations des images et des scénarios d'analyse que nous avons mentionnés à plusieurs endroits dans ce document. La possibilité de reconfigurer certains des paramètres ou de changer certains des blocs de la chaîne nous permettrait d'adapter plus rapidement ces séquences de traitement à de nouveaux contextes d'analyse que s'il fallait reprendre leur développement en entier.

5.5 Les éléments conceptuels à retenir pour l'élaboration du support de traitement.

Nous reprenons ici les points qui nous semblent les plus importants de ce qui a été proposé dans ce chapitre pour souligner ce qui est à retenir au sujet du développement ou du choix d'outil de traitement d'images satellitaires qui serait bien adapté au contexte de la gestion de catastrophe. Nous réitérons que ce contexte doit être analysé différemment de celui du traitement d'images satellitaires dans des contextes généraux d'analyse reliée à la télédétection. L'urgence de la situation est la grande distinction d'où découle une grande partie de la complexité qui fait surface lorsque nous pensons utiliser des algorithmes ou des techniques de traitement dans un contexte de gestion de catastrophe.

L'impact principal qu'a l'urgence de la situation sur l'utilisation de techniques de traitement d'image algorithmiques est de ne pas permettre aux intervenants de mener les recherches documentaires requises afin d'utiliser efficacement des algorithmes ou des techniques de traitement qu'ils ne connaissent pas déjà. Ceci limite donc considérablement les choix de techniques qui pourront être utilisées et invariablement les plus récentes auront plus de chances d'être exclues de la sélection d'algorithmes probants de par leur nouveauté et le manque de familiarité avec leur fonctionnement. Comme l'efficacité et la rapidité ont une

importance capitale dans un contexte de gestion de catastrophe, nous ne pouvons nous surprendre de ceci.

Nous avons souligné que pour nous permettre de rendre les techniques de traitement et d'analyse d'images satellitaires plus simples à utiliser, et donc d'augmenter la probabilité qu'elles soient utilisées dans un contexte de gestion de catastrophe, le mécanisme le plus simple à utiliser serait de développer un catalogue de connaissances qui soit facile à consulter et qui regroupe toutes les informations pertinentes au sein d'un seul système de consultation.

Les éléments qui sont selon nous les plus importants à inclure dans un système de consultation de type catalogue de connaissances, comme nous le proposons, sont les suivants :

- Les types d'images, types et résolutions brutes ou transformées,
- Les contextes d'analyse pertinents en fonction des types d'images,
- Les métadonnées des images, plateformes, capteurs, dates et conditions d'acquisition, etc.,
- La disponibilité d'images spécifiques, associée à un mécanisme permettant de récupérer des images individuelles en fonction de différents critères de sélection,
- Si les images ont déjà été traitées et si oui, dans quel contexte, par qui et avec quelle technique, outil ou autre information de ce type,
- L'indexation du contenu des images traitées en fonction d'une codification standardisée, qu'elle soit textuelle ou autre, permettant de récupérer des images en fonction de leur contenu sémantique,
- Les algorithmes et techniques de traitement, leur provenance, les travaux et articles s'y rapportant, la disponibilité des algorithmes ainsi que de l'information sur les paramètres fonctionnels et leur ajustement en fonction de différents types d'analyse,
- Les séquences de traitement complexes, par chainage programmé ou issu d'une interface de programmation graphique, leur disponibilité ainsi que de

l'information sur les paramètres fonctionnels et leur ajustement en fonction de différents types d'analyse,

- Performance des algorithmes et techniques de traitement en fonction de différents types d'analyse et d'images sources.

Nous avons mentionné plusieurs autres éléments qui pourraient être pertinents d'inclure dans un catalogue de ce type, mais étant donné qu'il n'y a pas encore de consensus au sein de la communauté de la télédétection en ce qui concerne l'information qu'il est pertinent d'inclure dans la documentation des algorithmes et techniques existants déjà, nous nous limiterons à cette liste simplifiée de concepts clés. Par contre, il nous semble bien que cette question doive être reprise le plus rapidement possible pour nous permettre de progresser sur la question de l'indexation des connaissances reliées au traitement d'images satellitaires.

Finalement, nous voulons souligner que la détection de changement, et donc tous les avantages que ce concept représente pour l'analyse d'images satellitaires, est très complexe à mettre en œuvre dans le contexte de gestion de catastrophe pour plusieurs raisons tel que souligné au CHAPITRE 3. La plus importante est évidemment l'urgence de la situation qui entraîne la nécessité de réaliser toutes les analyses pertinentes le plus rapidement possible pour créer les produits cartographiques dérivés requis pour la planification des efforts de secours.

C'est en grande partie de cette contrainte que découle l'incertitude en ce qui concerne la compatibilité des images de référence disponibles et celles qui seront acquises pour réaliser les analyses de variation de contenu des images. Nous avons mentionné à plusieurs reprises que dans certaines situations il sera certainement possible d'utiliser des techniques de traitement ou des algorithmes existants et d'arriver à réaliser l'analyse et d'atteindre un niveau de performance acceptable. Par contre, comme nous ne pouvons nous fier au fait que ceci sera possible il est impératif de prévoir d'autres mécanismes permettant de comparer le contenu d'images qui sont essentiellement incompatibles du point de vue du traitement algorithmique.

Nous proposons donc une représentation du contenu reposant sur un étiquetage conceptuel, qu'il soit textuel ou autre, qui permettrait de réaliser la comparaison et la quantification des variations du contenu des images ainsi que l'indexation des images en fonction de leur contenu. Plusieurs représentations de l'information pourraient être utilisées simultanément pour permettre des recherches différentes afin d'étendre l'efficacité du système d'indexation et de recherche de contenu. Nous pouvons penser entre autres aux travaux de (Datcu, Seidel et Walessa, 1998) (Datcu et al., 2007) qui misent sur une représentation numérique, au sens des variables de traitement, pour permettre d'effectuer des recherches de contenu dans des bases de données d'images.

Cependant, afin que ceci puisse être réalisé il est important qu'une phase de concertations initiale soit entamée pour définir ce que seront les standards et les normes d'étiquetage qui seront utilisées. Comme nous l'avons mentionné, il n'y a pas à l'heure actuelle de standard de codification du contenu des images satellitaires qui soit accepté et utilisé par tous les intervenants du domaine de la télédétection. Nous avons cependant deux pistes de départ pour nous aider à formuler ce que seront les étiquettes utilisées pour effectuer la codification du contenu sémantique des images, soit la nomenclature CORINE et celle issue de l'USGS.

Nous considérons que l'intégration de toutes les composantes que nous avons soulignées dans ce chapitre au sein d'un seul outil de traitement intégré serait l'élément le plus probant pour aider à augmenter l'utilisation efficace des concepts et techniques de traitement et d'analyse d'images satellitaires dans le contexte de la télédétection dans son ensemble, mais aussi dans tout ce qui a trait à la gestion de catastrophe.

CONCLUSION

Pour conclure, nous reprendrons les éléments les plus importants de notre thème d'intérêt, la détection de changement et sa pertinence dans un contexte de gestion de catastrophe, que nous avons relevés lors de notre analyse de cette question. Nous réitérons avant tout que la détection de changement n'est qu'un des éléments qui sont mis à contribution par l'analyse d'images satellitaires en vue de créer des produits cartographiques dérivés pertinents dans des contextes de catastrophes majeures. Il ne faut pas perdre de vue que c'est l'enchaînement de plusieurs traitements qui permet en fin de compte de réaliser la quantification des différences existant entre des images satellitaires d'une même zone géographique.

La séquence d'opérations n'est pas toujours la même, mais il est presque inévitable d'avoir à réaliser la plupart des opérations suivantes pour qu'il soit possible de détecter et de quantifier les différences de contenu que sont les changements:

- Identification et acquisition des images pertinentes,
- Traitement des images brutes, orthorectification, géoréférencement, corrections d'ordre radiométriques et autres,
- Recalage des images, si cela est possible en fonction des images disponibles,
- Extraction de caractéristiques descriptives appropriées,
- Choix de techniques et/ou d'algorithmes de traitement en fonction du cas à traiter,
- Classification de l'occupation du territoire de la région concernée en classes distinctes mutuellement exclusives,
- Identification de la ou des classe(s) d'intérêt,
- Comparaison du contenu des images et quantification des différences décelées,
- Production des produits cartographiques dérivés désirés,
- Livraison des produits cartographiques créés aux intervenants concernés par la gestion des efforts de secours et leur planification.

Ce qu'il est impératif de retenir, lorsque nous réfléchissons à la question de la détection de changement, est qu'il y a deux contextes d'utilisation des techniques de cette famille de traitements qui sont affectés de contraintes fonctionnelles considérablement différentes. Dans le cas typique d'utilisation des concepts reliés à la détection de changement, les chercheurs ou les intervenants qui se livrent aux analyses n'ont généralement pas à trop se soucier de l'aspect temporel du contexte. Ils peuvent très bien attendre qu'une image convenable d'une région donnée soit disponible pour effectuer l'analyse en cours. Ceci permet de choisir les images qui seront utilisées en fonction des contraintes techniques reliées aux algorithmes qu'ils utilisent ou qu'ils développent.

Suite à ce qui a été souligné au CHAPITRE 3 au sujet des combinaisons d'images plausibles à être traitées dans un contexte de gestion de catastrophe, nous comprenons que la détection de changement dans un contexte qui n'est pas affecté d'urgence temporelle peut être réalisée à l'aide de combinaisons d'images que nous avons appelées : le scénario d'utilisation idéal. Comme l'urgence ne prime pas dans ce contexte, nous pouvons attendre la prochaine image propice. Celle-ci n'aurait que très peu de différence par rapport à l'image de référence, sans que toutefois le but ultime de l'exercice n'en souffre trop.

