

Département de géographie et télédétection  
Faculté des lettres et des sciences humaines  
Université de Sherbrooke

**Utilisation de la télédétection, des SIG et de l'intelligence artificielle  
pour déterminer le niveau de susceptibilité aux mouvements de  
terrain : application dans les Andes de la Bolivie**

par  
Stéphane Péloquin, 1963 -

I-1667

Thèse présentée pour l'obtention du grade de  
Philosophiae Doctor (Ph.D.) en télédétection

Avril 1999

BIBLIOTHÈQUE U.S.

© Stéphane Péloquin, 1999



UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE

Collection spéciale UdeS

## Résumé

Péloquin, Stéphane (1999). Utilisation de la télédétection, des SIG et de l'intelligence artificielle pour déterminer le niveau de susceptibilité aux mouvements de terrain: application dans les Andes de la Bolivie. Thèse de doctorat, Département de géographie et télédétection, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke, 163 p.

L'enjeu socio-économique que représente l'impact des mouvements de terrain sur notre société devient de plus en plus important. Les pertes de vie et les pertes économiques qui y sont associées sont maintenant dix fois plus importantes de ce qu'elles étaient au début de la décennie. Dans l'espoir de réduire cet impact, il est essentiel de mettre de l'avant une politique préventive qui favorise la cartographie des niveaux de susceptibilité aux mouvements de terrain (NSMT) dans les zones à risques. Cependant, cette tâche est complexe et, pour l'instant, seuls les experts y parviennent avec une précision adéquate. Afin que ces travaux puissent être réalisés par un plus grand nombre d'individus, nous avons mis sur pied un système expert appelé EXPERIM qui utilise les données de télédétection et les systèmes d'information géographique pour faciliter la production de cartes de NSMT, sans que les usagers assignés à ces tâches soient nécessairement experts de ce champs d'étude complexe. Cette thèse présente les résultats obtenus à partir de la stratégie adoptée pour la région de Cochabamba, en Bolivie. Le prototype développé est opérationnel et sera utilisé dans le cadre d'un programme de gestion des bassins versants dirigé par l'organisme coopératif PROMIC.

L'acquisition et la concrétisation des connaissances constituent le point tournant de cette recherche et les résultats obtenus représentent le cœur du système expert EXPERIM. Ces étapes stratégiques visent à établir les faits et les règles qui contrôlent les conditions de terrain caractéristiques de chacun des NSMT. Nous avons réussi à obtenir cette information en appliquant l'analyse discriminante binaire sur la carte des NSMT établie par un expert interprète pour une zone témoin, soit le bassin de la *Taquiña*, lequel possède des caractéristiques géoécologiques représentatives des 38 bassins versants qui l'entourent. Par cette méthode, nous avons pu établir un modèle de sensibilité permettant de recréer la carte des NSMT de l'expert avec un taux de succès de 89 % et de 78 % selon que deux ou trois NSTM sont requis. L'analyse du modèle révèle l'intime relation qui existe entre les évidences géologiques, géomorphologiques et topographiques en ce qui concerne la stabilité des pentes, tandis que les conditions de végétation semblent quant à elles plutôt indépendantes.

Afin de régionaliser la cartographie des NSMT aux bassins versants voisins, nous avons utilisé le potentiel de la télédétection pour cartographier la présence/absence de cinq évidences géoécologiques identifiées comme étant indispensables par le modèle, pour obtenir un taux de succès élevé. À cet effet, trois capteurs ont été évalués : TM, HRV/XS et RADARSAT. Afin d'augmenter la qualité des résultats de classification de chaque évidence, nous avons intégré les données satellitaires à la base de connaissances spatiales et avons appliqué les principes de la pré-classification hiérarchique à la sélection spectrale optimale établie pour chaque combinaison de bandes intra-image et interimage. Les résultats de cette analyse démontrent que l'image TM offre les résultats de classification les plus élevés et que la fusion entre les images ne procure pas une augmentation significative de la qualité de la classification, lorsque l'on considère les efforts de pré-traitements requis. En somme, les résultats finaux de la régionalisation démontrent que l'utilisation de la télédétection augmente de moins de 10 % l'incertitude liée à l'application du modèle de sensibilité dans les zones où seules les informations topographiques et les données satellitaires sont disponibles.

## Abstract

The socio-economic impact of mass movements for our society is getting more and more serious. The loss of lives and economic losses are now ten times greater than they were at the beginning of the decade. In the hope of reducing these impacts, it is essential to adopt a preventive policy that will encourage mapping of mass movement susceptibility level (MMSL) in critical zones. However, this task is complex and only experts using present techniques can provide satisfactory results. To make possible the production of these maps by a larger number of individuals, we have developed an expert system called EXPERIM that uses remote sensing data and geographic information systems to facilitate the complex tasks without requiring the user to be highly competent in this field of study.

This thesis presents the results obtained from a complete strategy developed for a region surrounding Cochabamba, Bolivia. The operational expert system prototype will soon be integrated within the watershed management program directed by the local executing organisation PROMIC. The knowledge acquisition and its expression in concrete terms constitute the principal axis of this research, while the results obtained are the heart of the EXPERIM expert system. These strategic steps aim to establish a knowledge base of data and rules that describe field conditions for each MMSL. We have been able to extract this information by using binary discriminant analysis of a MMSL map produced by an expert for a pilot zone called Cuenca Taquiña, which is geocologically representative of the 38 neighbouring watersheds. Using this technique, we were able to establish a sensitivity model that recreates the expert's map with a success rate of 89% and 78% when two or three MMS levels are used. Based on a detailed analysis of the susceptibility model it was evident that stability conditions are the result of the topographic, geologic and geomorphologic environments. The level of susceptibility was found to be independent of the vegetation condition.

In order to apply the model to the surrounding watersheds, we integrated remotely sensed data within the spatial database to map the presence/absence of five essential geocological units required by the susceptibility model. This was done using a hierarchical classification method. Three sensors were evaluated: Landsat, SPOT and RADARSAT. In the elaboration of this specific step, we evaluated the most efficient spectral band combinations within each image and between images for each of the five geocological units. For each of the land cover types, the analysis shows that LANDSAT constitutes the most powerful sensor to map these units and that image fusion does not provide significantly better results when compared to the extra amount of work that this requires. Using remote sensing data instead of field data or airphotograph interpretation in watersheds where only topographic data are available decreases the level of accuracy by less than 10%.

## Remerciements

C'est d'abord à Hugh Gwyn, mon directeur de thèse et mon ami très cher que je dirige mes premiers remerciements. D'abord pour sa franchise, sa vision, sa générosité et aussi pour toute la confiance qu'il a su m'accorder depuis le tout début. Nous avons ensemble formé une équipe, ce qui fut la clé de l'aboutissement de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier Lambert Rivard pour avoir accepté de partager mille fois son expérience et pour m'avoir transmis son charisme contagieux pour la télédétection et les sciences de la Terre.

À mes amis boliviens, j'adresse mes sincères remerciements à toute l'équipe de l'organisme PROMIC. Ils m'ont fourni de précieuses informations et un support logistique inégalé lors de chacune de mes visites. Je salue particulièrement Roberto Mendez, Martin Moll, Rodrigo Salinas, Omar Vargas, Bernardino Claire et Javier. J'aimerais aussi souligner la précieuse contribution du groupe CISTEL, tant pour leur appui scientifique que pour leurs nombreux efforts à rendre mes séjours plus agréables à chaque fois. Merci à Raúl Rico, Wilma Crespo, Javier Burges, Yerko Garcia et Johnny Torez.

Cette recherche a été appuyée financièrement par le Centre de recherche internationale de développement (CRDI) et le CRSNG (A4250). Grâce à leur soutien financier, j'ai pu poursuivre mon travail avec une grande liberté.

J'ai aussi eu la chance d'avoir à mes côtés Driss Haboudane et Pierre Lanciault tout au long de ces années. C'est grâce à eux que certains moments plus difficiles ont pu être traversés avec humour et que les grands moments ont pu être appréciés encore davantage.

Merci aussi à toute l'équipe du Département de géographie et de télédétection et du CARTEL. Merci à Jean-Marie Dubois et Hardy Granberg, toujours attentifs et respectueux du travail que l'on fait. Merci à Mingh Nguyen et à Paul-André Chassé qui, à plusieurs occasions, m'ont franchement dépanné.

Et puis finalement, j'aimerais remercier mon épouse Johane, qui a su acceptée mes petites angoisses et toute l'insécurité que cela peut engendrer. Merci à mes parents, Suzanne et Réjean pour leur soutien sans limite, à Marie et Martin pour leurs innombrables et concrets encouragements.

## Tables des matières

Membre de jury .....	i
Résumé .....	ii
<i>Abstract</i> .....	iv
Remerciements .....	v
Table des matières.....	vii
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux .....	xiii
Liste des annexes .....	xv

### 1: Introduction générale

<b>1.1. Enjeux socio - économiques</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Enjeux stratégiques de réduction des risques</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3. Objectifs et hypothèses</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4. Zone d'étude</b> .....	<b>7</b>
1.4.1. Zone témoin <i>Cuenca Taquiña</i> .....	9
1.4.2. Géologie du substratum rocheux et géologie structurale .....	11
1.4.3. Géologie des formations meubles et réseau de drainage .....	11
1.4.4. Climat, végétation et utilisation des sols.....	13
<b>1.5. Terminologie</b> .....	<b>15</b>
1.5.1. Mouvements de terrain, mouvement de masse, <i>landslide</i> .....	15
1.5.2. Risques, dangers, vulnérabilité, etc.....	16
<b>1.6. Organisation de la thèse</b> .....	<b>18</b>

### 2 : Cartographie des niveaux de susceptibilité aux mouvements de terrain : principes, techniques et méthodologie

<b>2.1. Introduction</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2. Principes de base de l'instabilité des versants</b> .....	<b>21</b>

<b>2.3. Notions de susceptibilité.....</b>	<b>26</b>
<b>2.4. Description et évaluation des méthodes classiques de cartographie des NSMT... 27</b>	
2.4.1. Méthodes inductives.....	29
2.4.2. Méthodes déductives .....	31
2.4.3. Méthodes numériques.....	32
<b>2.5. Incertitude associée à la cartographie des NSMT.....</b>	<b>34</b>
<b>2.6. Utilisation de la télédétection pour cartographier les NSMT .....</b>	<b>36</b>
<b>2.7. Utilisation des SIG pour cartographier les NSMT .....</b>	<b>37</b>
<b>2.8. Stratégie et étapes méthodologiques retenues pour développer un modèle de sensibilité .....</b>	<b>40</b>

### **3 : Extraction des connaissances et conception du modèle de sensibilité**

<b>3.1.Introduction.....</b>	<b>43</b>
<b>3.2.Cartographie des NSMT dans la Taquiña.....</b>	<b>44</b>
3.2.1. Étape I : cartographie des conditions géologiques et géomorphologiques.....	45
3.2.2. Étape II : conversion des conditions géoécologiques en classes de NSMT .....	46
3.2.3. Résultats et analyse de la carte des NSMT .....	47
<b>3.3. Méthodologie d'extraction et de concrétisation des connaissances .....</b>	<b>49</b>
<b>3.4. Structure organisationnelle de la base de connaissances globales .....</b>	<b>52</b>
3.4.1. Traitements préliminaires à l'intégration des thèmes principaux .....	53
3.4.2. Création et intégration des variables.....	55
3.4.3. Création des évidences binaires .....	55
<b>3.5. Présentation des informations intégrées à la base de connaissances globales ....</b>	<b>58</b>
3.5.1. Évidences reliées aux caractéristiques topographiques.....	58
3.5.2. Évidences reliées aux conditions de drainage.....	60
3.5.3. Évidences reliées aux conditions géoécologiques .....	60
<b>3.6. Analyse statistiques univariée de la base de connaissances globales .....</b>	<b>61</b>
3.6.1. Méthodologie retenue.....	61
3.6.2. Interprétation des résultats.....	66
<b>3.7. Analyse statistique multivariée de la base de connaissances globales .....</b>	<b>69</b>
3.7.1. Principes fondamentaux de l'analyse discriminante.....	72
3.7.2. Méthodologie d'application de l'analyse discriminante .....	76
3.7.3. Présentation des modèles de sensibilités obtenus pour chacun des scénarios considérés.....	79
3.7.4. Méthode de calcul du taux de succès et analyse des résultats.....	79

<b>3.8. Résultats cartographiques et interprétation .....</b>	<b>85</b>
<b>3.9. Synthèse .....</b>	<b>87</b>

#### **4 : Intégration de la télédétection dans l'étude régionale des NSMT**

<b>4.1. Introduction .....</b>	<b>89</b>
<b>4.2. Description et organisation de la base de données images .....</b>	<b>91</b>
4.2.1. Caractéristiques générales des données satellitaires utilisées .....	91
4.2.2. Pré-traitements numériques de base .....	92
4.2.3. Corrections géométriques .....	94
<b>4.3. Fusion des images multisources .....</b>	<b>95</b>
<b>4.4. Intégration des données images à la base de connaissances globales .....</b>	<b>98</b>
<b>4.5. Stratégie d'intégration des données auxiliaires pour améliorer les résultats de classification d'images .....</b>	<b>100</b>
4.5.1. Hiérarchisation et calculs des probabilités <i>a priori</i> .....	101
4.5.2. Sélection spectrale contextuelle optimale .....	106
4.5.3. Réalité terrain spectrale et sites d'entraînement .....	110
<b>4.6. Résultats et interprétation .....</b>	<b>112</b>
<b>4.7. Incidence de l'utilisation de la télédétection sur les résultats obtenus à partir du modèle de sensibilité .....</b>	<b>115</b>
<b>4.8. Synthèse .....</b>	<b>118</b>

#### **5 : Développement du système expert EXPERIM**

<b>5.1. Introduction .....</b>	<b>119</b>
<b>5.2. Procédure de régionalisation de la cartographie des NSMT .....</b>	<b>121</b>
<b>5.3. Les systèmes experts .....</b>	<b>123</b>
<b>5.4. Les systèmes experts d'information géographique .....</b>	<b>125</b>
<b>5.5. Composantes et architecture classique .....</b>	<b>126</b>
5.5.1. La base de connaissances .....	126
5.5.2. Le module d'inférence .....	129

5.5.3. L'interface.....	129
<b>5.6. Exemples de SE opérationnels.....</b>	<b>130</b>
<b>5.7. Concept de base et développement de EXPERIM.....</b>	<b>130</b>
<b>5.8. Outils de développement retenus .....</b>	<b>134</b>
<b>5.9. Architecture de EXPERIM.....</b>	<b>135</b>
5.9.1. Base de connaissances .....	135
5.9.2. Le module d'inférence.....	139
5.9.3. Interface de EXPERIM .....	140
<b>5.10. Synthèse.....</b>	<b>140</b>
<b>6 : Conclusions et recommandations</b>	
<b>6.1. Conclusions .....</b>	<b>142</b>
<b>6.2. Recommandations .....</b>	<b>145</b>
<b>Références .....</b>	<b>147</b>