Dans un contexte de gestion de catastrophe, la question est tout autre. Il est indispensable de traiter toutes les images qui deviennent disponibles, et ce, le plus rapidement possible sans quoi l'impact de la catastrophe sur les populations affectées ou sur l'infrastructure de la région concernée ne pourra être contré aussi rapidement. Cette caractéristique est la principale distinction entre les deux contextes d'utilisation qui mettent en œuvre l'analyse de changement et qui rend l'utilisation de ces techniques plus difficile à justifier dans un contexte de gestion de catastrophes majeures.

Nous avons souligné au CHAPITRE 3 plusieurs types des combinaisons d'images avec lesquels nous aurons plausiblement à travailler dans une situation de gestion de catastrophe. De ces dernières, seulement quelques combinaisons d'images nous permettront de réaliser l'étape de prétraitement, essentielle pour la mise en œuvre de la majorité des algorithmes et

techniques de détection de changements disponibles à l'heure actuelle. Nous parlons ici du recalage des images qui est la contrainte technique la plus exigeante de celles qui affectent la performance des techniques de traitement et/ou des algorithmes ainsi que la qualité des résultats que nous pouvons espérer obtenir à l'aide des concepts reliés à la détection de changement.

Comme nous l'avons mentionné dans ce même chapitre, il n'est pas exclu que dans certaines situations il soit possible d'effectuer le recalage des images suffisamment bien pour que nous puissions obtenir des résultats probants à l'aide de l'une ou l'autre des techniques existantes. Par contre, comme il n'est pas certain d'avoir un cas à traiter qui soit propice à permettre l'utilisation de ces méthodes directement, selon nous, il est essentiel de développer d'autres mécanismes qui permettraient de réaliser les opérations d'identification et de quantification des différences existant entre plusieurs images d'une même région. De plus, il n'est pas garanti que les images disponibles soient directement comparables si nous considérons la vaste panoplie de types, de formats et de résolutions d'images qui peuvent avoir à être traités dans une situation de gestion de catastrophe.

C'est de cette constatation que découle l'idée de proposer une représentation de l'information sémantique contenue dans les images d'une série reposant sur l'étiquetage conceptuel en format textuel. Cette représentation serait inévitablement plus simple à traiter pour réaliser la mise en correspondance des classes d'occupation du territoire qu'une représentation numérique. Cette dernière, comme nous l'avons souligné, est une tâche herculéenne reposant sur l'élaboration de passerelles de mise en correspondance des classes qui dépendent des variables pertinentes pour l'extraction des classes dans chaque type, format ou résolution d'image ainsi qu'à leurs nombreuses combinaisons possibles sans mentionner les variations de leur condition d'acquisition et des conditions environnementales qui peuvent affecter les caractéristiques radiométriques d'images provenant du même capteur. Le nombre de combinaisons que ces contraintes fonctionnelles représentent est incroyable et ne cessera de croître avec l'apparition de nouveaux formats d'images et le vieillissement des capteurs existants à l'heure actuelle.

L'utilisation d'étiquettes textuelles n'exclut pas la possibilité de joindre d'autres descriptions qui pourraient être pertinentes pour l'indexation du contenu sémantique des images comme les variables de traitement, les prototypes des classes et les caractéristiques de distribution leur étant propre. Au contraire, à notre avis, l'utilisation de nombreuses descriptions simultanément nous permettrait de nous abstraire d'une grande partie de la complexité qui est reliée à la panoplie de combinaisons d'images d'où découle la difficulté reliée à l'utilisation des concepts reliés à la de détection de changement dans un contexte de gestion de catastrophe.

L'avantage principal que cette représentation textuelle nous offre est d'être en mesure de comparer le contenu d'images, peu importe leur comparabilité directe. Comme nous l'avons souligné aux sections 3.2 et 3.3, dans un contexte de gestion de catastrophe il est plus que probable qu'il soit nécessaire de comparer des images qui ne pourront être recalées à cause de leur type, de leur résolution ou de l'un des facteurs qui ont été mis de l'avant dans le CHAPITRE 1 et le CHAPITRE 3. Il va sans dire que même si nous nous retrouvons dans cette situation, il est impensable de ne pas tout de même traiter ces images. Conséquemment, nous pensons qu'il est impératif d'établir d'autres méthodes qui nous permettent de réaliser la comparaison du contenu sémantique des images.

Nous avons souligné au CHAPITRE 5 qu'il y a déjà des nomenclatures de description de l'occupation du territoire qui existent, comme la classification CORINE Land Cover par exemple, qui pourraient être utilisées directement ou comme sources d'inspiration pour établir un système de classification du contenu d'images satellitaires qui puisse être accepté et utilisé par l'ensemble de la communauté de chercheurs et d'analystes qui œuvrent en télédétection. Si une nomenclature standardisée venait à être établie et utilisée pour encoder le contenu sémantique des images, il deviendrait possible de développer des outils de recherche d'images en fonction de leur contenu qui serait indépendant des variables et des problèmes de comparabilité des images, soulignés à plusieurs reprises dans ce document.

Cette représentation standardisée du contenu sémantique des images nous permettrait également de contempler la création d'outils de recherches et d'indexation de tous les concepts théoriques et techniques qui entrent en considération lorsque nous pensons utiliser un algorithme ou une technique qui ne nous est pas familière. Comme nous l'avons mentionné dans le CHAPITRE 4 et le CHAPITRE 5, il est fréquent que le manque d'informations fonctionnelles concernant un algorithme ou une technique de traitement soit à la source de l'exclusion d'un outil qui autrement pourrait être pertinent à utiliser dans une situation donnée dans un contexte de gestion de catastrophe. Il est facile de comprendre pourquoi ceci se produit si nous prenons l'urgence de la situation comme critère de sélection des moyens qui seront utilisés pour résoudre un cas d'analyse spécifique. De plus, comme le tâtonnement et les essais itératifs reliés à l'ajustement des paramètres fonctionnels d'un algorithme peuvent être un exercice de longue haleine, lorsque nous n'y sommes pas déjà habitués, nous comprenons que dans plusieurs cas les analystes ne considèrent pas utiliser certains algorithmes qui auraient théoriquement été très utiles pour réaliser l'analyse rapidement s'ils ne les connaissent pas déjà.

Pour nous permettre de maximiser l'utilisation des techniques et algorithmes de traitement d'images et de détection de changement qui existent à l'heure actuelle, nous pensons que la création d'un outil interactif de type catalogue de connaissances serait un moyen efficace pour disséminer les notions pertinentes à tous les acteurs du monde de la télédétection. Un outil de ce type nous permettrait d'indexer les notions théoriques et pratiques pertinentes afin de favoriser l'utilisation des méthodes d'analyse existantes autant que les informations reliées aux images, à leurs types et résolutions ainsi qu'aux scénarios d'analyse les plus pertinents leur étant reliés. À ceci, nous pourrions aussi ajouter des informations sur les images satellitaires disponibles ainsi que sur celles qui ont déjà été traitées. Ensuite, si possible, nous ajouterions des exemples de chaque type de traitement, d'image ou de produit dérivé qui peut être créé à l'aide d'une technique ou d'un algorithme, d'un type d'image ou de toutes autres informations propices à une permettre une utilisation efficace des images et des outils algorithmiques disponibles pour réaliser les analyses de changement.

Nous sommes conscients que la création d'un tel outil présuppose une collaboration entre de nombreux acteurs qui œuvrent dans plusieurs contextes différents. Nous pouvons penser, entre autres, aux agences spatiales de différents pays, aux organismes comme l'USGS, qui chapeautent l'utilisation et la dissémination de certains types d'informations provenant de l'utilisation des concepts inhérents à la télédétection, ainsi qu'aux chercheurs et aux analystes qui travaillent autant dans des contextes académiques que professionnels. Il va de soi qu'atteindre un consensus qui satisfasse à tous est une tâche qui sera un défi considérable. Par contre, nous considérons que les bienfaits qui découleraient de la création d'un tel outil, permettant d'accroître le potentiel d'utilisation de la détection de changement et des ses concepts, surpassent de loin la complexité qui est reliée à l'atteinte d'une entente de principe et d'un accord d'élaboration de standards d'encodage des images, des descriptions de leur contenu et du développement d'un outil de travail collaboratif.

La disponibilité d'un tel outil de travail collaboratif aurait des retombées dans plusieurs sphères d'utilisation des concepts et techniques de l'analyse d'images satellitaires. Nous avons souligné dans le CHAPITRE 5 que ce type d'outil, qui peut être assimilé à la plateforme de travail GeOnAs, permettrait de créer une passerelle entre les mondes académiques et professionnels. Les étudiants, utilisateurs de ces techniques d'analyse et analystes de demain, profiteraient des connaissances de tous les acteurs du domaine grâce à l'accès à un catalogue de type encyclopédique mettant tous les concepts pertinents à leur disposition. De plus, les étudiants pourraient entrer en communication avec différents acteurs du domaine afin d'obtenir de plus amples détails sur un concept ou un algorithme donné si le besoin se fait sentir.

L'élaboration d'un tel outil doit suivre une phase de concertation initiale qui servira à définir quels en seront ses utilisateurs et comment ainsi que pourquoi y parvenir. Par la suite, par contre, il deviendra possible d'établir comment procéder pour bâtir un tel système, car pour le moment la fondation de cette bibliothèque interactive n'est pas encore établie. Par conséquent, il est impensable d'entamer la conception du système requis pour gérer ces connaissances et leurs droits d'accès et de mise à jour. D'autre part, comme nous l'avons

souligné dans le CHAPITRE 5, certaines des bases conceptuelles de ce type d'outil commencent à être analysées par différents acteurs du domaine de la télédétection comme nous l'avons vu avec les logiciels GeOnAs et KAOS.

Finally, nous avons souligné dans le CHAPITRE 3 que dans bien des situations il est nécessaire d'utiliser plusieurs outils logiciels pour arriver à réaliser une analyse de détection de changement dans le contexte de la télédétection. En général, ce qui ressort des articles où nous retrouvons des cascades de logiciels est que certains des logiciels disponibles n'offrent que quelques-unes des fonctions requises pour mener une analyse. C'est de ceci que découle la nécessité de transcrire les données pour permettre le passage d'une plateforme de traitement à une autre afin de réaliser une chaîne de traitement complète. Nous avons mentionné que cette action de transcription est à notre avis une perte d'efficacité nette du point de vue du travail à réaliser. De plus, il y a dans ces manipulations intermédiaires une source potentielle d'artéfacts de transcodage qui peut créer des différences de représentation accidentelles qu'il faudra par la suite identifier et corriger pour ne pas induire de fausses détections de changement. Ceci augmente inévitablement le temps de traitement et d'analyse ce qui, par conséquent, rend le délai entre l'acquisition des images et la production des produits cartographiques dérivés plus long. Comme le contexte de la gestion de catastrophe impose la nécessité de réaliser les traitements le plus rapidement possible, nous comprenons que ce va-et-vient entre plusieurs outils est nuisible à l'atteinte de l'objectif.

Pour remédier à cette situation, il y a, à l'heure actuelle, plusieurs travaux de développement en cours qui tentent de mettre à la disposition des utilisateurs les outils pertinents sous forme de fonctions de traitement d'image ou de plateformes de traitement d'images satellitaires dédiées. Nous avons présenté au CHAPITRE 5 quelques outils qui sont en cours de développement qui relèvent du paradigme de développement à source libre. Ces outils sont la bibliothèque de fonction de traitement d'images OTB. Cette dernière repose sur les concepts de la programmation objet classique et sur les interfaces de traitement d'images satellitaires GeOnAS et KAOS qui tirent leur inspiration de la programmation axée sur l'utilisation de services WEB et de modules de traitement chaînables.

La bibliothèque OTB est très bien fournie en ce qui concerne les algorithmes et autres outils de traitement qui y sont disponibles. Par contre, pour qu'un utilisateur puisse les utiliser efficacement, il est impératif qu'il ait des connaissances assez avancées en programmation pour créer des enchainements de fonctions permettant de réaliser le traitement désiré ou pour modifier les fonctions existantes afin de créer de nouvelles fonctions. Il est évident que dans certains cas les fonctions de traitement ont déjà été développées et qu'il ne reste qu'à les exécuter, mais comme ceci n'est pas garanti, il faut inévitablement prévoir en développer de nouvelles. Conséquemment, il faudra développer, compiler et déverminer le code avant de pouvoir utiliser les nouvelles fonctions ou enchainements de fonctions. Nous soulignons que ceci sera impossible à réaliser dans un contexte de gestion de catastrophe à cause de l'urgence temporelle reliée au traitement des images.

Il est aussi crucial dans ce contexte de gérer les versions de code et de version des outils de compilation requis ce qui, comme nous l'avons mentionné, ne nous semble pas être idéal pour travailler collectivement sur une problématique dynamique comme la gestion de catastrophe. Il est cependant important de retenir que, pour le moment, cette collection de fonctions de traitement d'image est une de celles qui sont les plus étoffées et que la bibliothèque OTB comporte un nombre impressionnant de fonctions et d'outils de traitement et d'analyse d'image.

La plateforme de travail GeOnAs n'est pas affectée par les problèmes de gestion de code source ou de version de la bibliothèque de fonctions et d'outils de programmation qui relève des utilisateurs comme c'est le cas avec OTB. C'est l'optique de développement axée sur l'utilisation de service WEB qui nous permet de gérer les versions de code à utiliser pour chaque appel de traitement à même la description du service WEB qui est invoqué. Cette manière de procéder libère donc l'utilisateur des considérations fonctionnelles reliées à l'utilisation d'un outil comme OTB. Cependant, pour le moment, cette plateforme de travail n'a que peu de fonctions de traitement d'image et elle est conséquemment peu utilisable dans un contexte de gestion de catastrophe. Par contre, la plateforme GeOnAs réunit plusieurs des concepts que nous avons soulignés dans ce document concernant la recherche et l'accès aux

données image, l'indépendance de la gestion de code et de version, la simplicité d'utilisation et la liaison des domaines académiques et professionnels afin de permettre une meilleure dissémination des connaissances reliées au domaine de la télédétection. De plus, l'usage de services web est une manière de répondre à l'achalandage du réseau d'accès et la sur utilisation des ressources de traitement qui est inhérent avec l'optique de développement serveur client.

Le logiciel KAOS inclut déjà théoriquement la majorité des concepts que nous avons avancés dans ce document. En revanche, comme nous n'avons pu l'évaluer par essai, nous ne pouvons pour le moment rien conclure sur la possibilité de l'utiliser dans des contextes de gestion de catastrophe. Conceptuellement, cet outil semble presque idéal, mais il reste à l'évaluer pour permettre d'établir son potentiel réel sur des cas concrets d'analyse d'images satellitaires.

À notre avis, à l'heure actuelle, ni l'un ni l'autre de ces outils n'est prêt à être utilisé efficacement dans un contexte de gestion de catastrophe, mais ces outils peuvent être utilisés avec succès sous certaines conditions. Il faut penser à la disponibilité d'une fonction ou d'une séquence de traitement déjà disponible et à sa documentation entre autres. Par contre, ces outils pourraient très bien être combinés afin que nous puissions les exploiter efficacement. En combinant l'énorme bibliothèque de fonctions de traitement et d'analyse d'OTB à une plateforme de travail comme GeOnAS ou KAOS, qui sont simples à utiliser, nous aurions rapidement accès à un outil efficace et polyvalent de traitement d'images satellitaires. De plus, l'utilisation d'un seul outil centralisé, ou de préférence distribué à la manière des services web, permettrait également de gérer les versions de code ainsi que la documentation des fonctions d'une manière standardisée. Cela permettrait de minimiser le temps que l'utilisateur moyen doit consacrer à gérer les versions et à installer les dernières versions des logiciels connexes de compilation ou autre.

En combinant les fonctions de traitement et le catalogue de connaissances, que nous avons proposé au CHAPITRE 5, à même une interface de traitement qui permette de réaliser la

recherche d'images, le traitement de ces dernières, l'encodage de la classification de l'usage du territoire obtenu et l'indexation des connaissances théoriques et pratiques qui sont essentielles à une utilisation efficace et probante des concepts mis en cause par l'analyse d'images satellitaires, nous pourrions arriver à maximiser l'utilisation de la détection de changement. Ceci non seulement dans des contextes pratiques, comme la gestion de catastrophe, mais aussi au niveau de l'apprentissage académique et de l'utilisation professionnelle. La combinaison de ces différentes sources de connaissances par l'intermédiaire d'un système central de gestion des connaissances serait selon nous un premier pas vers une plus grande démocratisation de ces outils d'analyse. De plus, en procédant de la sorte nous pourrions aussi favoriser le travail collaboratif entre les milieux académiques et professionnels et créer des groupes de travail virtuels appelés à collaborer pour réagir plus rapidement et de manière plus concertée lorsque des catastrophes majeures affectent notre monde.

Somme toute, nous avons la responsabilité collective d'assurer la protection des plus faibles, des démunis ainsi que des générations futures des méfaits des catastrophes naturelles et de celles qui sont de notre faction. Ceci malgré les obstacles d'ordre politique ou économique qui nous empêchent de progresser dans ce sens qui sont, selon nous, inadmissibles et doivent être contrés à tout pris.

RECOMMANDATIONS

Suite à tout ce qui a été présenté dans ce document, nous comprenons qu'il y a plusieurs obstacles qui réduisent le potentiel d'utilisation des techniques, des algorithmes et des concepts reliés à la détection de changement dans des contextes de gestion de catastrophe. Contrairement à ce que nous aurions pu prévoir, le problème ne réside pas dans le manque de techniques ou d'algorithmes pertinents et performants nous permettant de réaliser la détection de changement à partir d'images satellitaires. Au contraire, il y a une panoplie impressionnante de techniques et d'algorithmes qu'il pourrait être très pertinent de contempler pour résoudre divers cas d'analyse de changement reliés à la gestion de catastrophe. Là où il y a des lacunes fonctionnelles importantes, selon nous, est au niveau de la dissémination des connaissances qui permettraient de les utiliser efficacement ainsi que du support de traitement qui est utilisé pour réaliser les analyses. Comme l'urgence est l'élément directeur qui oriente les décisions et les choix que feront les intervenants et les analystes lorsqu'ils décident comment résoudre un cas spécifique, il ne faut pas nous surprendre s'ils n'optent que rarement de tenter d'utiliser des techniques ou des algorithmes qu'ils ne connaissent pas déjà.