## Liste des figures

1.1. Emplacement de la zone d'étude. La zone ombragée, située en mortaise correspond à l'emplacement de la <i>Cuenca Taquiña</i> .....	8
1.2. Caractéristiques topographiques de la <i>Cuenca Taquiña</i> . (a) relief ombragé; (b) modèle numérique d'altitude .....	10
1.3. Carte des conditions géologiques et géomorphologiques .....	12
1.4. Carte des conditions de végétation et d'utilisation des sols .....	12
2.1. Représentation des forces qui agissent sur un versant .....	22
2.2. Description et représentation schématique des différents types de mouvements de terrain .....	25
2.3. Stratégie méthodologique retenue .....	42
3.1. Composante de la légende de l'interprétation géologique .....	46
3.2. Carte des NSMT de la <i>Taquiña</i> selon les connaissances de l'interprète .....	48
3.3. Schéma méthodologique d'extraction et de concrétisation des connaissances .....	52
3.4. Organisation hiérarchique du contenu de la base de connaissances globales .....	54
3.5. Méthode de reclassification des variables .....	56
3.6. Représentation binaire finale des couches d'information .....	57
3.7. Représentation cartographique binaire et caractéristiques statistiques reliées aux évidences topographiques .....	66
3.8. Représentation cartographique binaire et caractéristiques statistiques reliées aux évidences des conditions de drainage .....	67
3.9. Représentation cartographique binaire et caractéristiques statistiques reliées aux évidences géoécologiques .....	68
3.10. Relation entre les groupes et les variables .....	73
3.11. Contenu en informations de chacun des scénarios considérés .....	77
3.12. Résultats de classification selon le scénario considéré et le nombre de NSMT .....	83

3.13. Performance du modèle pour établir la distribution spatiale de chacun des NSMT .....	84
3.14. Comparaison entre la carte produite par l'expert et la carte obtenue en modèle de appliquant le sensibilité.....	86
4.1. Organigramme de la méthodologie de fusion d'image .....	97
4.2. Méthodologie de classification retenue .....	102
4.3. Représentation cartographique des masques et caractéristiques statistiques .....	107
4.4. Organigramme de la méthodologie de sélection spectrale optimale.....	108
4.5. Méthodologie d'évaluation de sélection spectrale optimale.....	110
4.6. Évaluation de l'incertitude du modèle selon le ou les capteurs utilisés.....	117
5.1. Méthode de régionalisation .....	122
5.2. Inventaire des SE opérationnels selon le champs d'application.....	125
5.3. Structure classique des SE .....	127
5.4. Structure organisationnelle de EXPERIM .....	136

## Liste des tableaux

1.1. Superficie de chacune des classes d'utilisation des sols .....	14
2.1. Classification des mouvements de terrain .....	24
2.2. Travaux classiques utilisant la méthode inductive .....	30
2.3. Exemples de travaux utilisant la télédétection .....	38
2.4. Travaux de cartographie des NSMT utilisant les SIG .....	40
3.1. Caractéristiques des classes de NSMT retenues par l'expert .....	48
3.2. Liste des variables et des évidences reliées aux caractéristiques topographiques .....	62
3.3. Liste des variables et évidences reliées aux caractéristiques de drainage .....	63
3.4. Liste des variables et évidences rattachées aux caractéristiques géoécologiques .....	62
3.5. Classification des évidences topographiques selon leur force discriminante .....	70
3.6. Classification des évidences reliées aux caractéristiques de drainage selon leur force discriminante .....	70
3.7. Classification des évidences géoécologiques selon leur force discriminante .....	71
3.8. Informations retenues pour chacun des scénarios considérés .....	78
3.9. Classification des évidences topographiques selon leur force discriminante .....	78
3.10. Modèle de sensibilité établi pour chaque scénario considéré .....	80
3.11. Description des modèles de sensibilités pour chaque scénario .....	82
4.1. Caractéristiques techniques et impressions visuelles des images satellitaires utilisées .....	93
4.2. Matrice de corrélation .....	99
4.3. Description des règles décisionnelles pour créer les masques d'évidence .....	105
4.4. Résultats de classification des évidences à partir des meilleures combinaisons intra et interimages .....	113
5.1. Différences entre les systèmes experts et les logiciels conventionnels .....	123

5.2. Exemples de SE opérationnels .....131

**Liste des annexes**

Annexe 1. Document de travail de l'expert antécédent à la cartographie des NSMT .....	162
Annexe 2. Emplacement des sites de vérification terrain .....	163

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

## 1.1. Enjeux socio-économiques

En moins de 40 ans, la population mondiale a doublé et les pertes de vie annuelles causées par les catastrophes géologiques naturelles ont décuplé (Bruce, 1993). Cette augmentation brusque est en partie reliée à une plus forte densité de population dans les zones géomorphologiques instables, mais aussi par l'absence d'information concernant la localisation des secteurs sensibles (Rosenfeld, 1994). Ces informations sont notamment absentes dans les pays en voie de développement où les pertes économiques causées par ces phénomènes atteignent parfois 2 % du produit national brut et où l'on compte plus de 95 % des pertes de vie annuelles (Hansen, 1984).

Bien que les mouvements de terrain puissent être très dévastateurs et être considérés quelques fois comme de véritables catastrophes naturelles, ils sont habituellement de petites tailles, très localisés et, individuellement, ils n'engendrent que peu d'incidents. Cependant, le phénomène des mouvements de terrain est très répandu et caractérise presque tout environnement montagneux lequel, selon un estimé de Gerrard (1990), constitue environ 36 % de la surface terrestre émergée. En conséquence, leur impact cumulé est très important et représente économiquement le phénomène naturel le plus destructeur après les tremblements

de terre. Selon Schuster (1996), les pertes économiques annuelles mondiales reliées à ce phénomène sont de l'ordre de 25 milliards de dollars, dont 75 % de celles-ci sont réparties dans les pays riches, là où se situent les infrastructures coûteuses. Malheureusement, tout indique que ces pertes sont en constante progression, compte tenu de l'activité d'urbanisation grandissante, de l'augmentation de la déforestation (Swanson and Dyrness, 1975) et de l'augmentation locale de l'intensité des précipitations due au réchauffement planétaire (Hively, 1988; Evans and Clague, 1994).

## **1.2. Enjeux stratégiques de réduction des risques**

Les mouvements de terrain sont issus d'une combinaison complexe de plusieurs facteurs naturels incontrôlables et imprévisibles. Bien que des efforts substantiels aient été consacrés à l'étude de ces phénomènes depuis les 30 dernières années, aucun expert ou scientifique ne peut encore établir avec certitude les conditions de stabilité d'une région. Paradoxalement, la société moderne maintient le réflexe, et avec de plus en plus de vigueur, d'exiger une protection entière contre ces phénomènes. Cette attitude fait nécessairement fi des lois et des conditions qui gouvernent la mise en place de ces catastrophes (Leroi, 1996). Cette protection totale et complète exigée implique nécessairement que les mouvements de terrain soient caractérisés de manière très explicite, de telle sorte que l'on puisse fournir des réponses aux questions suivantes :

- Où sont localisées les zones instables ?
- Quels types de mouvements seront impliqués ?
- À quel moment le mouvement se produira ?
- Quelle sera la superficie affectée ?
- Quels seront les impacts économiques engendrés par le phénomène ?

Malheureusement, il demeure toujours difficile, voire impossible, de répondre avec exactitude à ces questions (Leroi, 1996) puisque l'état des connaissances actuelles

se limite à l'estimation de la sensibilité d'un secteur, c'est-à-dire à la localisation dans l'espace d'un certain nombre de classes de sensibilité. Les modèles existants ne permettent pas non plus d'estimer le facteur temporel ou encore de prédire l'ampleur et l'impact (Einstein, 1988).

Cependant, il n'est pas nécessaire de connaître tous ces détails pour améliorer la situation actuelle. Une simple cartographie des différentes zones de sensibilité constitue, en soi, un pas important et un élément essentiel pour accroître l'état de la sécurité civile concernant ces événements (Leroi, 1996 ; Schuster, 1996). Ces informations sauraient profiter aux décideurs pour réglementer l'accès à certains secteurs et créer des plans de développement dirigés en fonction des conditions de sensibilité connues. Cette stratégie va dans le sens des conclusions tirées à la suite de l'assemblée générale des Nations Unis où les années 90 furent inaugurées comme la « Décade pour la réduction des risques naturels » et où il est souligné que chaque pays à risque doit se munir de ces renseignements à une échelle égale ou plus grande au 1:50 000. À l'heure actuelle, peu de pays possèdent ces renseignements.

Toutefois, de par la nature du phénomène et des méthodologies existantes, l'adoption de cette politique correspond à un investissement important des pays intéressés pour les raisons principales suivantes :

- l'identification des niveaux de susceptibilité aux mouvements de terrain (NSMT) correspond à un problème décisionnel complexe qui requiert un niveau de connaissances et de compétences très élevé et détenu seulement par une poignée d'experts dont l'embauche est particulièrement onéreuse;
- la formation du personnel en place requiert des déboursés importants, sans que l'on puisse s'assurer que les individus formés pourront fournir la qualité des documents attendus;

- la production de cartes de NSMT est habituellement devancée par un inventaire complet des conditions géoécologiques de la région étudiée; cet inventaire se fait habituellement à partir de l'utilisation des photographies aériennes, combinée aux campagnes de terrain (Rib and Liang, 1978); bien que cette méthode soit encore très prisée, elle représente cependant des déboursés importants étant donné le coût des photographies aériennes et le temps requis pour en faire l'analyse.

Ces quelques raisons constituent de véritables obstacles à l'adoption d'une stratégie préventive et font hésiter plusieurs décideurs à mettre de l'avant une telle politique. Pour éviter que cette tendance ne soit maintenue, il est impératif d'identifier des solutions efficaces pour réduire les coûts liés à l'acquisition des informations de base et les coûts liés à la formation du personnel en place. Sans l'identification de solutions dans ce sens, il est impensable que la situation puisse s'améliorer et que l'adoption universelle d'une politique préventive demeure un souhait irréalisable pour les pays moins nantis qui, paradoxalement, sont souvent ceux qui sont les plus à risque.

### **1.3. Objectifs et hypothèses**

Tenant compte de la nature des faits et des besoins exposés précédemment, nous avons identifié un objectif préemptoire à notre recherche : rendre plus accessible la cartographie des NSMT par l'établissement d'une stratégie opérationnelle qui réduit les coûts implicites à l'adoption d'une politique préventive et qui permet de produire des résultats de qualité indépendamment du degré de connaissances des usagers assignés à ces tâches.

Cet objectif sera atteint par l'utilisation d'outils modernes, tels que les systèmes d'information géographique (SIG), les données satellitaires et les systèmes experts. Nous accordons d'autant plus d'intérêt à ces aspects, compte tenu des lacunes

importantes identifiées dans la littérature concernant l'utilisation de ces outils dans le cadre d'une problématique semblable (Dikau *et al.*, 1996).

Plus concrètement et de façon plus appliquée, l'objectif de nos travaux est de développer un système expert, appelé EXPERIM (système expert pour l'évaluation des risques aux mouvements de terrain), et qui permet à des utilisateurs, peu expérimentés dans les sciences de la Terre reliées aux géorisques, de produire des cartes de NSMT dans tous les bassins versants qui entourent la ville de Cochabamba en Bolivie. La finalité de nos travaux correspond à un système opérationnel qui sera utilisé par l'organisme principal responsable de la gestion de ces secteurs.

Durant le développement de EXPERIM, les objectifs spécifiques suivants seront atteints :

- développer et valider une méthode d'extraction des connaissances à partir d'une réalité terrain établie par un expert dans un bassin versant témoin, dont les caractéristiques géoécologiques sont représentatives des bassins versants avoisinants;
- développer et valider un modèle de sensibilité inspiré de méthodologies existantes et qui permettra de régionaliser la cartographie des NSMT aux bassins versants avoisinants;
- évaluer le potentiel de trois types de données satellitaires (XS de SPOT, TM de Landsat et RADARSAT), en remplacement des campagnes de terrain ou encore de l'interprétation des photographies aériennes, pour cartographier les conditions géoécologiques requises par le modèle de sensibilité; cette évaluation permet aussi d'établir le potentiel de chacun des types d'images, lorsque utilisées seules, fusionnées à d'autres images ou encore intégrées à la base de données auxiliaires;

- identifier la sélection spectrale optimale permettant d'obtenir la distribution spatiale la plus précise pour les unités géoécologiques requises par le modèle, à partir des images de télédétection disponibles;
- construire une base de connaissances complète qui intègre les faits et les règles permettant l'automatisation des tâches requises pour établir la cartographie des NSMT, ceci en concert avec un système de traitement d'image et un SIG déjà existants.

En quoi ces résultats réduiront-ils les frais encourus par la production de cartes de NSMT ?

D'abord, la concrétisation des motivations de l'expert, lorsqu'il a établi les NSMT dans le bassin versant témoin, représente un ensemble de faits et de règles explicites, facilement transférables, qui évitent l'embauche d'un spécialiste pour réaliser l'ensemble du projet. Ensuite, l'utilisation opérationnelle des images satellitaires permet d'éviter l'achat coûteux de photographies aériennes et de faire des campagnes de terrain. Finalement, la création de EXPERIM permet d'éviter que le personnel assigné à ces tâches ait à recevoir une formation élaborée afin de pouvoir contrôler l'utilisation des SIG et des systèmes de traitements d'images.

En conséquence, l'ensemble de ces aspects aura pour effet de réduire significativement les coûts engendrés par la production de cartes de NSMT, ce qui nécessairement permettra à plusieurs décideurs d'emboîter le pas dans le sens d'une politique préventive.

Suite à cette liste d'objectifs, nous posons les hypothèses générales suivantes :

- les connaissances utilisées par l'expert pour établir les NSMT peuvent être déduites à l'aide de méthodes statistiques;

- les conditions de terrain responsables de l'instabilité des versants peuvent être identifiées à partir de photographies aériennes, d'images satellitaires ou encore déterminées à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (MNA);
- la démarche adoptée par un expert peut être imitée et reproduite par un système expert mis en liaison avec un SIG et un logiciel de traitements d'images.

#### **1.4. Zone d'étude**

La région retenue pour nos travaux se situe près de la ville de Cochabamba au centre de la Bolivie (figure 1.1). Classée troisième en importance au pays avec ses 750 000 habitants, Cochabamba est devenue, depuis les dix dernières années, victime d'une surpopulation sévère provoquée par l'abandon des activités minières dans les villes et villages voisins. Ce phénomène a eu pour effet d'amener de plus en plus d'individus à venir tenter leur chance pour y trouver du travail. Faute d'espace et malheureusement faute de travail, ces nouveaux arrivants ont choisi de cultiver la terre dans les nombreux bassins versants qui bordent la frontière Nord de la ville. Ces bassins versants sont caractérisés par un fort dénivelé et sont recouverts par d'épaisses séquences de sédiments meubles d'origine glaciaire. En conséquence, ils sont très instables et menaçant pour les populations locales ainsi que pour les résidents de la ville elle-même.

En réponse à cette situation sérieuse, un organisme coopératif bolivio-suisse a été mis sur pieds en 1991 afin d'identifier des moyens efficaces pour mieux gérer ces secteurs dangereux et riches en ressources renouvelables. Cet organisme appelé PROMIC (*Proyecto de Manejo Integral de Cuencas*) est composé d'une équipe multidisciplinaire très dynamique et est devenu le partenaire le plus important dans le développement de notre projet.