L'autre problème qui réduit l'utilisation de ces techniques est relié à leur disponibilité. Plusieurs outils logiciels sont disponibles pour nous permettre de réaliser les différents traitements qui sont requis pour mener une analyse de changement complète à l'aide d'images satellitaires. Par contre, ces logiciels ne rendent pas toutes les différentes techniques et tous les différents algorithmes disponibles au sein du seul outil simple à utiliser, comme nous l'avons souligné dans le CHAPITRE 3 et le CHAPITRE 5.

Afin de maximiser l'utilisation des techniques et algorithmes de détection de changement provenant des domaines académiques et professionnels il nous faut entamer l'analyse des fondements conceptuels sous-jacents au travail collaboratif et à l'utilisation efficace des

ressources, des connaissances pertinentes et des outils requis pour mener ce type d'analyse. Il nous faudra donc entreprendre des discussions avec les différents acteurs du domaine à plusieurs niveaux, car les problèmes que nous avons soulignés relèvent de trois différents contextes fonctionnels distincts.

Toutes les recommandations que nous ferons ici sont mises de l'avant en fonction des concepts présentés au CHAPITRE 5 concernant la création d'un outil plurifonctionnel de travail collaboratif. Cet outil devra comporter des volets d'accès aux données sources, de consultation d'un catalogue de connaissances pertinentes indexées avec référencement croisé relié aux différents scénarios d'utilisation des images, des techniques et algorithmes disponibles ainsi que de comporter les fonctions et algorithmes requis pour le traitement, l'analyse et la production d'images à valeur ajoutée. Ces dernières sont bien sûr les produits cartographiques dérivés qui sont requis pour aider à la planification des efforts de secours.

Le premier des contextes fonctionnels qui devra être abordé avant toute autre chose relève du contexte « culturel » qui est relié à l'utilisation d'images satellitaires en télédétection. Nous avons mentionné au CHAPITRE 4 et au CHAPITRE 5 que pour nous permettre d'entamer l'analyse du format de gestion des connaissances et pour commencer à évaluer des options, en ce qui concerne le développement d'un catalogue de connaissances du type de ce que nous avons proposé dans le CHAPITRE 5, qu'il est, selon nous, essentiel de définir des normes et des standards de représentation qui seraient acceptés de la majorité des acteurs du domaine. Parmi d'autres, nous avons souligné qu'une standardisation des formats d'encodage des images et de leur métadonnée ainsi que du langage descriptif utilisé pour décrire le contenu des images sont de mise pour nous permettre d'accroître l'interopérabilité des outils de traitement requis en plus de développer des outils de recherche et de comparaison du contenu sémantique des images qui soient efficaces et stables.

Afin d'atteindre cet objectif, il sera inévitable d'identifier et de recruter des intervenants provenant des différents domaines qui sont mis à contribution par la planification des efforts de secours humanitaires suite à une catastrophe majeure en plus des représentants des

gouvernements, des agences spatiales, de compagnies de traitement et d'analyse d'image et d'analystes ainsi que de tout autres membres de la communauté de la télédétection qui auront à utiliser les normes établies par concertation collective.

Les thèmes qui devront être couverts lors de ces discussions avec les intervenants sont :

- L'encodage standardisé des images en un format uniforme pour permettre d'augmenter l'interopérabilité des outils de traitement,
- L'encodage standardisé des métadonnées images pour permettre d'entamer l'automatisation des outils de recherche d'images sources et de leur indexation dans des bases de données,
- L'uniformisation du langage descriptif utilisé pour expliciter l'occupation du territoire représenté par une image pour, ici aussi, permettre d'entamer l'automatisation des outils de recherche d'images sources et d'indexation de leur contenu,
- L'identification des besoins des acteurs œuvrant à la gestion des efforts de secours, en fonction des types de catastrophe et des produits dérivés requis, pour permettre une planification efficiente des interventions humanitaires.

Cette liste n'est pas exhaustive, mais comporte les premiers éléments qui nous permettront d'entamer les réflexions et les explorations qui sous-tendent les deux autres éléments que nous soulignerons ici.

Le second des contextes fonctionnels que nous avons identifié lors de notre analyse de la problématique de l'utilisation de la détection de changement sous la contrainte de la gestion de catastrophe est relié aux connaissances requises pour être en mesure d'utiliser les techniques et algorithmes disponibles de manière efficace. Nous avons souligné au CHAPITRE 5 que l'utilisation d'un catalogue de connaissances nous semble être le mécanisme le plus simple à utiliser pour rendre la masse impressionnante de notions

théoriques et pratiques reliées aux algorithmes et techniques de détection de changement simple à consulter. Cette vision rendrait l'utilisation d'une technique inconnue plus simple en permettant de « découvrir » les éléments conceptuels pertinents rapidement et permettrait d'explorer les contextes d'utilisation probants qui sont associés à une technique de traitement, un algorithme donné, un type d'image ou tout autre information fonctionnelle qui réduirait la courbe d'apprentissage reliée à l'un ou l'autre de ces éléments.

Nous comprenons que ceci implique en un premier temps un travail d'analyse exploratoire portant sur les liaisons conceptuelles entre les différents éléments que nous venons de mentionner. Pour nous permettre de créer un catalogue de connaissances simple à utiliser, il nous faudra établir comment le problème est conceptualisé par les analystes puis essayer d'établir la structure de liaison des notions pertinentes qui permettra de rendre l'indexation des concepts propice à supporter la mécanique d'analyse et de résolution normale des intervenants qui mènent les analyses.

Une fois cette phase d'analyse entamée, nous pourrons nous pencher sur la question du référencement croisé de toutes les couches d'information pertinentes pour rendre le catalogue de connaissances aussi intuitif et efficace que possible. Comme nous l'avons souligné dans le CHAPITRE 5 les types d'information que nous pouvons prévoir indexer sont :

- Les images et leur disponibilité qu'elles soient brutes, prétraitées, transformées, les produits dérivés s'ils existent, ainsi que leurs métadonnées et toute information concernant les images transformées comme les acteurs ayant réalisé le traitement, quand, pourquoi, avec quel outil, la performance du traitement, etc.,
- Les informations théoriques et pratiques sur les images, leur type, leur format, leur résolution, les contextes d'utilisation pertinents des différents types d'images, le type de contenu qui peut être extrait d'un type d'image, les algorithmes et/ou techniques de traitement qui sont pertinents à considérer en

fonction de différents types d'images et/ou de contextes d'analyse et leur performance, etc.,

- Les informations sur les algorithmes et techniques de traitement, leur contexte d'utilisation pertinent, les types d'images propices en fonction de leurs caractéristiques propres, les types de résultats qui peuvent être obtenus de leur utilisation, leurs performances, leur disponibilité, ainsi que toute information concernant les auteurs d'un algorithme ou d'une technique de traitement comme le contexte de développement, l'objectif, les données de développement utilisées, etc.

Une fois ces concepts bien identifiés, il sera possible de commencer le prototypage d'un tel catalogue de connaissances. Il faudra analyser comment bâtir le référencement croisé de toutes ces notions pour être en mesure d'identifier le mécanisme de gestion de ces informations le plus efficace et simple à utiliser. Comme nous l'avons souligné au CHAPITRE 5, il nous semble probant de commencer par évaluer les outils usuels qui sont reliés au développement de bases de données avant de penser à développer un système propriétaire en entier. L'utilisation d'un langage de développement de bases de données usuel aurait l'avantage d'être déjà connu de plusieurs des acteurs du domaine et permettrait de contempler un développement collaboratif du système, car les différents intervenants y collaborant n'auraient pas à se familiariser avec un nouveau mécanisme de travail.

Le prototype d'un système de ce genre pourrait être évalué avec une base de connaissances réduite sans que la mécanique d'indexation et de référencement croisé dérivée ne soit représentative du potentiel à long terme du système. Par contre, il est impératif que des notions pertinentes, provenant de chacune des catégories de connaissances que nous venons de souligner, soient disponibles pour nous permettre d'évaluer un tel système d'indexation de connaissances.

Le troisième des contextes fonctionnels que nous avons identifié est celui du traitement en soi. Comme nous l'avons souligné dans le CHAPITRE 3, il est très fréquent de devoir utiliser

de nombreux logiciels différents et donc de développer des protocoles de transcodage des données pour permettre le passage d'une plateforme de travail à une autre. Ceci afin de réaliser une analyse complète allant du point d'entrée des données images brutes à la production des produits cartographiques dérivés requis pour la gestion des efforts de secours. À notre avis, cette particularité est la source d'une perte nette de productivité et souligne le besoin de développer un outil plurifonctionnel qui regroupe, au sein d'une seule interface de travail, tous les éléments que nous avons identifiés dans ce document.

Il serait possible de contempler la sélection d'un système existant et d'évaluer la possibilité d'y incorporer les éléments fonctionnels pertinents. Par contre, comme il y a de nombreux choix de logiciel qui devraient être considérés, il va sans dire que le processus de sélection pourrait être long sans mentionner l'aspect commercial de certains des logiciels qui nous laisse présager des négociations potentiellement complexes.

Il nous semble que pour arriver à un résultat probant rapidement, il serait préférable de miser sur des options de logiciels qui visent le développement à source libre éclipsant de cette manière la contrainte des droits de propriété intellectuelle associée à tout développement avec des partenaires provenant du monde commercial.