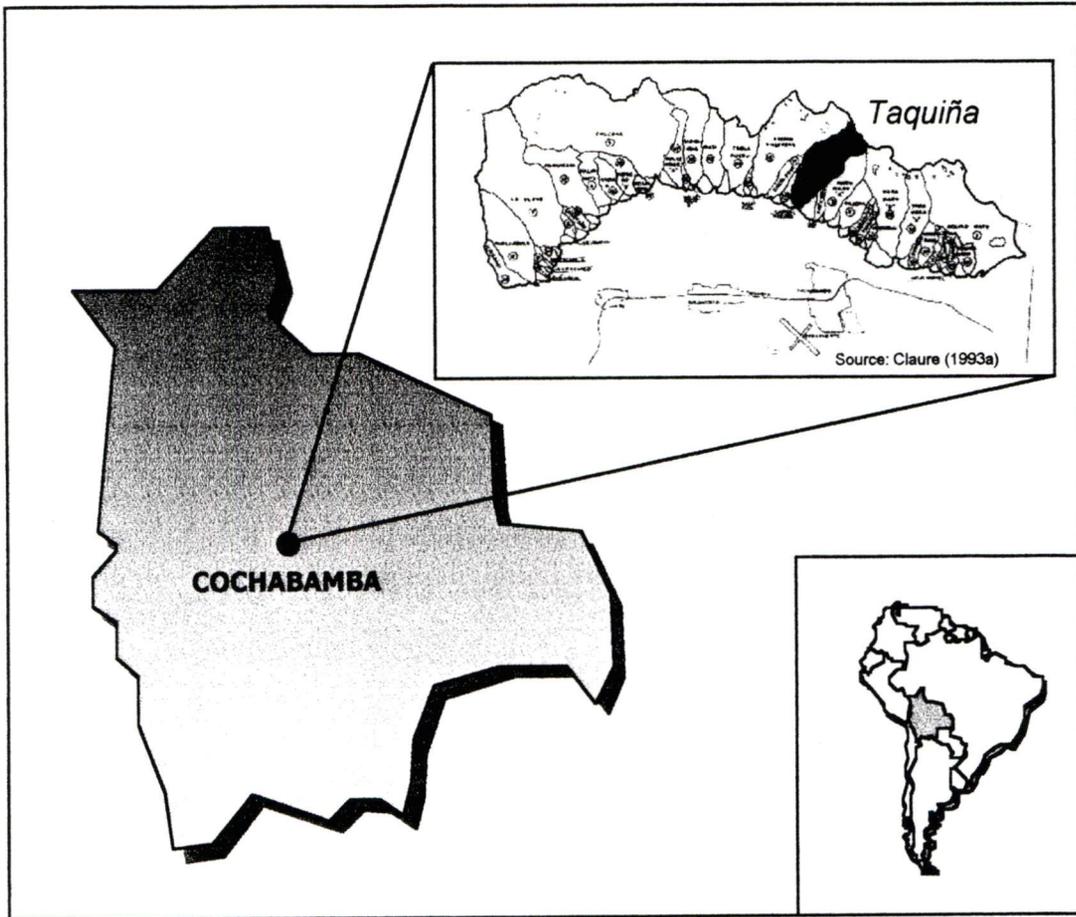


Figure 1.1. Emplacement de la zone d'étude. La zone ombragée située en mortaise correspond à l'emplacement de la *Taquiña*

Les premières activités de PROMIC ont été d'identifier un bassin versant témoin qui représente les conditions communes retrouvées dans les autres bassins versants de la région. Le bassin versant retenu est la *Taquiña* et a fait l'objet d'une campagne de cartographie géoécologique détaillée durant près de quatre ans. Nous avons eu la chance d'accéder librement à la totalité de la base de données spatiales durant ces années. Étant donné ces multiples avantages, nous avons aussi retenu la *Taquiña* comme la zone témoin pour nos recherches afin d'établir le modèle de sensibilité.

La section suivante présente une description détaillée du contexte géoécologique caractéristique de la *Taquiña*.

#### **1.4.1. Zone témoin *Taquiña***

La ville de Cochabamba est localisée sur un delta lacustre à une altitude de 2 350 m. La série de 39 sous-bassins versants disposée en demi-cercle et bordant la portion Nord de la ville, fait partie intégrante du bassin versant principal de *Tunari* qui à lui seul s'étend sur une superficie d'environ 650 km<sup>2</sup>. La zone témoin *Taquiña* correspond à un de ces bassins versants secondaires et possède une superficie d'environ 20 km<sup>2</sup>. Le point culminant de *Taquiña* est situé à une altitude de 4 550 m et le point le plus bas est situé à une altitude de 2 925 m (figure 1.2). Près de l'embouchure s'y trouve une brasserie, laquelle est alimentée en eau par le lac *Taquiña* localisé au sommet du bassin à 4 150 m et endigué naturellement par une moraine frontale bien préservée. En général, la topographie de *Taquiña* est accidentée et caractérisée par plusieurs zones de pentes abruptes qui, parfois, atteignent plus de 50°, surtout dans la partie centrale et dans la portion Ouest.

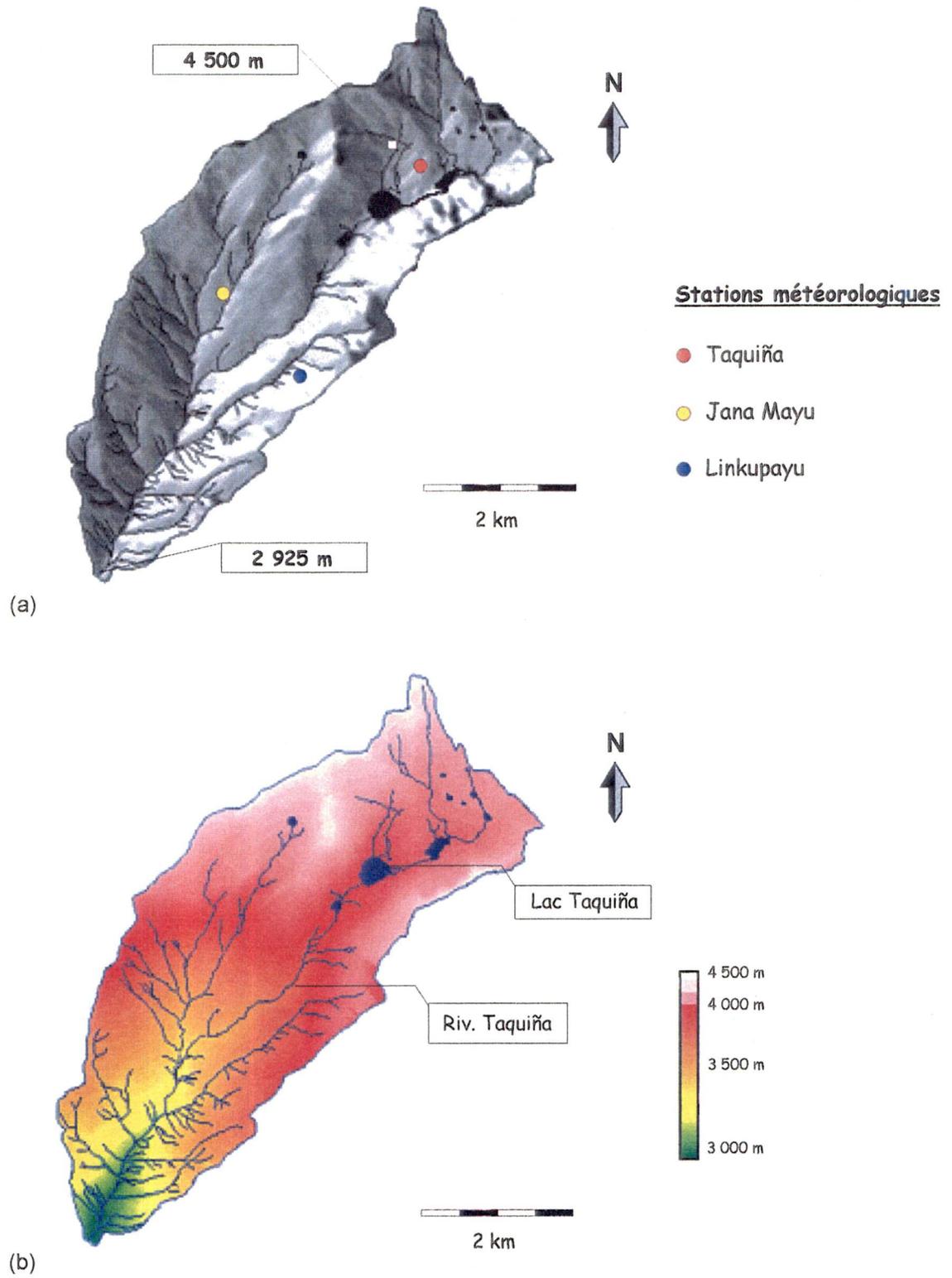


Figure 1.2. Caractéristiques topographiques de la *Taquiña* : a) relief ombragé ;  
b) modèle numérique d'altitude

#### **1.4.2. Géologie du substratum rocheux et géologie structurale**

Les formations rocheuses correspondent à trois lithologies de l'Ordovicien supérieur : les arénites, qui couvrent environ 45 % du territoire et retrouvées exclusivement dans la partie sommitale, les shales, localisés au centre et couvrant environ 35 % de la superficie et finalement les quartzites, situées près de l'embouchure, au pied du bassin (Claire *et al.*, 1994) (figure 1.3).

Toutes, ont une direction de 305° et ont un pendage vers le sud variant entre 24° et 39°. La majorité des affleurements rocheux identifiés correspond aux arénites. Cette lithologie présente un aspect lisse et arrondis témoignant l'érosion glaciaire particulièrement intense dans cette partie du bassin. Les affleurements de shales et de quartzites sont, quant à eux, plus discrets, étant enfouis sous les épaisses couches de dépôts glaciaires (till) qui commencent à se présenter à environ 3 600 m d'altitude. On note davantage leur présence sur les pentes abruptes qui bordent les cours d'eau, là où l'accumulation des sédiments est impossible.

À partir des photographies aériennes, on peut clairement identifier le réseau de fractures principales orientées est-ouest. Même si l'ensemble du réseau secondaire peut être observé dans l'ensemble du bassin, il est toutefois plus facile de le reconnaître dans la partie sommitale où les dépôts de surface sont absents. Son orientation est presque perpendiculaire au réseau principal et correspond, dans plusieurs des cas, à l'alignement des cours d'eau secondaires.

#### **1.4.3. Géologie des formations meubles et réseau de drainage**

Le modelé général du paysage est caractéristique d'une région autrefois englacée. Pour simplifier la description des conditions géomorphologiques que l'on y retrouve, nous avons divisé le bassin en deux grands ensembles (figure 1.3) :

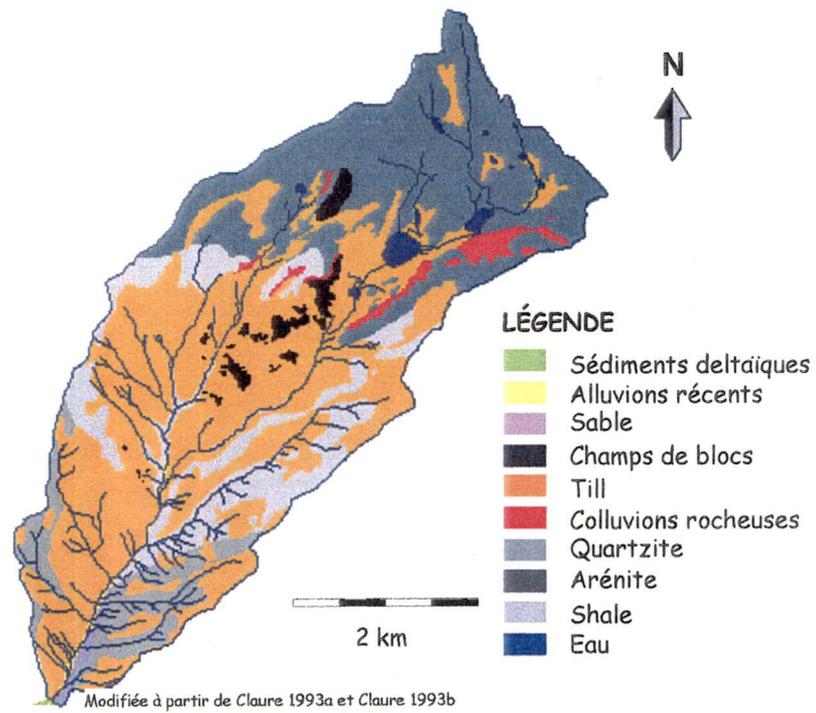


Figure 1.3. Carte des conditions géologiques et géomorphologiques

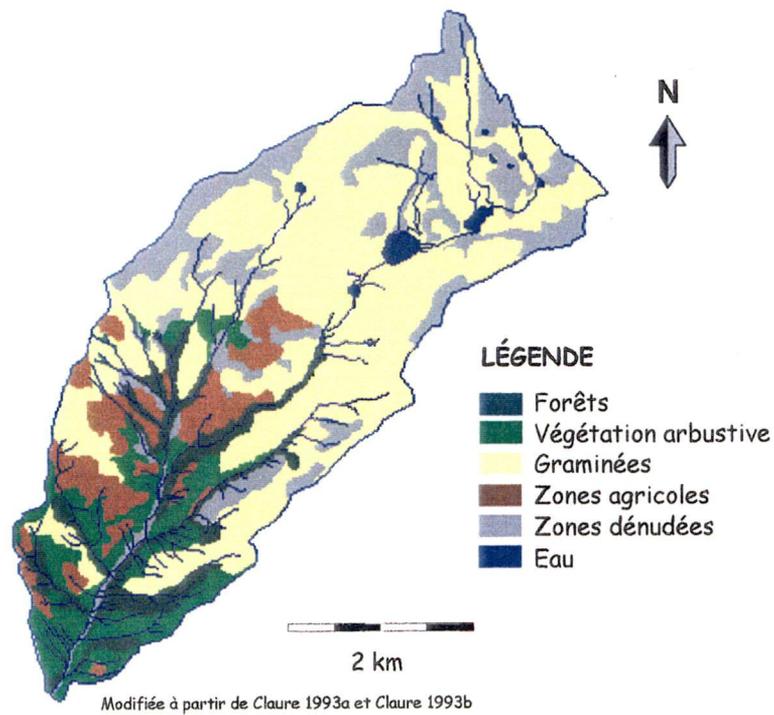


Figure 1.4. Carte des conditions de végétation et d'utilisation des sols

1. une zone d'érosion, localisée approximativement entre les altitudes 3 800 m et 4 550 m, qui correspond au secteur où les glaciations ont pris naissance (Clapperton, 1983). Cette zone est complètement dénudée, caractérisée par les différents tons de gris sur la figure 1.3, et où on y retrouve plusieurs marques d'érosion, comme des stries et des cannelures, sur les affleurements d'arénites; pratiquement aucun dépôt meuble n'est présent compte tenu de la génèse glaciaire caractérisant cette zone (Sugden and John, 1985);
2. une zone d'accumulation, qui débute à l'altitude 3 800 m et qui se poursuit vers le bas jusqu'à l'embouchure; elle est caractérisée par d'épaisses séquences de dépôts meubles, surtout des séquences de till (couleur orangé sur la figure 1.3), une moraine frontale; deux moraines latérales très bien préservées et, finalement, une séquence importante de sédiments fluvioglaciaires au pied du bassin; on y note aussi la présence de multiples zones d'érosion et de ravinements intenses à proximité de certains cours d'eau, aux endroits où l'épaisseur du till est plus importante.

Le patron de drainage est de type dendritique et significativement plus dense en moyenne altitude sur le versant Ouest que sur le versant Est. La rivière *Taquiña* correspond au cours d'eau principal (figure 1.2). Elle suit une ligne de faille importante perpendiculaire au réseau de failles régionales orienté est-ouest. Les cours d'eau secondaires suivent plutôt l'orientation régionale de la structure géologique.

#### **1.4.4. Climat, végétation et utilisation des sols**

La zone des bassins versants reçoit en moyenne 854 mm d'eau chaque année. La température moyenne varie entre  $-2^{\circ}\text{C}$  et  $27^{\circ}\text{C}$ . Selon la classification de Köpen, le climat est caractéristique de la classe climatique « tempéré - frais avec hiver sec ». Ces résultats sont obtenus de trois stations météorologiques installées dans le bassin versant depuis 1991 (figure 1.2).

La répartition des différentes classes de végétation retrouvées dans la *Taquiña* est présentée à la figure 1.4. Environ 60 % du bassin se caractérise par une couverture végétale de type graminée et plus de 25 % du territoire est complètement dénudé, ce qui correspond approximativement à la superficie de la zone d'érosion retrouvée en altitude (Salinas, 1995) (figure 1.4).

Les forêts indigènes d'eucalyptus ainsi que les zones arbustives se concentrent presque exclusivement sous l'altitude de 3 200 m, soit près de l'embouchure. Plus en altitude, ces mêmes forêts et arbustes se retrouvent davantage dans les quelques larges vallées secondaires existantes.

L'agriculture constitue l'activité principale dans la *Taquiña*. Sous les altitudes inférieures à 3 000 m, on y retrouve des parcelles cultivées principalement pour les pommes de terre et les céréales. Au-delà de ces altitudes, les activités agricoles occupent environ 57 % du territoire et se limitent au pâturage (tableau 1.1) et donc aux zones de graminées.

Tableau 1.1. Superficie de chacune des classes d'utilisation des sols

Unités de terrain	Superficie (%)
Pâturage / graminées	57
Roc / zones dénudées	18
Forêts	10
Agriculture	9
Eau	4
Végétation arbustive	1

## 1.5. Terminologie

Il est important que la terminologie reliée à l'étude des géorisques soit établie dès maintenant et que certaines précisions soient faites concernant les correspondances entre les termes anglophones et francophones qui souvent portent à confusion (Varnes, 1984).

### 1.5.1. Mouvements de terrain, mouvements de masse, *landslides* ?

Selon la terminologie officielle relative aux risques naturels (Tazieff, 1983), l'expression « mouvements de terrain » a été retenue et a supplanté l'expression « mouvement de sols », très en vogue dans les années 1970 et utilisée dans le cadre du projet national ZERMOS (zones exposées aux mouvements de sol) (Flageollet, 1989). Cette décision a été retenue pour la capacité des deux termes (mouvement et terrain) à englober toutes les formes de déplacements qui peuvent être identifiées.

L'équivalent anglophone de « mouvements de terrain » est *ground failure*, puisque à lui seul le terme populaire *landslide* n'inclut pas l'ensemble des mécanismes qu'intègre l'expression « mouvements de terrain ». En fait, un *landslide* est une catégorie de *ground failure* dont la force gravitaire est la principale force en jeu et dont le déplacement doit respecter une vitesse minimum. Par exemple, les effets de reptation sont exclus de cette catégorie. En conséquence, le terme *ground failure* a été retenu par le *National Research Council Committee on Ground Failure Hazard* (Canada) en 1984. Il n'en reste pas moins qu'on utilise sans distinction les termes *mass movement*, *landslide*, *slope movement* et *slope failure*.

### 1.5.2. Risques, dangers, vulnérabilité, etc.

Les concepts de risques, dangers et vulnérabilité sont à la base de la structure d'analyse des phénomènes naturels destructeurs et ont été définis par Varnes (1984) dans une étude commandée par l'UNESCO. On les utilise systématiquement dans presque toutes les publications. Cependant, aucune publication consultée ne présente une traduction rigoureuse de ces termes anglais qui sont définis ci-dessous. À cet effet, nous proposons une équivalence francophone et une justification des termes que nous avons retenus :

#### *Natural Hazard (H)*

Risque naturel : Correspond à la probabilité d'occurrence, à l'intérieure d'une période de temps et d'une zone définie, d'un phénomène naturel dommageable.

#### *Vulnerability (V)*

Vulnérabilité : Correspond au degré de perte d'un élément quelconque résultant d'un événement naturel destructeur d'une magnitude quelconque. La vulnérabilité est représentée sur une échelle allant de la valeur 0 (aucun dommage) à la valeur 1 (perte totale).

#### *Specific Risk (Rs)*

Impact : Correspond au degré de pertes prévues causées par un phénomène naturel particulier. Il peut être exprimé par le produit de H et V.

*Element at Risk (E)*

Élément vulnérable : Correspond à la population, aux propriétés, aux activités économiques, incluant les services publics, qui sont susceptible de subir un risque dans une zone particulière.

*Total Risk (Rt)*

Impact total : Correspond au nombre prévu de pertes de vie, de personnes blessées, de dommages aux propriétés, d'interruption des activités économiques, causés par un phénomène naturel quelconque. Il se calcule à partir de l'équation suivante :

$$R_t = (E) (R_s) = (E) (H*V)$$

Selon les dictionnaires courants, le terme « danger » pourrait être utilisé pour traduire *hazard*. Cependant, Einstein (1988) spécifie que le terme « danger » n'inclut pas nécessairement l'élément d'incertitude ou de prévision que comporte le terme *hazard*. On doit donc l'éviter afin de conserver le sens propre du concept. Dans une publication de Scanvic *et al.* (1992), on traite de « risques naturels », c'est à dire que le terme « risque » est employé pour traduire *hazard* et pour décrire l'incertitude d'occurrence d'un événement quelconque, comme on l'utilise dans la théorie des statistiques décisionnelles (Ioannou, 1984). Dans ces conditions, nous optons pour le terme équivalent « risque » pour décrire cet aspect. Le terme anglophone *risk* est utilisé pour représenter l'aspect monétaire ou celui qui permettra d'évaluer l'intensité des conséquences produites par un désastre naturel (Varnes, 1984); nous croyons que le terme « impact » caractérise bien le sens de ce concept. Enfin, puisque le terme « *vulnerability* » est utilisé pour décrire la fragilité des éléments soumis au danger, il nous apparaît acceptable d'utiliser son équivalent français « vulnérabilité ».

## 1.6. Organisation de la thèse

La thèse comporte six chapitres. Dans le premier chapitre discute de l'impact socio-économique engendré par les mouvements de terrain ainsi que des stratégies avantageuses qui doivent être adoptées pour en réduire les conséquences. Nous exposons à cet effet, les objectifs et les hypothèses de la thèse et nous décrivons les caractéristiques géoécologiques de l'emplacement de la zone d'étude où les travaux ont été réalisés. Finalement, la terminologie reliée à ce domaine est introduite afin que le lecteur puisse, dès le départ, être familier avec le vocabulaire utilisé dans ce document.

Afin de bien saisir la difficulté que représente la cartographie des mouvements de terrain en général, dans le chapitre 2, nous introduisons les principes de base de l'instabilité des versants ainsi que des méthodes classiques de cartographie des NSMT. Ces notions permettent de bien saisir les difficultés et les incertitudes que représentent ces techniques. Les résultats obtenus de la délimitation des NSMT dans la zone d'étude sont présentés et une méthodologie globale de conception du modèle de sensibilité est également proposée.

Au chapitre 3, les techniques d'extraction des connaissances sont abordées. Cette section correspond au centre nerveux de notre recherche. Elle démontre la possibilité de dégager et de concrétiser les connaissances implicites et l'expérience que l'expert a utilisée pour réaliser la carte des NSMT dans la *Taquiña*. Les efforts que nous avons investis en ce sens nous ont permis de créer un modèle de sensibilité concret et précis. La première partie de ce chapitre est dédiée à la description de la technique retenue et, dans la deuxième partie, nous présentons les résultats du modèle de sensibilité obtenu.

Puisque nous utilisons la télédétection comme source principale d'information pour régionaliser la cartographie des NSMT à l'ensemble des secteurs voisins de la zone

témoin, nous présentons, au chapitre 4, une évaluation complète du potentiel de ces données, ainsi que la stratégie retenue pour en tirer les plus grands avantages. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous estimons l'impact de l'utilisation de ces données sur le modèle de sensibilité. Ceci permet d'établir les valeurs d'incertitude associées à la création des cartes de NSMT générées durant l'étape de régionalisation.

Le chapitre 5 est entièrement consacré à la démarche et aux techniques utilisées pour créer le système expert EXPERIM. L'intérêt de la mise au point d'un système semblable et la stratégie que nous avons retenue pour le mettre sur pied sont discutés à l'intérieur de ce chapitre. Nous exposons ensuite la structure logique du système en décrivant chacune de ses composantes.

Enfin, dans le chapitre 6, nous présentons les conclusions générales de nos travaux ainsi que certaines recommandations concernant le développement de techniques avancées dans ce domaine précis d'application.

## 2

# CARTOGRAPHIE DES NIVEAUX DE SUSCEPTIBILITÉ AUX MOUVEMENTS DE TERRAIN : PRINCIPES, TECHNIQUES ET MÉTHODOLOGIE

### 2.1. Introduction

Les cartes de NSMT qui montrent l'emplacement des zones sensibles aux mouvements de terrain sont très rares (Cruden and Varnes, 1995) et ceci s'explique en partie par la complexité du phénomène à cartographier, mais aussi par le peu d'expertises humaines disponibles et requises pour obtenir des résultats satisfaisants. Selon Brabb (1984), le document idéal est celui qui offre aux décideurs les informations sur les probabilités temporelles et spatiales qu'un événement se produise et qui décrit aussi le type de mouvement, la vitesse et l'envergure du phénomène. Malheureusement, l'état des connaissances actuelles est limité à la localisation spatiale d'une zone potentiellement sensible à ce type d'événement en utilisant deux ou trois classes de sensibilité.

Bien que cette constatation puisse sembler décevante, Hewitt et Burton (1971) et Palm et Hodgson (1993) ont établi que ces connaissances constituent un pas significatif pour protéger les populations et qu'elles doivent être utilisées impérativement pour accélérer la cartographie des régions potentiellement sensibles à ces phénomènes.

Suite à une revue exhaustive de la littérature, nous avons noté un intérêt grandissant pour le développement de méthodologies afin de cartographier les risques géologiques pouvant affecter une région. Nous avons également constaté, qu'à ce jour, aucune méthodologie standard n'existe.

Pour ce chapitre, nous présentons d'abord les principes de base concernant la mise en place des mouvements de terrain ainsi que les résultats d'une revue de la littérature pour cerner l'état d'avancement des connaissances actuelles concernant l'identification des NSMT. Les dernières pages sont principalement consacrées à la présentation de la méthodologie retenue pour développer un modèle de sensibilité adaptée à notre zone d'étude et pouvant être utilisée pour des fins de régionalisation.

## **2.2. Principes de base de l'instabilité des versants**

Un mouvement de terrain se traduit par le transport de matériaux (matériaux meubles ou roc) vers le bas de la pente en réponse à la gravité (Trenhaile, 1990). La force gravitationnelle agit comme une force de cisaillement en exerçant un stress naturel sur tous les versants. Cette force augmente en fonction des conditions géométriques liées à l'angle et à la longueur de la pente, ainsi qu'en fonction du poids unitaire des matériaux impliqués. Un mouvement débute lorsque ce stress devient supérieur à la force de résistance ou de cohésion des matériaux (figure 2.1). Lorsque ces deux forces sont presque égales, le mouvement est lent et correspond à l'érosion naturelle des formations meubles. Les mouvements rapides se produisent lors d'une augmentation soudaine de la force de cisaillement ou encore lors d'une réduction soudaine de la force de cohésion (Terzaghi and Peck, 1967). Les changements brutaux sont habituellement induits par des facteurs déclencheurs, lesquels sont énumérés ultérieurement.

À l'état initial, certaines formations sont plus fragiles que d'autres. Cette fragilité provient des propriétés intrinsèques des matériaux (Terzaghi et Peck, 1967). Elles

correspondent à la composition minéralogique, à la fabrique, à la texture, à la porosité et à la granulométrie (Wu, 1995).

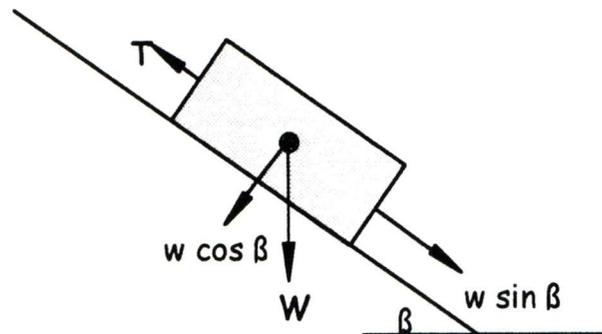


Figure 2.1. Représentation des forces qui agissent sur un versant. Considérons un bloc de roc sur une pente à angle  $\beta$ . La force de résistance correspond au poids du bloc  $W$ , multiplié par le cosinus du pendage ( $\beta$ ). La force qui attire le bloc vers le bas de la pente, est égale au poids  $W$  multiplié par le sinus de la pente ( $\beta$ ). La force ( $T$ ) correspond au frottement. La valeur exacte des forces peut être modifiée en fonction de la présence d'eau à l'interface du bloc et du plan de cisaillement.

L'évaluation de ces paramètres permettra de quantifier la fragilité des formations au déplacement à partir de différentes méthodes de mesures géotechniques. On y inclut aussi les caractéristiques reliées à la structure, soit tous les aspects qui décrivent les composantes et l'ordre de la séquence stratigraphique, de l'orientation du pendage, ainsi que des systèmes de fractures, de failles et de discontinuités (Hansen, 1984).

Les agents externes ont aussi une incidence directe sur la stabilité des forces de résistances initiales (Terzaghi, 1950). On identifie deux types différents :

- l'altération et les autres transformations physico-chimiques; elles correspondent au ramollissement de l'argile fissurée, à la désintégration granulaire de la roche, à l'hydratation des minéraux argileux, à l'assèchement

de l'argile ou des lithologies sédimentaires et, finalement, à la dissolution du ciment qui retient les grains entre eux;

- les changements de forces intergranulaires, causés par le contenu en eau et la pression d'eau interstitielle; ils sont habituellement tributaires de la variation des conditions climatiques, de la transformation des conditions du couvert végétal ou des différentes méthodes d'irrigation ou de drainage.

La réduction des forces de résistances initiales peut aussi être provoquée par des événements externes que l'on appelle « facteurs déclencheurs ». Un facteur déclencheur est un stimulus suffisamment important pour provoquer un changement rapide des conditions de stabilité (Varnes, 1978). Souvent, un seul phénomène de déclenchement saura expliquer la mise en place d'un mouvement de terrain. Ces conditions extrêmes sont habituellement provoquées par les événements suivants :

- pluies intenses
- fontes soudaines de neige
- tremblements de terre
- changements brusques du niveau d'eau de la nappe phréatique
- éruptions volcaniques
- activités humaines (excavations, irrigation, drainage, explosions).