Dans cette optique nous proposons que l'analyse de faisabilité de joindre les fonctions de traitement et d'analyse d'image disponible dans la bibliothèque OTB à la plateforme de traitement GeOnAs serait un point de départ probant pour le développement d'un outil plurifonctionnel comme nous le proposons dans ce document. Puisque ces deux outils sont déjà fonctionnels, nous pourrions entamer immédiatement l'évaluation des classes enveloppantes proposées par le groupe de GeOnAs en ce qui concerne l'ajout de fonctions provenant de la bibliothèque OTB à l'interface de travail rapidement. De plus, l'interface de travail de GeOnAs comporte déjà un module de recherche d'image que nous considérons être un élément très important d'un outil comme celui que nous proposons. Le choix de ces deux systèmes n'est qu'une suggestion que nous faisons, car nous sommes conscients que d'autres

options pourraient être considérées, mais il nous semble que la jonction d'OTB et de GeOnAs nous permettrait de réaliser des tests initiaux rapidement.

Le travail à réaliser par cette évaluation est donc de nature expérimentale et doit être réalisé par un ou des intervenants qui ont de très bonnes connaissances en programmation bien que l'optique de cet exercice soit de libérer l'utilisateur de la nécessité d'avoir des notions de programmation plus ou moins avancées pour être en mesure d'utiliser des outils de traitement et d'analyse efficaces. L'analyse de faisabilité proposée ici devrait comporter les volets suivants :

- L'analyse du potentiel d'intégration des fonctions de la bibliothèque OTB à la plateforme GeOnAs,
- L'évaluation de la marche à suivre pour intégrer les fonctions d'OTB à l'aide des fonctions enveloppantes développées par le groupe de recherche œuvrant au développement de GeOnAs,
- Des essais d'intégration d'une sélection de fonctions d'OTB à GeOnAs,
- L'évaluation du fonctionnement des fonctions ajoutées au sein de l'outil GeOnAs,
- L'analyse du potentiel d'automatisation de l'intégration des fonctions d'OTB à GeOnAs,
- L'analyse de la complexité liée au développement d'une version de GeOnAs adaptée pour les outils mobiles comme les téléphones intelligents et les tablettes.

Ces travaux pourraient être menés indépendamment des deux premiers éléments fonctionnels que nous avons soulignés, car la problématique de l'intégration des fonctions d'OTB à GeOnAs est distincte de celle de la normalisation des formats et du développement du catalogue de connaissances. Par contre, une fois que les notions liées au catalogue de connaissances seront définies et qu'un prototype de catalogue sera réalisé, il sera important de commencer à analyser la mécanique d'inclusion du catalogue à l'interface de traitement et de procéder dans ce sens.

Nous avons souligné d'autres éléments conceptuels qu'il pourrait être intéressant d'évaluer, comme la programmation graphique de l'enchaînement des fonctions qui pourrait aussi être analysé et prototypé simultanément. Par contre, tout comme l'inclusion des fonctions d'OTB à GeOnAs, ces éléments peuvent très bien être analysés et prototypés indépendamment des phases de concertation et d'analyse des besoins des utilisateurs ainsi que de prototypage du catalogue de connaissances.

Finalement, comme nous n'avons pu évaluer le logiciel KAOS, qui semble déjà comporter la majorité des éléments conceptuels et techniques que nous avons mentionnés dans ce document, il nous semble qu'il serait extrêmement pertinent de commencer par l'analyse de ce système de traitement dès qu'il sera possible d'obtenir un accès à une version complète du logiciel permettant l'utilisation de toutes ses fonctionnalités. Si tout ce que nous avons pu constater en analysant la documentation et présenter dans ce document au sujet de KAOS est fonctionnel et directement utilisable, il nous semble que le choix de cet outil serait des plus judicieux pour poursuivre le développement et l'utilisation d'outils de traitement dédiés à divers scénarios de gestion de catastrophe. De cette manière, les intervenants ayant à utiliser les algorithmes et techniques de traitement pourraient tirer profit de la simplicité d'utilisation des fonctions développées ainsi que de la flexibilité qu'offre la programmation graphique des séquences de traitement.

ANNEXE I

TABLEAU DES TECHNIQUES DE DÉTECTION DE CHANGEMENT

Tiré de Lu, D., P. Maussel, E. Brondizio et E. Moran. 2004a « Change detection techniques » *International journal of Remote Sensing*, vol. 25 n° 12, p. 2365-2401.

Table 1. Summary of change detection techniques. (The five levels indicate the complexity of the change detection techniques, from simplest 1 to the most complex 5.)

Techniques	Characteristics	Advantages	Disadvantages	Examples	Level	Key factors
Category I. Algebra						
1. Image differencing	Subtracts the first-date image from a second-date image, pixel by pixel	Simple and straightforward, easy to interpret the results	Cannot provide a detailed change matrix, requires selection of thresholds	Forest defoliation (Muchoney and Haack 1994), land-cover change (Sohl 1999) and irrigated crops monitoring (Manavalan <i>et al.</i> 1995)	1	Identifies suitable image bands and thresholds
2. Image regression	Establishes relationships between bi-temporal images, then estimates pixel values of the second-date image by use of a regression function, subtracts the regressed image from the first-date image	Reduces impacts of the atmospheric, sensor and environmental differences between two-date images	Requires to develop accurate regression functions for the selected bands before implementing change detection	Tropical forest change (Singh 1986) and forest conversion (Jha and Unni 1994)	1	Develops the regression function; identifies suitable bands and thresholds
3. Image rationing	Calculates the ratio of registered images of two dates, band by band	Reduces impacts of Sun angle, shadow and topography	Non-normal distribution of the result is often criticized	Land-use mapping and change detection (Prakash and Gupta 1998)	1	Identifies the image bands and thresholds

Table 1. (Continued)

Techniques	Characteristics	Advantages	Disadvantages	Examples	Level	Key factors
4. Vegetation index differencing	Produces vegetation index separately, then subtracts the second-date vegetation index from the first-date vegetation index	Emphasizes differences in the spectral response of different features and reduces impacts of topographic effects and illumination	Enhances random noise or coherence noise	Vegetation change (Townshend and Justice 1995, Guerra <i>et al.</i> 1998, Lyon <i>et al.</i> 1998) and forest canopy change (Nelson 1983)	1	Identifies suitable vegetation index and thresholds
5. Change vector analysis (CVA)	Generates two outputs: (1) the spectral change vector describes the direction and magnitude of change from the first to the second date; and (2) the total change magnitude per pixel is computed by determining the Euclidean distance between end points through <i>n</i> -dimensional change space	Ability to process any number of spectral bands desired and to produce detailed change detection information	Difficult to identify land cover change trajectories	Change detection of landscape variables (Lambin 1996), land-cover changes (Johnson and Kasischke 1998), disaster assessment (Johnson 1994, Schoppmann and Tyler 1996), and conifer forest change (Cohen and Fiorella 1998, Allen and Kupfer 2000)	3	Defines thresholds and identifies change trajectories

6. Background subtraction	Non-change areas have slowly varying background grey levels. A low-pass filtered variant of the original image is used to approximate the variations to the background image. A new image is produced through subtracting the background image from the original image	Easy to implement	Low accuracy	Tropical forest change (Singh 1989).	1	Develops the background image
Category II. Transformation						
7. Principal component analysis (PCA)	Assumes that multi-temporal data are highly correlated and change information can be highlighted in the new components. Two ways to apply PCA for change detection are: (1) put two or more dates of images into a single file, then perform PCA and analyse the minor component images for change information; and (2) perform PCA separately, then subtract the second-date PC image from the corresponding	Reduces data redundancy between bands and emphasizes different information in the derived components	PCA is scene dependent, thus the change detection results between different dates are often difficult to interpret and label. It cannot provide a complete matrix of change class information and requires determining thresholds to identify the changed areas	Land-cover change (Byrne <i>et al.</i> 1980, Ingebritsen and Lyon 1985, Parra <i>et al.</i> 1996, Kwarteng and Chavez 1998), urban expansion (Li and Yeh 1998), tropical forest conversion (Jha and Unni 1994), forest mortality (Collins and Woodcock 1996) and forest defoliation (Muchoney and Haack 1994)	2	Analyst's skill in identifying which component best represents the change and selecting thresholds

Table 1. (Continued)

Techniques	Characteristics	Advantages	Disadvantages	Examples	Level	Key factors
8. Tasseled cap (KT)	PC image of the first date The principle of this method is similar to PCA. The only difference from PCA is that PCA depends on the image scene, and KT transformation is independent of the scene. The change detection is implemented based on the three components: brightness, greenness and wetness	Reduces data redundancy between bands and emphasizes different information in the derived components. KT is scene independent.	Difficult to interpret and label change information, cannot provide a complete change matrix; requires determining thresholds to identify the changed areas. Accurate atmospheric calibration for each date of image is required	Monitoring forest mortality (Collins and Woodcock 1996), monitoring green biomass change (Coppin <i>et al.</i> 2001) and land-use change (Seto <i>et al.</i> 2002)	2	Analyst's skill is needed in identifying which component best represents the change and selecting thresholds
9. Gramm-Schmidt (GS)	The GS method orthogonalizes spectral vectors taken directly from bi-temporal images, as does the original KT method, produces three stable components corresponding to multi-temporal analogues of KT brightness, greenness and wetness, and a change component	The association of transformed components with scene characteristics allows the extraction of information that would not be accessible using other change detection techniques	It is difficult to extract more than one single component related to a given type of change. The GS process relies on selection of spectral vectors from multi-date image typical of the type of change being examined	Monitoring forest mortality (Collins and Woodcock 1994, 1996)	3	Initial identification of the stable subspace of the multi-date data is required