Les mécanismes et les types de mouvements de terrain ont été regroupés en six grandes classes selon les travaux de Varnes (1978). Les critères qui sont à la base de cette classification correspondent aux types de mouvements et aux types de matériaux impliqués (formations meubles, sols ou roc). Les multiples combinaisons « types de matériaux – types de mouvements », déterminent 18 sous-classes de mouvements. Cette classification est considérée comme la plus complète et sans équivoque, elle est la plus utilisée dans la littérature (Cruden and Varnes, 1995).

Même si certains auteurs ont élargi la notion de mouvements de terrain en y intégrant les phénomènes d'érosion littorale, de déplacement des dunes, de diapirisme et même d'avalanches de neige ou de glace (Ferrer Gijon, 1988), nous nous en tenons uniquement à ceux présentés au tableau 2.1, lesquels résument bien notre compréhension du phénomène.

Tableau 2.1. Classification des mouvements de terrain

TYPES DE MOUVEMENTS	TYPE DE MATÉRIAU		
	ROC	DÉPÔTS MEUBLES	
		GROSSIER	FIN
<b>ÉBOULEMENT</b>	Éboulis rocheux	Éboulis de débris	Éboulis de FM
<b>FAUCHAGE</b>	Fauchage de roc	Fauchage de débris	Fauchage de FM
<b>GLISSEMENT</b>	<i>ROTAT.</i> Décrochement de roc	Décrochement de débris	Décrochement de FM
	<i>TRANS.</i> Glissement de roc	Glissement de débris	Glissement de FM
<b>TASSEMENT</b>	Tassement de roc	Tassement de débris	Tassement de FM
<b>ÉCOULEMENT</b>	Écoulement de roc (creep profond)	Écoulement de débris	Écoulement de FM
<b>COMPLEXE</b>	Combinaison de plus d'un type de mouvement principal		

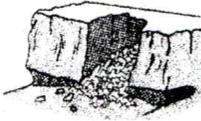
FM : Formations meubles

Traduction de Varnes (1984)

Sur la figure 2.2, nous présentons schématiquement chacun de ces mouvements et nous fournissons une description succincte à partir des explications d'Antoine et Giraud (1995). Nous avons cru approprié d'ajouter l'équivalent terminologique anglophone pour éviter toute confusion.

Sur le terrain, les trois premières classes de mouvements peuvent facilement être reconnues puisque habituellement elles se caractérisent par un amoncellement important de blocs ou de colluvions rocheuses au bas de la pente. Les glissements et les écoulements peuvent, quant à eux, présenter une plus grande difficulté d'identification, lorsque le phénomène s'est produit il y a plusieurs années ou encore lorsque le phénomène est en développement, mais extrêmement lent (Soeters and Van Westen, 1995).

A priori, différents types de mouvements sont susceptibles de se produire dans un contexte semblable établi à partir des conditions géologiques et topographiques (Keaton and DeGraff, 1995).

<p>L'<u>éboulement vertical</u> (<i>fall</i>) est le détachement de fragments d'une paroi ou d'une pente abrupte.</p>	
<p>Le <u>fauchage</u> (<i>topple</i>) est une rotation vers l'avant d'une tranche de roche/formations meubles, dont le point de pivotement se situe à la base.</p>	
<p>Le <u>tassement latéral</u> (<i>spread</i>) est la dérive de blocs de roc/ formations meubles détachés d'un même horizon. Ceci se produit habituellement lorsque la couche inférieure ne supporte plus le poids de la couche supérieure.</p>	
<p>Le <u>glissement</u> (<i>slide</i>) est un mouvement de pente qui se caractérise par le glissement de matériaux sur une ou plusieurs surfaces. On subdivise les glissements en deux catégories distinctes : 1) les glissements rotationnels ou circulaires, lorsque les matériaux déplacés sont peu ou pas déformés; 2) les glissements translationnels ou en plan, lorsque les matériaux sont complètement déformés;</p>	<p>1)</p>  <p>2)</p> 
<p>L'<u>écoulement</u> (<i>flows</i>) est similaire à celui d'un liquide visqueux, qui se déplace à une vitesse qui diminue en profondeur, à l'intérieur de l'unité en mouvement :</p>	

Adaptée de Trenhaile, 1990

Figure 2.2. Description et représentation schématique des différents types de mouvements de terrain.

Nous prétendons que la prédiction exacte du type de mouvement peut difficilement être estimée sans que la mesure des propriétés internes des matériaux soit réalisée et sans que les éléments déclencheurs les plus susceptibles de se produire soient connus. De toute façon, nous considérons qu'il n'est pas requis d'ajouter cet élément d'information dans le cadre de la cartographie des NSMT. Le concept que nous

privilegions vise plutôt à établir l'emplacement des zones sensibles peu importe le type de mouvements pouvant se produire; ce que l'on considère suffisamment adéquat pour protéger les populations locales et orienter les décideurs pour les fins de futurs développements urbains (Gares *et al.*, 1994)

### **2.3. Notions de susceptibilité**

La susceptibilité correspond a un concept évolué (2<sup>ième</sup> ordre) qui exprime le degré auquel un phénomène puisse exister ou se produire (spatiale et temporelle) en considérant le croisement d'une série d'évidences (1<sup>er</sup> ordre) concrètes et mesurables.

La notion de susceptibilité est typiquement utilisée dans le domaine des sciences de la Terre pour déterminer l'emplacement de zones minéralisées (Bonham-Carter, 1994), prévoir une éruption volcanique, un tremblement de terre ou encore pour exprimer spatialement l'emplacement des zones potentiellement sensibles aux mouvements de terrain.

Le défi relié à l'établissement des différents niveaux de susceptibilité est relativement grand et inconfortable compte tenu des nombreux facteurs impliqués ainsi que de la difficulté reliée à l'évaluation de la qualité de l'estimation. De plus, contrairement à l'identification des conditions de terrain (évidences) qui, somme toute, se distinguent concrètement sur le terrain, la susceptibilité demeure une notion abstraite ne pouvant être établie que sur la foi d'un modèle local et non-universel ou encore établi empiriquement sur la base de connaissances ou d'expériences accumulées.

Les difficultés reliées à l'établissement des NSMT est analogue à celles confrontées lors de l'identification d'une zone potentiellement minéralisée. Effectivement, les géologues d'exploration établissent qu'une zone présente une forte susceptibilité de

minéralisation lorsqu'une série d'observations convergent vers un modèle de gisement connu. Cependant, puisque la géologie n'est pas une science exacte, il est rare que le modèle puisse être appliqué tel quel, sans recourir à des modifications mineures. De plus, les géologues ne peuvent jamais s'assurer qu'un même type de gisement se trouvera exactement dans les conditions prédéterminées ou semblables à celles déjà identifiées dans d'autres zones minéralisées. Certaines conditions, jamais rencontrées auparavant, s'avéreront peut-être favorables à la mise en place de métaux sans que l'on ait pu s'y attendre. Bien que seule une campagne de forages puisse établir concrètement l'état de minéralisation de la zone, l'étude d'évaluation préalable de la susceptibilité aura permis, à tout le moins, de concentrer les efforts à un emplacement précis.

L'établissement des NSMT se fait dans le même esprit et vise à délimiter les zones de différentes sensibilités sur la foi des connaissances qui caractérisent chacun des niveaux. Ces connaissances proviennent à la fois de concepts scientifiques précis reliés à la stabilité des versants, mais aussi, elles proviennent des évidences établies empiriquement à partir de zones de stabilité et d'instabilité reconnues (Carrara, 1983). Selon ces principes de base, plusieurs méthodologies ont été développées dans l'unique objectif d'établir, avec la plus grande certitude possible, l'état de la stabilité d'une région.

#### **2.4. Description et évaluation des méthodes classiques de cartographie des NSMT**

Il existe une multitude d'approches méthodologiques différentes pour cartographier les NSMT. Cependant, aucune d'elle n'a été reconnue comme étant une méthodologie « standard » acceptée par la communauté scientifique intéressée par ces phénomènes. Néanmoins, derrière chacune des méthodes révisées se cache un modèle conceptuel unique qui implique les trois étapes analytiques suivantes :

- identification et cartographie d'une série de facteurs géologiques et géomorphologiques, directement ou indirectement corrélés aux phénomènes d'instabilité;
- évaluation de la contribution de chacun des facteurs;
- classification du territoire en niveaux de sensibilité homogènes.

Les différentes méthodologies existantes se distinguent selon : 1) les techniques de cueillette d'information (campagnes de terrain, photo-interprétation, images satellitaires), 2) le choix des évidences, 3) l'assignation des poids relatifs (contribution) des évidences et 4) les moyens utilisés pour diviser la région en zones homogènes de NSMT.

Cette section correspond à un inventaire et à une revue des approches classiques de cartographie des NSMT. Pour en faciliter la lecture, nous conservons l'acronyme NSMT en remplacement des nombreuses expressions utilisées dans la littérature pour décrire le même concept telles que la cartographie des risques, la cartographie des dangers, la cartographie de la fragilité, la cartographie de la sensibilité, pour n'en nommer que quelques-unes. Ceci constitue une opportunité de faire adopter cette expression générale qui intègre avec justesse et précision le sens et l'objectif des différents travaux cartographiques fait en ce sens mais identifiés autrement.

À la manière de Crozier (1986), nous regroupons ces méthodes en trois classes distinctes :

- méthodes inductives;
- méthodes déductives;
- méthodes numériques.

### 2.4.1. Méthodes inductives

Les méthodes inductives, aussi appelées : approches cartographiques (Varnes and Commission on landslides and other Mass-Movements - IAEG, 1984); approches géomorphologiques (Cotteccia, 1978; Kienholtz, 1978) ou encore évaluation d'experts (Leroi, 1996), correspondent à la cartographie géomorphologique classique où les différentes conditions identifiées sont reclassifiées en NSMT. Ces étapes nécessitent toutefois l'expertise de spécialistes qui sauront établir les règles et les critères nécessaires à la conversion des caractéristiques du terrain en NSMT. Ces règles et critères ont, cependant, le désavantage d'être subjectifs et non-explicites. De plus, ils sont totalement tributaires du jugement personnel de l'expert. À ce moment-ci, il est important de noter que le terme « subjectif » n'a rien de négatif puisqu'il est reconnu que les compétences expertes, appliquées à cette tâche, procurent les meilleurs résultats connus à ce jour, toutes méthodologies confondues (Varnes and Commission on landslides and other Mass-Movements - IAEG, 1984; Crozier, 1986; Kienholtz, 1992; Van Westen, 1993). À cet effet, plusieurs exemples d'application existent dans la littérature, lesquels sont pour la plupart inspirés de huit travaux classiques, réalisés dans les années 70 et 80 et encore fréquemment cités (tableau 2.2).

On y inclut aussi dans cette classe méthodologique, l'approche dite « cartographie qualitative », dans laquelle un poids est assigné de façon empirique à chaque facteur considéré. Encore une fois, l'attribution de ce poids est subjective et tributaire de l'expérience de celui qui l'établi. Cette méthode a été utilisée pour la première fois par Stevenson (1977), pour cartographier les NSMT dans une région argileuse de la Tasmanie.

Tableau 2.2. Travaux classiques utilisant la méthode inductive

Auteur	Échelle	Variables utilisées	Caractéristiques
Briggs (1974)	1 : 100 000	Pendage et pente.	Établissement de la fragilité des versants en superposant la carte des pentes à la carte lithologique (Angleterre)
Radbruch-Hall <i>et al.</i> (1976)	1 : 7 500 000	Lithologies, mouvements existants.	Première carte de NSMT à l'échelle nationale américaine (É.-U.)
Kienholz (1978)	1 : 10 000	Lithologies., stratigraphie, pentes, hydrographie, végétation.	Utilisation de témoins silencieux ( <i>Stumme Zeugen</i> ). Les règles décisionnelles varient d'un site à l'autre. Mise au point d'une charte permettant de relier conditions – NSMT (Suisse)
ZERMOS Landry (1979)	1 : 10 000	Lithologies, pentes, morphologie, hydrologie, structure.	Application d'une valeur négative à chacun des facteurs défavorables. Combinaison des valeurs pour établir un score qui déterminera le NSMT final (France)
Nielsen <i>et al.</i> (1979)	1 : 125 000	Lithologies, mouvements existants, pentes.	Réalisée dans la région de la baie de San Francisco. Trois classes de pentes et quatre classes de NSMT (É.-U.)
Obermeier (1979)	1 : 48 000	Lithologies, mouvements existants, pentes.	Classification des lithologies en quatre classes, selon leurs propriétés physiques. Chacune des classes est ensuite comparée à deux classes de pentes pour déterminer huit degrés de NSMT (É.-U.)
Takei (1982)	1 : 50 000	Lithologies, degrés d'altération, drainage, réseau de fracture, pente,	Combinaison de facteurs pour évaluer les risques de coulées de débris (Japon)
Eyles (1983)	1 : 250 000	Formes d'érosion.	Cartographie des différentes formes d'érosion, et interprétation en terme de NSMT (Nouvelle-Zélande)

#### 2.4.2. Méthodes déductives

Dans l'esprit de mettre au point des méthodes plus objectives, les approches déductives/statistiques ont été mises au point pour cartographier les NSMT. Par ces méthodes, on tente d'établir les règles et les critères cartographiques. On procède à l'étude d'une région là où des mouvements anciens ont déjà été reconnus ou encore là où des secteurs sont caractérisés par de nombreuses cicatrices de mouvement. Cette stratégie présuppose que le contexte identifié en ces lieux est caractéristique des zones sensibles. Varnes and Commission on landslides and other Mass-Movements - IAEG (1984) utilise l'expression suivante « *le passé est garant du futur (...) surtout dans l'évaluation des risques géologiques* ». En conséquence, si des conditions semblables sont identifiées ailleurs dans le secteur, elle seront jugées, elles aussi, comme étant sensibles. Brabb *et al.* (1972) furent les premiers à utiliser cette technique lors de travaux réalisés dans le secteur de San Mateo en Californie. Ainsi, en superposant la carte d'inventaire des mouvements anciens à la carte géologique et à la carte topographique, il fut possible d'identifier les secteurs les plus sensibles en calculant la fréquence d'occurrence des événements antérieurs par unité géologique. Tel que souligné par Carrara *et al.*, (1992) et Van Westen (1993), l'ajout de facteurs supplémentaires autre que la pente, la lithologie et la densité des mouvements anciens est bénéfique en terme de la qualité finale des documents produits lorsque cette méthode est retenue

À ce titre, les travaux de Carrara *et al.* (1977, 1991) et de Carrara (1983; 1988), introduisent l'approche d'analyse statistique multivariée en établissant le contexte des zones sensibles à partir de plusieurs paramètres (>100) mesurés sur les sites d'anciens mouvements. Des travaux semblables ont aussi été réalisés par Neuland (1976), Baeza et Corominas (1996), Mulder (1991) et Clouâtre (1994). Leurs techniques s'apparentent aux méthodes utilisées pour identifier les gisements métallifères, lorsqu'elles intègrent une série de variables géologiques, géochimiques

et géophysiques jugées discriminantes en regard à une zone anomalique (Bonham-Carter *et al.*, 1988; An *et al.*, 1992).