2374

D. Lu *et al.*

- | | | | | | | |
|------------------------------------|--|--|---|--|---|--|
| 10. Chi-square | $Y = (X - M)^T \Sigma^{-1} \times (X - M)$ <p>Y: digital value of change image,
X: vector of the difference of the six digital values between the two dates, M: vector of the mean residuals of each band, T: transverse of the matrix, Σ^{-1}: inverse covariance matrix of the six bands</p> | Multiple bands are simultaneously considered to produce a single change image. | The assumption that a value of $Y=0$ represents a pixel of no change is not true when a large portion of the image is changed. Also the change related to specific spectral direction is not readily identified | Urban environmental change (Ridd and Liu 1998) | 3 | Y is distributed as a Chi-square random variable with p degrees of freedom (p is the number of bands) |
| Category III. Classification | | | | | | |
| 11. Post-classification comparison | Separately classifies multi-temporal images into thematic maps, then implements comparison of the classified images, pixel by pixel | Minimizes impacts of atmospheric, sensor and environmental differences between multi-temporal images; provides a complete matrix of change information | Requires a great amount of time and expertise to create classification products. The final accuracy depends on the quality of the classified image of each date | LULC change (Brondizio <i>et al.</i> 1994, Dimyati <i>et al.</i> 1996, Mas 1997, Castelli <i>et al.</i> 1998, Miller <i>et al.</i> 1998, Mas 1999, Foody 2001), wetland change (Jensen <i>et al.</i> 1987, 1995, Munyati 2000) and urban expansion (Ward <i>et al.</i> 2000) | 2 | Selects sufficient training sample data for classification |

Table 1. (Continued)

Techniques	Characteristics	Advantages	Disadvantages	Examples	Level	Key factors
12. Spectral-temporal combined analysis	Puts multi-temporal data into a single file, then classifies the combined dataset and identifies and labels the changes	Simple and time-saving in classification	Difficult to identify and label the change classes; cannot provide a complete matrix of change information	Changes in coastal zone environments (Weismüller <i>et al.</i> 1977) and forest change (Soares and Hoffer 1994)	3	Labels the change classes
13. EM detection	The EM detection is a classification-based method using an expectation-maximization (EM) algorithm to estimate the <i>a priori</i> joint class probabilities at two times. These probabilities are estimated directly from the images under analysis	This method was reported to provide higher change detection accuracy than other change detection methods	Requires estimating the <i>a priori</i> joint class probability.	Land-cover change (Bruzzone and Serpico 1997b, Serpico and Bruzzone 1999)	3	Estimates the <i>a priori</i> joint class probability
14. Unsupervised change detection	Selects spectrally similar groups of pixels and clusters date 1 image into primary clusters, then labels spectrally similar groups in date 2 image into primary clusters in date 2 image, and finally detects and	This method makes use of the unsupervised nature and automation of the change analysis process	Difficulty in identifying and labelling change trajectories	Forest change (Hame <i>et al.</i> 1998)	3	Identifies the spectrally similar or relatively homogeneous units

2376

D. Lu *et al.*

15. Hybrid change detection	identifies changes and outputs results Uses an overlay enhancement from a selected image to isolate changed pixels, then uses supervised classification. A binary change mask is constructed from the classification results. This change mask sieves out the changed themes from the LULC maps produced for each date	This method excludes unchanged pixels from classification to reduce classification errors	Requires selection of thresholds to implement classification; somewhat complicated to identify change trajectories	LULC change (Pilon <i>et al.</i> 1988, Luque 2000), vegetation change (Petit <i>et al.</i> 2001) and monitoring eelgrass (MacLeod and Congalton 1998)	3	Selects suitable thresholds to identify the change and non-change areas and develops accurate classification results.
16. Artificial neural networks (ANN)	The input used to train the neural network is the spectral data of the period of change. A back-propagation algorithm is often used to train the multi-layer perceptron neural network model	ANN is a non-parametric supervised method and has the ability to estimate the properties of data based on the training samples	The nature of hidden layers is poorly known; a long training time is required. ANN is often sensitive to the amount of training data used. ANN functions are not common in image processing software	Mortality detection in Lake Tahoe Basin, California (Gopal and Woodcock 1996, 1999), land-cover change (Abuelgasim <i>et al.</i> 1999, Dai and Khorram 1999), forest change (Woodcock <i>et al.</i> 2001) urban change (Liu and Lathrop 2002)	5	The architecture used such as the number of hidden layers, and training samples

Table 1. (Continued)

Techniques	Characteristics	Advantages	Disadvantages	Examples	Level	Key factors
Category IV. Advanced models						
17. Li-Strahler reflectance model	The Li-Strahler canopy model is used to estimate each conifer stand crown cover for two dates of imageries separately. Comparison of the stand crown covers for two dates is conducted to produce the change detection results	This method combines the techniques of digital image processing of remotely sensed data with traditional sampling and field observation methods. It provides statistical results and maps showing the geometric distribution of changed patterns	This method requires a large number of field measurement data. It is complex and not available in commercial image processing software. It is only suitable for vegetation change detection	Mapping and monitoring conifer mortality (Macomber and Woodcock 1994)	5	Develops the stand crown cover images and identifies the crown characteristics of vegetation types
18. Spectral mixture model	Uses spectral mixture analysis to derive fraction images. Endmembers are selected from training areas on the image or from spectra of materials occurring in the study area or from a relevant spectral library. Changes are detected by comparing the 'before' and 'after'	The fractions have biophysical meanings, representing the areal proportion of each endmember within the pixel. The results are stable, accurate and repeatable	This method is regarded as an advanced image processing analysis and is somewhat complex	Land-cover change in Amazonia (Adams <i>et al.</i> 1995, Roberts <i>et al.</i> 1998), seasonal vegetation patterns using AVIRIS data (Ustin <i>et al.</i> 1998) and vegetation	5	Identifies suitable endmembers; defines suitable thresholds for each land-cover class based on fractions

2378

D. Lu *et al.*

	fraction images of each endmember. The quantitative changes can be measured by classifying images based on the endmember fractions			change using TM data (Rogan <i>et al.</i> 2002)	
19. Biophysical parameter method	Develops a biophysical parameter estimation model through integration of field measurements and remotely sensed data and estimates the parameter for the study area. The vegetation types are classified based on the biophysical parameter. The model is also transferred to other image data with different dates to estimate the selected parameters after reflectance calibration or normalization. Change detection is implemented through comparing the biophysical parameters	This method can accurately detect vegetation change based on vegetation physical structures	Requires great effort to develop the model and implement accurate image calibration to eliminate the difference in reflectance caused by different atmospheric and environmental conditions. Requires a large number of field measurement data. The method is only suitable for vegetation change detection	Tropical successional forest detection in Amazon basin (Lu 2001, Lu <i>et al.</i> 2002)	5 Develops relevant models for estimation of biophysical parameters and defines each vegetation class based on biophysical parameters

Table 1. (Continued)

Techniques	Characteristics	Advantages	Disadvantages	Examples	Level	Key factors
Category V. GIS						
20. Integrated GIS and remote sensing method	Incorporates image data and GIS data, such as the overlay of GIS layers directly on image data; moves results of image processing into GIS system for further analysis	Allows access of ancillary data to aid interpretation and analysis and has the ability to directly update land-use information in GIS	Different data quality from various sources often degrades the results of LULC change detection	LULC (Price <i>et al.</i> 1992, Westmoreland and Stow 1992, Mouat and Lancaster 1996, Slater and Brown 2000, Petit and Lambin 2001, Chen 2002, Weng 2002) and urban sprawl (Yeh and Li 2001, Prol-Ledesma <i>et al.</i> 2002)	4	The accuracy of different data sources and their registration accuracies between the thematic images
21. GIS approach	Integrates past and current maps of land use with topographic and geological data. The image overlaying and binary masking techniques are useful in revealing quantitatively the change dynamics in each category	This method allows incorporation of aerial photographic data of current and past land-use data with other map data	Different GIS data with different geometric accuracy and classification system degrades the quality of results	Urban change (Lo and Shipman 1990) and landscape change (Taylor <i>et al.</i> 2000)	4	The accuracy of different data sources and their registration accuracies between the thematic images

Category VI. Visual analysis

22. Visual interpretation	One band (or VI) from date1 image as red, the same band (or VI) from date2 image as green, and the same band (or VI) from date3 image as blue if available. Visually interprets the colour composite to identify the changed areas. An alternative is to implement on-screen digitizing of changed areas using visual interpretation based on overlaid images of different dates	Human experience and knowledge are useful during visual interpretation. Two or three dates of images can be analysed at one time. The analyst can incorporate texture, shape, size and patterns into visual interpretation to make a decision on the LULC change	Cannot provide detailed change information. The results depend on the analyst's skill in image interpretation. Time-consuming and difficulty in updating the results	Land-use change (Sunar 1998, Ulbricht and Heckendorff 1998), forest change (Sader and Winne 1992), monitoring selectively logged areas (Stone and Lefebvre 1998, Asner <i>et al.</i> 2002) and land-cover change (Slater and Brown 2000)	1	Analyst's skill and familiarity with the study area
---------------------------	--	--	--	--	---	---

Category VII. Other change detection techniques

- 23. Measures of spatial dependence (Henebry 1993)
- 24. Knowledge-based vision system (Wang 1993)
- 25. Area production method (Hussin *et al.* 1994)
- 26. Combination of three indicators: vegetation indices, land surface temperature, and spatial structure (Lambin and Strahler 1994b)
- 27. Change curves (Lawrence and Ripple 1999)
- 28. Generalized linear models (Morissette *et al.* 1999)
- 29. Curve-theorem-based approach (Yue *et al.* 2002)
- 30. Structure-based approach (Zhang *et al.* 2002)
- 31. Spatial statistics-based method (Read and Lam 2002)