Parmi ces travaux, deux variantes méthodologiques sont habituellement utilisées :

- analyse statistique (corrélations) des conditions ponctuelles relevées sur les sites de mouvements anciens et évaluation du voisinage (régionalisation) en fonctions des résultats obtenus;
- division de la zone en unités de terrain homogènes (sur la foi de conditions géoécologiques) et classification des unités de terrain selon deux classes (stable et instable) et selon la fréquence des indices d'instabilité retrouvés dans chacune des unités.

D'autres méthodes statistiques existent aussi, telles la modélisation probabiliste (Sabto, 1991; Gonzalez, 1992) et celle du modèle des messages logiques (Runqui and Yuanguo, 1992).

En résumé, les méthodes statistiques offrent un point de vue plus objectif sur le contexte géoécologique responsable de la mise en place des mouvements de terrain. En conséquence, les règles décisionnelles qui sont utilisées pour régionaliser le modèle aux zones avoisinantes peuvent être établies sur la foi de probabilités ou encore sur la foi d'une méthode de *scoring*.

### **2.4.3. Méthodes numériques**

Les méthodes numériques réfèrent à celles qui établissent l'état de la stabilité d'un versant à l'aide de fonctions mathématiques. Elles sont fondées sur des concepts reliés à la géotechnique et à la mécanique des sols et elles sont basées sur l'estimation d'un facteur de sécurité (Craig, 1987), qui s'exprime comme suit :

**F = Force de cisaillement disponible / Force de cisaillement mobilisée.**

La force de cisaillement mobilisée se calcule à partir de la loi de Coulomb selon une relation qui tient compte, entre autres, du poids unitaire, de la cohésion, de la pression interstitielle, de l'angle de friction interne du dépôt et de l'angle de la pente. La valeur F obtenue doit par la suite être interprétée en terme de sensibilité aux mouvements de terrain. Il s'agit donc d'une relation qui n'est pas linéaire et, par surcroît, subjective, puisqu'elle dépendra du jugement personnel de celui qui l'interprète (Read and Harr, 1988). Toutefois, ces méthodes ont l'avantage d'être fondées sur des principes physiques solides et acceptés (Mulder, 1991). Selon Leroueil *et al.* (1996), la complexité du phénomène, qui est reliée aux conditions géologiques multiples et à la mauvaise compréhension des mécanismes, fait en sorte qu'aucune approche unifiée et conforme n'a pu encore émerger, ce qui s'est avérée évident lors de la revue de littérature. On y retrouve une série de variantes méthodologiques comme les modèles d'éléments finis (Ward *et al.*, 1982; Brass *et al.* 1989; Murphy and Vita-Finzi, 1991) ou encore des modèles développés à partir de la simulation des conditions hydrogéologiques (Okimura and Kawatani, 1986).

Habituellement, l'utilisation de ces méthodes reste limitée à des zones d'étude restreintes, étant donné les coûts exorbitants associés à la collecte et à l'analyse des données. Plusieurs des exemples consultés traitent de projets à grande échelle (entre 1: 500 et 1: 5 000) localisés dans les régions urbaines ou en bordures des réseaux routiers importants.

En somme, plusieurs approches sont disponibles pour cartographier les NSMT. La considération d'une méthode plutôt que d'une autre se fera en fonction de l'échelle de travail, du budget disponible, mais aussi en fonction des données en mains et de la qualité des résultats désirée. Cette qualité correspond à la précision à laquelle la

répartition des différents NSMT est établie et donc au niveau d'incertitude qui est associé à la carte finale.

## **2.5. Incertitude associée à la cartographie des NSMT**

L'établissement du niveau d'incertitude rattaché aux résultats produits par les méthodes existantes de cartographie des NSMT s'avère une tâche plutôt difficile. Contrairement à d'autres résultats géoscientifiques qui peuvent être évalués à tout instant, l'évaluation de la précision d'une carte de NSMT devra, quant à elle, patienter afin de permettre qu'un événement se produise ou ne se produise pas dans la région où l'étude a été réalisée. En fait, une carte des NSMT sera reconnue comme étant précise si l'on peut identifier des mouvements ou des signes d'instabilité dans les zones classifiées « instables » et des évidences de stabilité dans les zones classifiées « stables ». Mais combien de temps doit-on patienter avant de procéder à cette évaluation finale : 1 an, 10 ans, 25 ans ou 2 000 ans ? La réponse à cette question doit inévitablement considérer que le déroulement des événements géologiques s'effectue à une échelle temporelle très différentes de l'échelle temporelle humaine.

Puisque cette interrogation demeure sans réponse, nous évaluons la qualité des résultats obtenus à partir d'une nouvelle méthodologie, en comparant les résultats aux conditions apparentes d'instabilité recensées lors de campagnes de terrain (Carrara, 1983) ou bien en comparant les résultats à une carte de NSMT établie selon une technique plus traditionnelle qui intègre les connaissances d'un expert et qui est reconnue scientifiquement (Rib and Liang, 1978; Verstappen, 1983).

Implicitement, chaque méthode présente sa part d'incertitude. Tel que mentionné plus tôt, l'utilisation d'une méthode inductive présente, sans pouvoir l'évaluer entièrement, une incertitude reliée à l'aspect très subjectif implicite à cette méthode (Landry, 1979). À cette incertitude s'ajoute les connaissances manquantes sur les

relations entre les différents facteurs géoécologiques pouvant induire le déclenchement d'un mouvement de terrain. Ceci se traduit par une simplification des règles permettant d'établir l'emplacement des différentes classes de NSMT (Van Westen, 1993).

La méthode numérique offre aussi sa part d'incertitude, laquelle est induite par la faible représentativité des mesures. Pour régionaliser l'étude, la variabilité spatiale des conditions mesurées requiert une extrapolation spatiale, laquelle est réalisée par le responsable. Ceci ajoute nécessairement une source d'incertitude et de subjectivité au même titre que dans la méthode inductive.

Les méthodes statistiques présentent une différence fondamentale avec les deux autres méthodes sur le plan de l'incertitude des résultats produits : l'établissement des différents NSMT est fondé sur des mesures statistiques qui permettent d'associer certaines conditions de terrain à un niveau de susceptibilité quelconque. Cette méthode est donc entièrement objective et par conséquent, l'incertitude reliée aux résultats obtenus est entièrement tributaire de la qualité et de la quantité des informations de base utilisées (Van Westen, 1993).

Désormais, la seule façon d'évaluer la qualité d'un document est de le comparer à un autre document représentant une réalité terrain acceptable et reconnue. Cependant, cette réalité n'existe pas au moment où les travaux sont enclenchés et donc une évaluation chiffrée de l'incertitude ne peut être établie. En conséquence, le taux d'incertitude est trop souvent évalué par le degré de subjectivité que la méthode implique. Sur cette base d'évaluation, les méthodes inductives représentent la plus grande part d'incertitude et les méthodes statistiques la moins grande. Ceci revient à discréditer complètement l'expérience et le jugement des experts et donc de la confiance que l'on peut accorder à toute interprétation géologique.

## 2.6. Utilisation de la télédétection pour cartographier les NSMT

Toutes les approches méthodologiques développées pour cartographier les NSMT requièrent une phase d'acquisition d'informations. Il est reconnu que le temps et l'argent consacrés à cette étape de travail représentent plus de 50 % des efforts qui sont investis dans la réalisation du projet (Guillande *et al.*, 1995), surtout si des méthodes traditionnelles d'acquisition et d'interprétation sont utilisées (ex. campagnes de terrain et photographies aériennes).

Récemment, les résultats de deux sondages concernant l'utilisation de la télédétection dans les études de prédiction des mouvements de terrain ont été publiés par Mantovani *et al.* (1996) et par Soeters *et al.* (1993). Les conclusions tirées de ces sondages sont les suivantes :

- les images satellitaires ne sont pas utilisées parce que le coût des données est trop élevé;
- les connaissances nécessaires pour profiter de ces informations sont inadéquates et le personnel actuellement en service est mal informé sur ces techniques;
- les photographies aériennes demeurent les documents les plus utilisées aux fins d'acquisition des informations de base, ou encore lorsque les travaux de terrain sont incomplets.

À ce jour, la valeur attribuée aux données satellitaires, dans les études de cartographie des NSMT, s'est toujours faite en fonction de leur potentiel à détecter ou non les zones d'anciens glissements et les cicatrices laissées par des mouvements antérieurs (Carrara, 1988; Scanvic *et al.*, 1992; Asté and Giraud, 1992; Leroi *et al.*, 1992; Van Westen, 1993; Soeters *et al.*, 1993). Tel que présenté préalablement, il est effectivement reconnu que la présence de tels indices géomorphologiques est significative et que, souvent, l'emplacement de ces structures servira de lieu d'entraînement ou de zone témoin pour établir les conditions critiques d'instabilité.

Cependant, les évidences recherchées sont habituellement de petites tailles, cachées sous la végétation et donc très difficiles à localiser avec précision, même à partir de photographies aériennes à l'échelle du 1 : 20 000 (Rib and Liang, 1978). À cet égard, Carrara *et al.* (1992) ont évalué et comparé les résultats obtenus de l'interprétation d'une même zone par trois photo-interprètes experts différents. Les résultats ont montré des différences de plus 60 % en ce qui a trait à l'emplacement et au nombre de structures identifiées dans une zone instable de l'Italie. Il faut en conclure que l'utilisation d'images satellitaires, de résolution spatiale inférieure à celle des photographies aériennes posera, à un degré plus aigu, un problème semblable lorsque utilisées pour les mêmes fins.

Cependant, en amont de l'application de la méthode d'analyse des données, la télédétection peut être utilisée comme alternative à l'interprétation des photographies aériennes ou des campagnes de terrain, pour établir la répartition des conditions reliées à la cartographie des formations meubles, des différentes lithologies ou encore de l'utilisation des sols dans les zones où ces informations sont inexistantes.

Il est cependant surprenant de constater que la majorité des utilisateurs d'images satellitaires, dans les études de cartographie des NSMT, n'utilisent pas cette avenue. Sur le tableau 2.3, nous présentons les plus illustres travaux, où l'utilisation des images satellitaires est considérée dans la structure méthodologique.

## **2.7. Utilisation des SIG pour cartographier les NSMT**

Il est de moins en moins requis de faire l'éloge des SIG et de décrire les nombreux avantages qu'ils procurent dans les études qui nécessitent l'analyse spatiale des données. En quelques mots, on dira que les SIG offrent un excellent support pour prendre des décisions grâce aux nombreuses fonctions offertes pour organiser,

Tableau 2.3. Exemples de travaux utilisant la télédétection

Auteurs	Types d'images			Description
	TM	XS	Radar	
Huang and Chen (1991)	X			Évaluation de plusieurs méthodes de classification automatisée. Intégration des images TM dans un SIG pour inventorier les glissements anciens (Alaska)
Kasa <i>et al.</i> (1991)	X			Prédiction quantitative à partir de la classification automatisée et visuelle des conditions de sol (type et occupation), de végétation et des conditions géologiques. Utilisation de l'inventaire des glissements (Japon)
Asté and Giraud (1992)		X		Filtrage directionnel pour établir une carte des linéaments (France)
Leroi <i>et al.</i> (1992)	X	X		Interprétation visuelle à partir d'un stéréopaire composé d'une image XS fusionnée à une image TM pour établir l'emplacement d'anciens glissements (Colombie)
Scanvic <i>et al.</i> (1992)		X		Classification visuelle pour inventorier les mouvements anciens et des conditions géologiques régionales (Bolivie et Colombie)
Takagi <i>et al.</i> (1992)	X			Estimation de la superficie de plusieurs mouvements existants. Détermination des paramètres géométriques à l'aide d'un MNA. Données intégrées à un modèle de stabilité des versants (Japon)
Van Westen (1993)		X		Interprétation visuelle de stéréopaires (SPOT) pour délimiter l'emplacement et le type de glissements anciens (Colombie)
Guillande <i>et al.</i> (1995)		X		Bloc diagramme (image et DEM). Extraction des conditions de végétation (NDVI). Identification des glissements anciens (Tahiti)
Greenbaum <i>et al.</i> (1996)	X			Création d'une carte d'inventaire des glissements anciens par interprétation visuelle (Papua)
Leir <i>et al.</i> (1996)			X	Analyse texturale d'images SAR, pour extraire le réseau de linéaments (Guyanne)

visualiser, rechercher, combiner et analyser une grande quantité d'informations (Penquet and Marble, 1990). Burrough (1992) et Aronoff (1989) ont présenté une description détaillée de ces systèmes ainsi que de leurs avantages en comparaison aux méthodes plus conventionnelles.

Les géographes et autres spécialistes en cartographie ont adopté très rapidement les SIG au moment où les géologues optaient encore pour les tables lumineuses. Heureusement, les SIG sont maintenant utilisés dans de nombreuses applications géologiques, particulièrement dans l'exploration minière, où ils sont très bien adaptés (Bonham-Carter, 1994). Effectivement, l'emplacement d'une zone potentielle de gisement s'établit en fonction d'un modèle de mise en place qui réfère à un concept ou des variables multisources (géochimiques, géophysiques) sont spatialement pondérées, combinées et analysées. Un ouvrage réalisé par Bonham-Carter (1994) présente l'ensemble du potentiel et des fonctionnalités des SIG dans le cadre de cette application particulière. Cette similitude nous a servi de source d'inspiration pour le développement de la méthodologie utilisée pour développer un modèle de sensibilité.

L'utilisation des SIG pour cartographier les NSMT est de plus en plus courante. Cependant, la majorité des ouvrages consultés présente des travaux où les méthodologies existantes ont été transformées de sorte afin d'automatiser davantage les différentes étapes qui mènent au document final. Aucune nouvelle technique n'a été développée à partir de l'utilisation de cet outil d'analyse. Sur le tableau 2.4, nous présentons quelques exemples récents d'utilisation des SIG dans le cadre de cette application précise.

Tableau 2.4. Travaux de cartographie des NSMT utilisant les SIG

Auteur	Caractéristiques
Bocco and Valenzuela (1988)	Établissement d'un modèle pour déterminer l'emplacement des zones fragiles au ravinement près de Mexico, à partir des données issues du MNA et de l'identification des zones de ravinement établies à partir de la télédétection.
Gupta and Joshi (1990)	Établissement des NSMT dans une région de l'Inde à partir d'une analyse de plusieurs variables provenant d'une zone où des centaines de mouvements de terrain anciens ont été identifiés
Lopez and Zinck (1991)	Combinaison des propriétés physiques de différents types de sols pour établir spatialement et temporellement les mouvements de terrain.
Mejia-Navarro <i>et al.</i> (1994)	Regroupement de toutes les variables identifiées comme étant utiles à prédire l'emplacement des futurs coulées boueuses d'une région du Colorado et pour établir la vulnérabilité des installations pouvant être affectées.
Luzi and Pergalani (1996)	Utilisation d'un SIG pour établir la vulnérabilité d'une région de l'Italie à différents processus d'instabilité des versants par l'application de différentes méthodes déterministes ou numériques.