ANNEXE II

BIBLIOGRAPHIE SUR LA DÉTECTION DE CHANGEMENT DU CHAPITRE 3

- Al-Khudhairi, D. H. A., I. Caravaggi et S. Giada. 2005. « Structural damage assessments from Ikonos data using change detection, object-oriented segmentation, and classification techniques ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 71, n° 7, p. 825-837.
- Alberga, Vito. 2009. « Similarity measures of remotely sensed multi-sensor images for change detection applications ». *Remote Sensing*, vol. 1, n° 3, p. 122-143.
- Bovolo, F., L. Bruzzone et S. Marchesi. 2007. « A Multiscale Technique for Reducing Registration Noise in Change Detection on Multitemporal VHR images ». In *International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images, 2007. MultiTemp 2007.* p. 1-6.
- Bovolo, F., L. Bruzzone et S. Marchesi. 2008. « A Context-Sensitive Technique Robust to Registration Noise for Change Detection in Very High Resolution Multispectral Images ». In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS IEEE International*. Vol. 3, p. III - 150 - III - 153.
- Bovolo, Francesca. 2009. « A multilevel parcel-based approach to change detection in very high resolution multitemporal images ». *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, n° 1, p. 33-37.
- Bovolo, Francesca, et Lorenzo Bruzzone. 2007. « A theoretical framework for unsupervised change detection based on change vector analysis in the polar domain ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, n° 1, p. 218-236.
- Bovolo, Francesca, Lorenzo Bruzzone, Luca Capobianco, Andrea Garzelli, Silvia Marchesi et Filippo Nencini. 2010. « Analysis of the effects of pansharpening in change detection on VHR images ». *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, n° Compendex, p. 53-57.
- Bruzzone, Lorenzo. 2000. « Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 38, n° 3, p. 1171-1182.
- Bruzzone, Lorenzo, et Roberto Cossu. 2003. « An Adaptive Approach to Reducing Registration Noise Effects in Unsupervised Change Detection ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, n° 11 PART I, p. 2455-2465.

- Chesnel, A. L., R. Binet et L. Wald. 2008. « Damage Assessment on Buildings using Multisensor Multimodal Very High Resolution Images and Ancillary Data ». In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS IEEE International*. Vol. 3, p. III - 1252-III - 1255.
- Chini, Marco, Fabio Pacifici, William J. Emery, Nazzareno Pierdicca et Fabio Del Frate. 2008. « Comparing statistical and neural network methods applied to very high resolution satellite images showing changes in man-made Structures at Rocky flats ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, n° 6, p. 1812-1821.
- Chunlei, Huo, Chen Keming, Zhou Zhixin, Lu Hanqing, Cheng Jian et Liu Qingshan. 2008. « A multilevel contextual approach to change detection for very high resolution images ». In *2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - Proceedings, July 6, - July 11*, 1. Vol. 4, p. IV185-IV188. Boston, MA, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Flores, E. Sanchez, et S. R. Yool. 2007. « Sensitivity of change vector analysis to land cover change in an arid ecosystem ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 28, n° 5, p. 1069-1088.
- Hame, T., I. Heiler et J. S. Miguel-Ayanz. 1998. « An unsupervised change detection and recognition system for forestry ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n° 6, p. 1079-1099.
- Huo, Chunlei, Zhixin Zhou, Qingshan Liu, Jian Cheng, Hanqing Lu et Keming Chen. 2008. « Urban change detection based on local features and multiscale fusion ». In, 1. Vol. 3, p. III1236-III1239. Coll. « International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) ». Boston, MA, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Laneve, G., E. G. Cadau et D. De Rosa. 2007. « Change detection analysis on time series of satellite images with variable illumination conditions and spatial resolution ». In. Coll. « Proceedings of MultiTemp 2007 - 2007 International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images ». Leuven, Belgium: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.

- Leckie, D. G., N. Walsworth, J. Dechka et M. Wulder. 2002. « An investigation of two date unsupervised classification in the context of a national program for Landsat based forest change mapping ». In *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2002, 24-28 June 2002*. Vol. vol.3, p. 1307-11. (Cat. No.02CH37380) ». Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Marchesi, Silvia, Francesca Bovolo et Lorenzo Bruzzone. 2010. « A context-sensitive technique robust to registration noise for change detection in VHR multispectral images ». *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 19, n° 7, p. 1877-1889.
- Moser, Gabriele, Farid Melgani, Sebastiano B. Serpico et Alessandro Caruso. 2002. « Partially supervised detection of changes from remote sensing images ». In. Vol. 1, p. 299-301. Coll. « International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) ». Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Mura, Mauro Dalla, Jon Atli Benediktsson, Francesca Bovolo et Lorenzo Bruzzone. 2008. « An unsupervised technique based on morphological filters for change detection in very high resolution images ». *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, n° 3, p. 433-437.
- Niemeyer, Irmgard, Prashanth Reddy Marpu et Sven Nussbaum. « Change detection using the object features ». In *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2007, June 23, 2007 - June 28, 2007*. p. 2374-2377. Barcelona, Spain: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Pacifici, F., et F. Del Frate. 2010. « Automatic change detection in very high resolution images with pulse-coupled neural networks ». *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, n° 1, p. 58-62.
- Patra, Swarnajyoti, Susmita Ghosh et Ashish Ghosh. 2007a. « Semi-supervised learning with multilayer perceptron for detecting changes of remote sensing images ». In *2nd International Conference on Pattern Recognition and Machine Intelligence, PReMI 2007, December 18, - December 22*. Vol. 4815 LNCS, p. 161-168. Coll. « Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) ». Kolkata, India: Springer Verlag.

- Patra, Swarnajyoti, Susmita Ghosh et Ashish Ghosh. 2007b. « Unsupervised change detection in remote-sensing images using one-dimensional Self-Organizing Feature Map neural network ». p. 141-142. « Proceedings - 9th International Conference on Information Technology, ICIT 2006 ». Piscataway, NJ 08855-1331, United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society.
- Weiming, Li, Li Xiaoming, Wu Yihong et Hu Zhanyi. 2006. « A Novel Framework for Urban Change Detection Using VHR Satellite Images ». In *18th International Conference on Pattern Recognition, 2006. ICPR 2006*. Vol. 2, p. 312-315.
- Yoon, Geun-Won, Young Bo Yun et Jong-Hyun Park. 2003. « Change Vector Analysis: Detecting of Areas Associated with Flood Using Landsat TM ». In *2003 IGARSS: Learning From Earth's Shapes and Colours, July 21, 2003 - July 25, 2003*. Vol. 5, p. 3386-3388. Coll. « International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) ». Toulouse, France: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Z. L. Hong, Q. S. Jiang, H. L. Dong, S. R. Wang and J. Li 2005. « An Improved FCM-Based Model for Urban Change Detection Using High-Resolution Remotely Sensed Images ». *International Society for Environmental Information Sciences*, Volume 3, p. 352-359.

BIBLIOGRAPHIE

- ACS, Advanced Computer Systems. 2010. *KAOS User's Manual 2.2.0*. Software Guide. Rome: ACS, 356 p.
- Alberga, V., M. Idrissa, V. Lacroix et J. Inglada. 2007a. « Comparison of similarity measures of multi-sensor images for change detection applications ». In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS. IEEE International* (23-28 July). Barcelona, Spain. p. 2358-2361.
- Alberga, V., M. Idrissa, V. Lacroix et J. Inglada. 2007b. « Performance estimation of similarity measures of multi-sensor images for change detection applications ». In *2007 International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images, MultiTemp, July 18, - July 20*. « Proceedings of MultiTemp International Workshop on the Analysis of Multi-Temporal Remote Sensing Images ». Leuven, Belgium: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
- Alberga, V., M. Idrissa, V. Lacroix et J. Inglada. 2008. « Comparison of similarity measures of multi-sensor images for change detection applications ». p. 2358-2361. « International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) » (6 - 11 July). Boston, MA. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Alboody, Ahed, Florence Sedes et Jordi Inglada. 2008. « Post-classification and spatial reasoning: New approach to change detection for updating GIS database ». In. Coll. «3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, ICTTA ». Damascus, Syria: Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society.
- Aldred, D. A., et Jinfei Wang. 2011. « A method for obtaining and applying classification parameters in object-based urban rooftop extraction from VHR multispectral images ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, n° 10, p. 2811 - 2823.
- Alparone, Luciano, Lucien Wald, Jocelyn Chanussot, Claire Thomas, Paolo Gamba et Lori Mann Bruce. 2007. « Comparison of pansharpening algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S data-fusion contest ». Vol. 45, p. 3012-3021. « IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ».
- Ayoub, Francois, Sebastien Leprince, Renaud Binet, Kevin W. Lewis, Oded Aharonson et Jean-Philippe Avouac. 2008. « Influence of camera distortions on satellite image registration and change detection applications ». In *2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium - Proceedings, July 6, 2008 - July 11, 2008*, 1. Vol. 2, p. II1072-II1075. Coll. « International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) ». Boston, MA, United states: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.