## 2.8. Stratégie et étapes méthodologiques retenues pour développer un modèle de sensibilité

Dans la stratégie retenue pour développer un modèle de sensibilité, nous utilisons deux des approches méthodologiques existantes. Notre objectif est d'identifier les motivations qui permettent à un expert-interprète de créer une carte de NSMT à partir d'un document cartographique qu'il a créé lui-même. Pour y arriver, nous utilisons, d'une part, la méthode inductive pour établir la cartographie dans une zone témoin et, d'autre part, nous utilisons la méthode statistique pour en extraire et en définir les conditions qui gouvernent chacune des classes de NSMT établies par l'expert. Une fois le modèle de sensibilité connu, il sera désormais possible de l'utiliser dans les bassins versants voisins qui sont caractérisés par des conditions géoécologiques semblables.

Cette stratégie est présentée sous forme d'organigramme à la figure 2.3. Bien que l'ultime objectif soit la mise sur pied du système expert (EXPERIM), les phases méthodologiques décrites ci-dessous concernent plus précisément le concept scientifique relié au développement du modèle de sensibilité lui-même qui, forcément, doit être établi en amont des étapes d'automatisation.

La stratégie retenue se divise en trois phases distinctes :

- la **phase I** concerne l'établissement des NSMT dans la zone témoin retenue; cette étape est réalisée à partir de l'interprétation des photographies aériennes et de la carte topographique; pour y arriver, nous avons retenu les services d'un expert spécialisé dans l'interprétation de ces phénomènes; le document produit sert ainsi de réalité terrain et de base analytique;
- dans la **phase II**, nous rassemblons les étapes nécessaires pour rendre explicite les conditions qui caractérisent chacune des classes de NSMT établies par l'expert; c'est-à-dire de pouvoir cerner concrètement les différents facteurs géoécologiques et topographiques qui caractérisent chacune des classes; la méthode employée vise à appliquer l'analyse discriminante sur les données de la réalité terrain (NSMT) et sur les informations géoécologiques qui caractérisent la zone témoin; les résultats obtenus se traduisent par une fonction linéaire à plusieurs variables; puisque les conditions géoécologiques retrouvées dans la zone témoin sont représentatives des conditions retrouvées ailleurs dans la région, le modèle peut être régionalisé avec confiance ;
- la **phase III** a pour but de mettre au point une méthode opérationnelle de régionalisation en utilisant les images satellitaires afin d'établir la répartition de certaines évidences requises par le modèle de sensibilité, ceci en sachant que les connaissances actuelles concernant la majorité des bassins versants avoisinants celui de la *Taquiña* se limitent uniquement à la carte topographique; nous utilisons les images satellitaires en remplacement des campagnes de terrain et de l'interprétation des photographies aériennes

habituellement utilisées; cette phase permettra aussi d'établir le potentiel de chacun des capteurs en regard aux différentes évidences à cartographier.

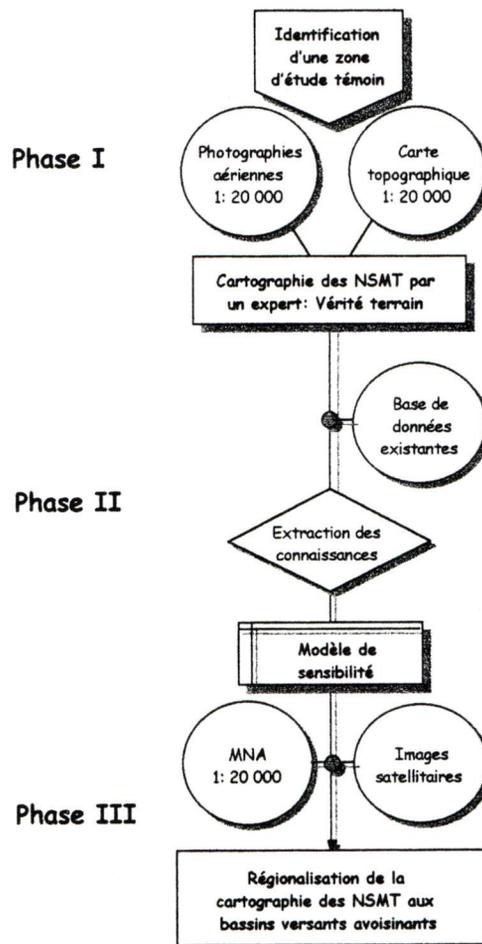


Figure 2.3. Stratégie méthodologique retenue

## EXTRACTION DES CONNAISSANCES ET CONCEPTION DU MODÈLE DE SENSIBILITÉ

### 3.1. Introduction

Les connaissances qui permettent aux experts de réaliser des tâches précises concernent spécifiquement les aspects reliés au jugement, au savoir-faire et à l'expérience (Currie and Ady, 1989). Il est actuellement reconnu que la cartographie des NSMT par des experts interprètes, utilisant les photographies aériennes, les cartes topographiques et les cartes thématiques, génèrent les résultats les plus fiables (Rib and Liang, 1978 ; Varnes, 1984; Kienholtz, 1992; Van Westen, 1993).

Fort de cette information, nous avons, dès le début du projet, retenu les services d'un expert-interprète pour établir la cartographie des NSMT dans la *Taquiña*, sachant que les résultats obtenus seraient objectifs et constitueraient une réalité terrain fiable et reconnue scientifiquement. Mise à part l'information concrète que ce document cartographique nous procure, s'y dissimulent aussi les renseignements relatifs aux motivations intuitives qui ont incité l'expert à délimiter la région de cette manière.

En conséquence, l'objectif de ce chapitre est d'identifier ces motivations qui, concrètement, correspondent à une série d'indices géoécologiques caractéristiques de chacune des classes de NSMT. Nous obtenons cette information en utilisant une méthode indirecte d'extraction des connaissances inspirée de techniques issues de

l'intelligence artificielle. Il est nécessaire de recourir à ce type de méthode puisque l'information recherchée peut difficilement être communiquée de façon concrète par l'expert. Il est effectivement reconnu que la transmission de ce savoir est complexe, puisqu'il fait appel à une série de réflexes intuitifs qui relèvent de l'expérience (Argialas, 1990).

Les résultats que nous obtenons suite à cette analyse permettent d'identifier les éléments-clés pour mettre sur pied un modèle de sensibilité, lequel sera utilisé ultérieurement pour régionaliser la cartographie des NSMT aux bassins versants environnants de la zone témoin sans l'intervention de l'expert.

### **3.2. Cartographie des NSMT dans la *Taquiña***

À partir des photographies aériennes, un expert averti est en mesure d'identifier les formes géologiques et géomorphologiques, les types de formations meubles, les types de substratums rocheux, les caractéristiques géostructurales, le réseau de drainage, les conditions de végétation et de relief, c'est-à-dire autant d'éléments qu'il jugera utiles, selon sa perception personnelle pour inférer les NSMT (Rib and Liang, 1978).

Cette interprétation se fait en considérant la variation des tons de gris, des formes, des associations et du contexte spatial dans lequel les différents éléments se retrouvent (Verstappen, 1983; Lillesand and Kieffer, 1987; Drury, 1990). Déjà, à cette étape, et uniquement sur la foi de ces indices, l'expert sera en mesure de tracer les limites entre les différents NSMT selon le nombre de classes qui lui convient. Dans d'autres circonstances, l'expert préférera utiliser des cartes thématiques existantes et ensuite créer la carte finale des NSMT par l'interprétation conjointe des différents documents en mains (Kienholtz, 1978).

Pour réaliser la carte des NSMT dans la *Taquiña*, nous avons retenu les services de M. Lambert A. Rivard, un expert photo-interprète spécialisé en géologie et en géomorphologie depuis plus de 40 ans. La réalisation de ce document s'est faite à partir de l'interprétation des photographies aériennes à l'échelle du 1 : 20 000 acquises en 1994, ainsi qu'à l'aide d'une carte topographique de même échelle (Rivard, 1994). Nous avons évité de fournir à l'expert les cartes réalisées par PROMIC de sorte à s'assurer de la plus grande objectivité possible de son interprétation. Les documents utilisés par l'expert correspondent à l'information disponible dans la plupart des bassins versants voisins de la *Taquiña*.

Voici une description des étapes méthodologiques principales retenues par M. Rivard pour réaliser la cartographie des NSMT.

### **3.2.1. Étape I : cartographie des conditions géologiques et géomorphologiques**

À partir des documents de base concernant la zone d'étude, l'expert a cartographier l'ensemble des conditions de terrain selon une légende définie à partir de ses critères personnels en préparation à l'étape subséquente de cartographie des classes de susceptibilité. La légende utilisée par l'expert pour cette étape préparatoire est présentée sur la figure 3.1. Durant cette analyse, l'expert a regroupé les différents types de formations meubles, a indiqué les cicatrices d'anciens mouvements et a rassemblé tous les secteurs présentant certaines évidences d'instabilité. Les résultats de cette phase préparatoire sont présentés à l'annexe 1.

Suite à cette étape préliminaire, une évaluation de l'interprétation a été réalisée à partir d'une campagne de terrain effectuée en 1995 (Péloquin *et al.*, 1995) et à partir des différentes cartes thématiques produites par PROMIC (Claire, 1993a, 1993b). Ainsi, à partir de 144 points de contrôle préétablis (annexe 2), nous avons déterminé le taux de succès obtenu par l'expert quant à la nature et quant à la localisation des différentes unités cartographiées. Le taux de succès a été évalué en comptabilisant

le nombre de succès obtenu lorsque la réalité terrain est comparée à l'interprétation de l'expert pour l'ensemble des sites vérifiés.

Cette évaluation a démontré que 85 % de l'interprétation réalisée par l'expert s'est avérée exacte. Les quelques différences notées concernent principalement la nature et la localisation exacte des limites de deux types d'affleurements rocheux identifiés.

### LÉGENDE

<b>R1</b>	lithologies sédimentaires compétentes
<b>R2</b>	lithologies sédimentaires incompétentes
<b>↓C</b>	colluvions impliquées dans un mouvement de terrain
<b>C</b>	colluvions indifférenciées
<b>G</b>	dépôts glaciaires indifférenciés
<b>F</b>	dépôts fluvioglaciaires indifférenciés
<b>X</b>	ravinements de surface
	linéaments régionaux - possiblement reliés à une faille majeure
	linéaments de fractures locales

Figure 3.1. Composantes de la légende de l'interprétation géologique

### 3.2.2. Étape II : conversion des conditions géoécologiques en classes de NSMT

Dans cette seconde étape, l'expert a repris l'interprétation des photographies aériennes, mais cette fois-ci, avec l'objectif de délimiter des classes de NSMT homogènes. Ceci s'est fait en combinant les caractéristiques propres aux unités géologiques et géomorphologiques déjà identifiées et les conditions topographiques appréciées par l'effet stéréoscopique qu'offre l'analyse des photographies aériennes.

Bien qu'habituellement l'établissement de deux classes de NSMT soit largement suffisant (Brabb *et al.*, 1972; Landry, 1979; Crozier, 1986), l'expert a pu identifier trois classes distinctes de NSMT dont les caractéristiques sont exposées au tableau 3.1 (Rivard, 1994) :

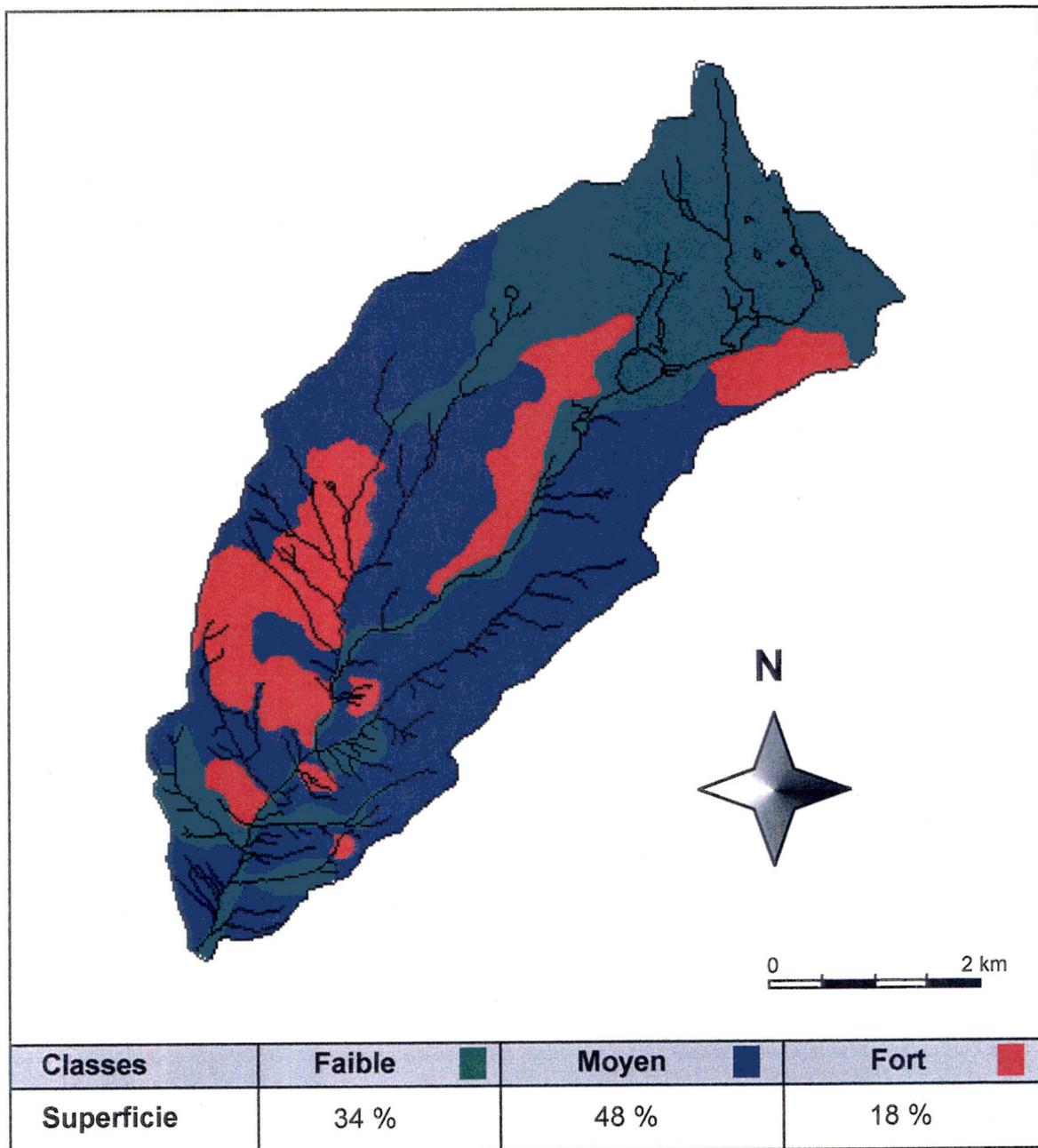
Tableau 3.1. Caractéristiques des classes de NSMT retenues par l'expert

<b>Niveau de sensibilité</b>	<b>Caractéristiques</b>
<b>Faible</b>	Zones très stables qui ne présentent aucun danger.
<b>Moyen</b>	Zones caractérisées par des conditions relativement stables, mais qui peuvent présenter un danger si un élément déclencheur devait survenir.
<b>Forte</b>	Zones caractérisées par des conditions favorables à la mise en place d'un mouvement de terrain sans nécessairement être activées par un élément déclencheur violent.