- Bessis, J. L., J. Béquignon et A. Mahmood. 2004. « The International Charter "Space and Major Disasters" initiative ». *Acta Astronautica*, vol. 54, n° 3, p. 183-190.
- Beyer, Kevin, Jonathan Goldstein, Raghu Ramakrishnan et Uri Shaft. 1999. « When Is "Nearest Neighbor" Meaningful? ». In *ICDT '99: Proceeding of the 7th International Conference on Database Theory*. p. 217-235. Springer-Verlag.
- Bielski, Conrad, Simone Gentilini et Marco Pappalardo. 2011. « Post-Disaster Image Processing for Damage Analysis Using GENESI-DR, WPS and Grid Computing ». *Remote Sensing*, vol. 3, n° 6, p. 1234-1250.
- Bovolo, F., L. Bruzzone et S. Marchesi. 2009. « Analysis and Adaptive Estimation of the Registration Noise Distribution in Multitemporal VHR Images ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, n° 8, p. 2658-2671.
- Bovolo, Francesca, et Lorenzo Bruzzone. 2007. « A theoretical framework for unsupervised change detection based on change vector analysis in the polar domain ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, n° 1, p. 218-236.
- Bovolo, Francesca, Lorenzo Bruzzone, Luca Capobianco, Andrea Garzelli, Silvia Marchesi et Filippo Nencini. 2010. « Analysis of the effects of pansharpening in change detection on VHR images ». *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 7, n° Compendex, p. 53-57.
- Chesnel, A. L., R. Binet et L. Wald. 2008. « Damage Assessment on Buildings using Multisensor Multimodal Very High Resolution Images and Ancillary Data ». In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS. IEEE International*. Vol. 3, p. III - 1252 - III - 1255.
- Christophe, E., et J. Inglada. 2009. « Open Source Remote Sensing: Increasing the Usability of Cutting-Edge Algorithms ». *IEEE Geoscience and Remote Sensing Newsletter*, n° 150 (March), p. 9-15.
- Coppin, P., I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys et E. Lambin. 2004. « Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n° 9, p. 1565 - 1596.
- Costache, Mihai, Henri Maître et Mihai Datcu. 2007. *Categorization based Relevance Feedback Search Engine for Earth Observation Images Repositories*. Paris: Télécom ParisTech, 4 p.

- Dai, X., et S. Khorram. 1998a. « Requirements and techniques for an automated change detection system ». In *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, IGARSS '98. IEEE International* (6-10 Jul 1998). Seattle, WA. Vol. 5, p. 2752-2754 vol.5.
- Dai, Xiaolong, et Siamak Khorram. 1998b. « Effects of image misregistration on the accuracy of remotely sensed change detection ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, n° 5 pt 1, p. 1566-1577.
- Datcu, M., S. D'Elia, R. L. King et L. Bruzzone. 2007. « Introduction to the Special Section on Image Information Mining for Earth Observation Data ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, n° 4, p. 795-798.
- Datcu, M., K. Seidel et M. Walessa. 1998. « Spatial information retrieval from remote-sensing images. I. Information theoretical perspective ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 36, n° 5, p. 1431-1445.
- de Pinho, Carolina Moutinho Duque, Leila Maria Garcia Fonseca, Thales Sehn Korting, Cláudia Maria de Almeida et Hermann Johann Heinrich Kux. 2012. « Land-cover classification of an intra-urban environment using high-resolution images and object-based image analysis ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 33, n° 19, p. 5973-5995.
- Dekker, Rob, Claudia Kuenzer, Manfred Lehner, Peter Reinartz, Irmgard Niemeyer, Sven Nussbaum, Viciane Lacroix, Vito Sequeira, Elena Stringa et Elisabeth Schöpfer. 2009. « Change Detection Tools Remote Sensing from Space ». p. 119-140. Springer Netherlands.
- Deng, Meixia. 2009. « Facilitating data-intensive education and research in Earth science through geospatial Web services ». Maîtrise, United States -- Virginia, George Mason University.
- Duda, Kenneth A., et Brenda K. Jones. 2011. « USGS Remote Sensing Coordination for the 2010 Haiti Earthquake ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 77, n° 9 (September), p. 899-908.
- Duda, Richard O., Peter E. Hart et David G. Stork. 2001. *Pattern classification*: John Wiley & Sons.
- Hwang, W. S., et J. Weng. 2000. « Hierarchical discriminant regression ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 22, n° 11, p. 1277-1293.

- Inglada, J., et E. Christophe. 2009. « The Orfeo Toolbox remote sensing image processing software ». In *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2009 IEEE International, IGARSS 2009* (12-17 July 2009). Vol. 4, p. IV-733-IV-736.
- Inglada, Jordi. 2002. « Similarity measures for multisensor remote sensing images ». Vol. 1, p. 104-106. « International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) ». Toronto, Ont., Canada: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.
- Inglada, Jordi, et Alain Giros. 2004. « On the possibility of automatic multisensor image registration ». *2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARS'03): Learning From Earths Shapes and Colors*, 10. Vol. 42, p. 2104-2120. « IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ».
- Juyang, Weng, et Hwang Wey-Shiuan. 2001. « Incremental hierarchical discriminant regression for online image classification ». *Sixth International Conference on Document Analysis and Recognition. Proceedings..* p. 476-480.
- Juyang, Weng, et Hwang Wey-Shiuan. 2007. « Incremental Hierarchical Discriminant Regression ». *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 18, n° 2, p. 397-415.
- Leprince, Sebastien, Pablo Muse et Jean-Philippe Avouac. 2008. « In-flight CCD distortion calibration for pushbroom satellites based on subpixel correlation ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, n° 9, p. 2675-2683.
- Lu, D., P. Mausel, E. Brondizio et E. Moran. 2004. « Change detection techniques ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 25, n° 12, p. 2365-2401.
- Luo, Bin, Jean-François Aujol, Yann Gousseau et Henri Maître. 2007. *Cartographie des échelles d'une image satellitaire*. Paris: Télécom ParisTech, 4 p.
- Massip, Pierre, Philippe Blanc et Lucien Wald. 2011. « A Method to Better Account for Modulation Transfer Functions in ARSIS-Based Pansharpening Methods ».
- Milligan, Glenn. 1980. « An examination of the effect of six types of error perturbation on fifteen clustering algorithms ». *Psychometrika*, vol. 45, n° 3, p. 325-342.
- Milligan, Glenn. 1981. « A monte carlo study of thirty internal criterion measures for cluster analysis ». *Psychometrika*, vol. 46, n° 2, p. 187-199.
- Milligan, Glenn, et Martha Cooper. 1985. « An examination of procedures for determining the number of clusters in a data set. ». *Psychometrika*, vol. 50, n° 2, p. 159-179.
- Nicolas, J. M. 2009. *Les Bases de l'Imagerie Satellitaire: Notes du Cours SI345 : Module ISAT* (Mai 2009). Paris TELECOM ParisTech, 113 p.

- Nicolas , Jean Marie, Tupin ,F. 2009. *L'Imagerie Radar à Synthèse d'Ouverture : Notes du Cours UE SI345 : Module ISAT*. (Mai 2009). Paris: TELECOM ParisTech, 75 p.
- OTB, Development Team. 2009. *The ORFEO Tool Box Software Guide version 3.0*. Software Guide. Toulouse: CNES, 670 p.
- Perez, Luis Ernesto. 2008. « A Virtual Supermarket for Remote Sensing Data and Images ». Doctorat, United States -- Texas, The University of Texas at El Paso.
- Pu, Ruiliang, Shawn Landry et Qian Yu. 2011. « Object-based urban detailed land cover classification with high spatial resolution IKONOS imagery ». *International Journal of Remote Sensing*, vol. 32, n° 12, p. 3285-3308.
- Radke, R. J., S. Andra, O. Al-Kofahi et B. Roysam. 2005. « Image change detection algorithms: a systematic survey ». *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 14, n° 3, p. 294-307.
- Ranchin, Thierry, Bruno Aiazzi, Luciano Alparone, Stefano Baronti et Lucien Wald. 2003. « Image fusion—the ARSIS concept and some successful implementation schemes ». *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 58, n° 1–2, p. 4-18.
- Richards, J. A. 2005. « Analysis of remotely sensed data: the formative decades and the future ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 43, n° 3, p. 422-432.
- Rudorff, Bernardo Friedrich Theodor, Marcos Adami, Daniel Alves De Aguiar, Anibal Gusso, Wagner Fernando Da Silva et Ramon Morais De Freitas. 2009. « Temporal series of EVI/MODIS to identify land converted to sugarcane ». *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, July 12, July 17*. Vol. 4, p. IV252-IV255. Cape Town, South africa.
- Shan, Jie, Ronald Eguchi et Brenda Jones. 2011. « Special Issue: Haiti 2010 Earthquake ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 77, n° 9 (September), p. 883-884.
- Thomas, Claire, Thierry Ranchin, Lucien Wald et Jocelyn Chanussot. 2008. « Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics ». *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, n° 5, p. 1301-1312.
- Tiede, Dirk, Stefan Lang, Petra Füreder, Daniel Hölbling, Christian Hoffmann et Peter Zeil. 2011. « Automated Damage Indication for Rapid Geospatial Reporting ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 77, n° 9 (September), p. 933-942.

- Voigt, Stefan, Tobias Schneiderhan, André Twele, Monika Gähler, Enrico Stein et Harald Mehl. 2011. « Rapid Damage Assessment and Situation Mapping: Learning from the 2010 Haiti Earthquake ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 77, n° 9 (September), p. 923-931.
- Wald, L. 2000. « A Conceptual Approach To The Fusion Of Earth Observation Data ». *Surveys in Geophysics*, vol. 21, n° 2, p. 177-186.
- Wald, L., Thierry Ranchin, Marc Mangolini. 1997. « Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images. ». *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, n° 6 (juin), p. 691 - 699.