Source : Rivard (1994)

### 3.2.3. Résultats et analyse de la carte des NSMT

À partir de la carte des NSMT de la *Taquiña* produite par l'expert (figure 3.2), on constate que plus de 80 % de la zone est caractérisée par des NSMT faible ou moyen. Les zones de NSMT faible (en vert sur la carte) sont presque entièrement localisées dans la partie sommitale, là où les arénites affleurent et où les formations meubles sont minces ou absentes.



Source: Rivard (1994)

Figure 3.2. Carte des NSMT de la *Taquiña* selon les connaissances de l'interprète

Les zones de NSMT moyen (bleu) dominent le bassin et occupent principalement les secteurs où le till recouvre le substratum rocheux. Les zones de NSMT fort (rouge) sont quant à elles dispersées dans trois régions distinctes, lesquelles ont été identifiées sur la carte afin de faciliter leur description. Les caractéristiques présentées ci-dessous sont établies en considération des conditions de terrain cartographiées par PROMIC (Claire, 1993a, 1993b ; Salinas, 1995) :

- la région A est la plus importante en superficie et se situe sur le versant Ouest où les formations meubles sont épaisses et où les activités agricoles sont particulièrement intenses ; la densité du réseau de drainage est aussi relativement élevée en comparaison aux autres secteurs du bassin versant;
- la région B regroupe deux zones de NSMT forts et est localisée plus en altitude (3 900 m - 4 100 m) ; ces zones correspondent à des colluvions rocheuses surmontées par des falaises abruptes ; l'origine de ces colluvions est la même et correspond aux arénites;
- la région C se situe près de l'embouchure du bassin ; elle regroupe quatre petites zones de NSMT fort ; ces zones correspondent à des sites de ravinements intenses aussi identifiés.

### **3.3. Méthodologie d'extraction et de concrétisation des connaissances**

À partir des relations qui existent entre les classes de NSMT et les conditions géoécologiques et à partir des justifications fournies par l'expert, il demeure impossible de reproduire parfaitement la carte de susceptibilité uniquement sur la foi de ces renseignements. Pour y arriver le plus fidèlement possible, il est indispensable de connaître, dans les moindres détails, les indices précis et les fondements décisionnels que l'expert a retenus pour tracer chacune des limites qui séparent les différents NSMT, et ce, par un autre moyen que celui d'un transfert de connaissances direct. En d'autres termes, nous cherchons à établir concrètement et

avec grande exactitude, les relations qui existent entre chacun des NSMT et les conditions géoécologiques qui ont influencé le coup de crayon de l'expert. C'est ce que l'on appelle l'extraction et la concrétisation des connaissances, selon les termes usuels issus de l'intelligence artificielle (Argialas, 1990; Argialas and Harlow, 1990).

Les réponses à ces questions se traduisent en un modèle de sensibilité opérationnel qui peut être utilisé par un individu de moindre expérience et fournir une précision semblable à celle d'un expert.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons considéré l'option d'utiliser une méthode reconnue qui vise à entreprendre une série de discussions et de consultations avec l'expert, afin de dégager les connaissances reliées aux multiples étapes de son cheminement (Rolston, 1988). Cependant, bien que cette alternative semble très efficace et qu'effectivement elle ait démontré des résultats intéressants (Robinson and Frank, 1987), elle implique, cependant, que l'expert soit en mesure de transmettre concrètement des concepts qui sont difficiles à exprimer, lesquels sont habituellement reliés à son expérience et à son intuition. En conséquence, dans le cadre précis de cette application, cette alternative ne peut être envisagée étant donnée la complexité de l'analyse impliquée. Effectivement, même si on peut imaginer un certain degré de transfert de connaissances entre un expert et un individu de moindre expérience, il est difficile d'imaginer, qu'en une courte période de temps, l'individu moins expérimenté puisse rendre la même qualité de résultats, uniquement sur la foi des bons conseils de l'expert.

L'alternative que nous retenons est l'extraction et la déduction mathématique des motivations de l'expert à partir du document cartographique qu'il a produit lui-même (figure 3.2). Le concept de base repose sur le principe que l'expert a pu délimiter les NSMT puisqu'il a été influencé par une série d'évidences dont il en a fait une analyse synchrone. Les résultats de son interprétation sont l'unique source de renseignements pouvant nous indiquer comment cette analyse s'est accomplie.

Cette stratégie est analogue à celle où l'on établit une signature des conditions géoécologiques favorables à la mise en place des mouvements de terrain, en étudiant des zones où l'on retrouve des cicatrices d'anciens mouvements, tel qu'il est fait mention dans plusieurs travaux cités préalablement.

Cependant, avant d'entreprendre l'application de cette technique d'extraction et de concrétisation, nous posons les hypothèses suivantes :

- la carte des NSMT produite par l'expert correspond à la meilleure évaluation possible des conditions de sensibilités dans la zone témoin;
- les caractéristiques de terrain nécessaires à l'identification des NSMT, peuvent être identifiées et extraites à partir des informations statutaires de base;
- la répartition de chacun des NSMT peut être expliquée par une combinaison d'évidences géoécologiques pouvant être exprimée concrètement et adéquatement (Varnes, 1984).

Deux étapes principales sont nécessaires pour développer un modèle de sensibilité à partir de la carte des NSMT établie par l'expert. La première étape concerne le développement de la base de données qui intègre l'ensemble des informations jugées utiles pour caractériser la signature géoécologique de chacun des NSMT (Reger, 1979; Carrara, 1983, 1988; Sabto, 1991). La deuxième étape concerne l'analyse statistique multivariée du croisement entre les données géoécologiques disponibles et la carte des NSMT. Pour ces fins, nous utilisons l'analyse discriminante. Les résultats de cette analyse se traduisent par un modèle de sensibilité représenté par une fonction discriminante linéaire réunissant à la fois les variables discriminantes les plus performantes, et les coefficients représentant l'importance relative de chacune d'elles. Cette stratégie méthodologique est présentée à la figure 3.3.

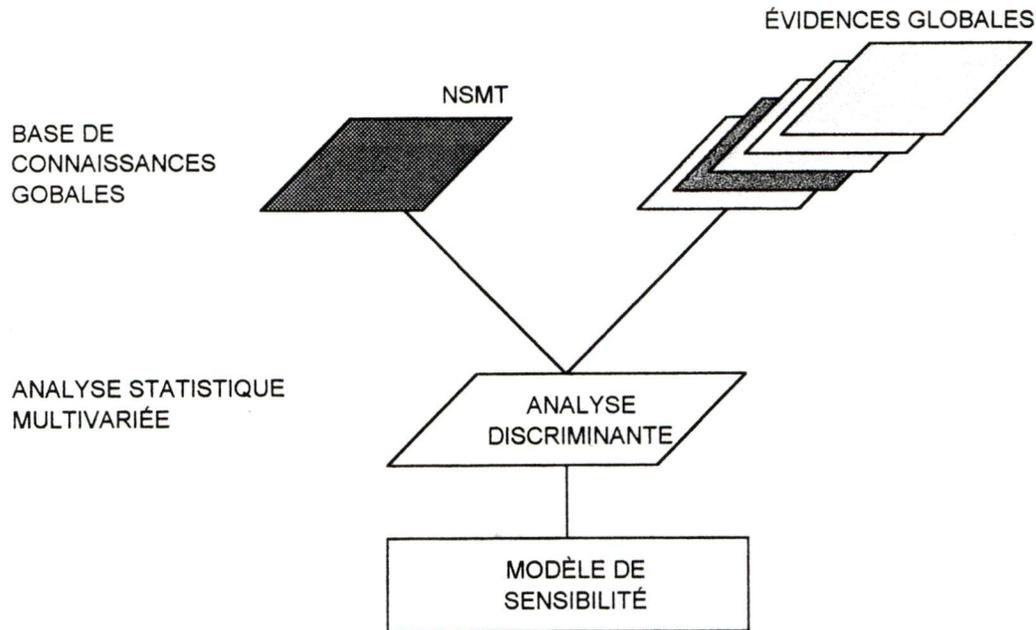


Figure 3.3. Schéma méthodologique d'extraction et de concrétisation des connaissances

### 3.4. Structure organisationnelle de la base de connaissances globales

Les informations qui nous permettent de développer le modèle de sensibilité sont puisées à même la base de données (numériques et analogiques) rendue disponible par PROMIC (Claire, 1993a ; Claire, 1993b). Selon la technique analytique retenue, il est requis que chaque élément d'information jugé utile puisse être représenté en format matriciel sur des couches individuelles d'information.

Cette représentation des données permet de caractériser chacun des pixels de la zone d'étude selon la variété d'attributs disponibles. Le choix de cette représentation des données en format matriciel permet aussi d'intégrer les informations provenant de données satellitaires pour en faire une base de connaissances globale qui intègre à la fois les informations spectrales et spatiales de la *Taquiña*.

La création de cette base de connaissances globales est structurée selon une hiérarchie pyramidale à trois niveaux respectant la terminologie suivante (figure 3.4) :

- le premier niveau correspond à la représentation des trois thèmes principaux retenue, soit : les conditions topographiques, géoécologiques et les conditions de drainage ; ces trois thèmes constituent les assises de l'information de base utilisée;
- le deuxième niveau correspond à la représentation des variables issues des thèmes principaux ; par exemple, la carte des pentes est issue de traitements réalisés à partir du thème topographique;
- le troisième niveau correspond à la représentation des couches d'information que nous appelons les évidences ; ces couches correspondent à des cartes binaires montrant l'emplacement des différentes classes de chaque variable ; par exemple, l'évidence des pentes inférieures à 15° est représentée par une couche d'information où la valeur 1 indique la présence de cette évidence et la valeur 0, l'absence.

Les paragraphes qui suivent traitent des détails techniques que nous avons retenus pour arriver à construire cette base de connaissances globales.

#### **3.4.1. Traitements préliminaires à l'intégration des thèmes principaux**

Le regroupement des informations utilisées sous une même base de données spatiales requiert, au préalable, une homogénéisation des informations quant au format, à l'échelle et à la projection géographique utilisée (Harris *et al.*, 1994). De plus, puisque certaines informations thématiques principales nous ont été présentées en format papier, telles que les cartes des NSMT et topographique, une étape supplémentaire de numérisation a dû être réalisée en amont. Aussi, puisque l'information est représentée en format matriciel, certains documents fournis par PROMIC ont dû être transformés à partir de leur format vectoriel original.

L'intégration des thèmes principaux à la base de connaissances globales constitue l'assise de la création des nouvelles couches d'information (variables et évidences) qui seront dérivées ultérieurement. Les thèmes principaux sont représentés par une image de 700 X 700 pixels, procurant une grille régulière de 10 m de côté. Tous sont géoréférencés selon le système de coordonnées UTM.

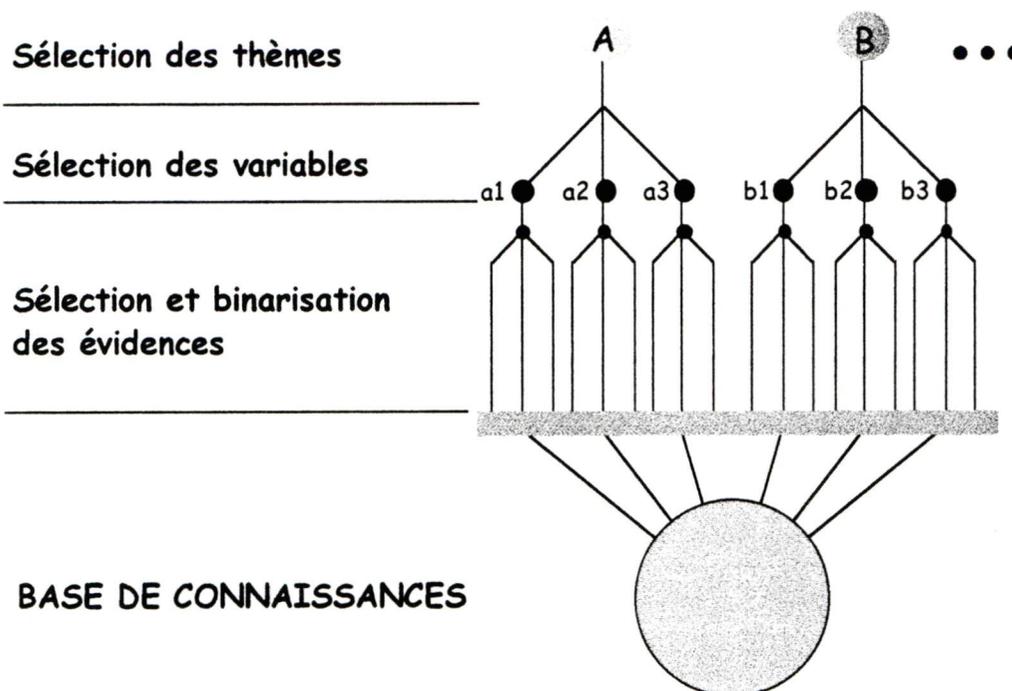


Figure 3.4. Organisation hiérarchique du contenu de la base de connaissances globales

La résolution spatiale a été établie en fonction de la provenance initiale des informations (interprétation de photographies aériennes et carte topographique) (Valenzuela and Baumgardner, 1990). Puisque les variables et les évidences sont dérivées des thèmes principaux, toutes auront le même format.

### **3.4.2. Création et intégration des variables**

Les variables constituent des couches secondaires d'information et sont issues des trois thèmes principaux. Au total, nous avons intégré, à la base de connaissances globales, neuf variables différentes : quatre variables caractérisent avec plus de précision certains aspects des conditions topographiques (pentes, orientation des pentes, courbures et relief); trois variables sont issues du thème « géoécologie » et concernent les conditions géologiques, géomorphologiques et les conditions de végétation et finalement; deux variables caractérisent les conditions de drainage (hydrologie et écoulement). Nous ajoutons à ce corpus de variables, la carte numérisée des NSMT.

Chaque couche d'information correspond à la distribution spatiale d'un aspect particulier d'un thème principal. Une variable est représentée par des classes qui permettent d'apprécier certains aspects de celle-ci. Par exemple, la variable « géologie » montre différentes classes de lithologie retrouvées dans la zone.

### **3.4.3. Création des évidences binaires**

Jusqu'à présent, la séquence verticale d'attributs qui caractérise chacun des pixels de la zone est représentée par un mélange d'informations quantitatives et qualitatives correspondant aux différentes classes retenues pour représenter chacune des variables. Ce format hétérogène constitue un obstacle pour les traitements statistiques qui seront utilisés ultérieurement pour développer le modèle de sensibilité (Del Barrio Escribano, 1992).

Pour arriver à homogénéiser les informations intégrées jusqu'à présent dans la base de connaissances globales, sans en réduire la richesse, nous avons créé des cartes d'évidences binaires. Selon la terminologie adoptée, les évidences binaires

correspondent à un troisième degré hiérarchique et constituent la représentation d'un élément unique issu d'une des variables (figure 3.4). En d'autres termes, une évidence correspond à une des classes utilisées pour représenter une variable quelconque. Pour ce faire, chaque évidence correspond à une couche d'informations binaires montrant la répartition de la présence (1) ou de l'absence (0) d'une des classes d'une variable choisie. Elles sont obtenues par reclassification, comme nous le montrons sur la figure 3.5.

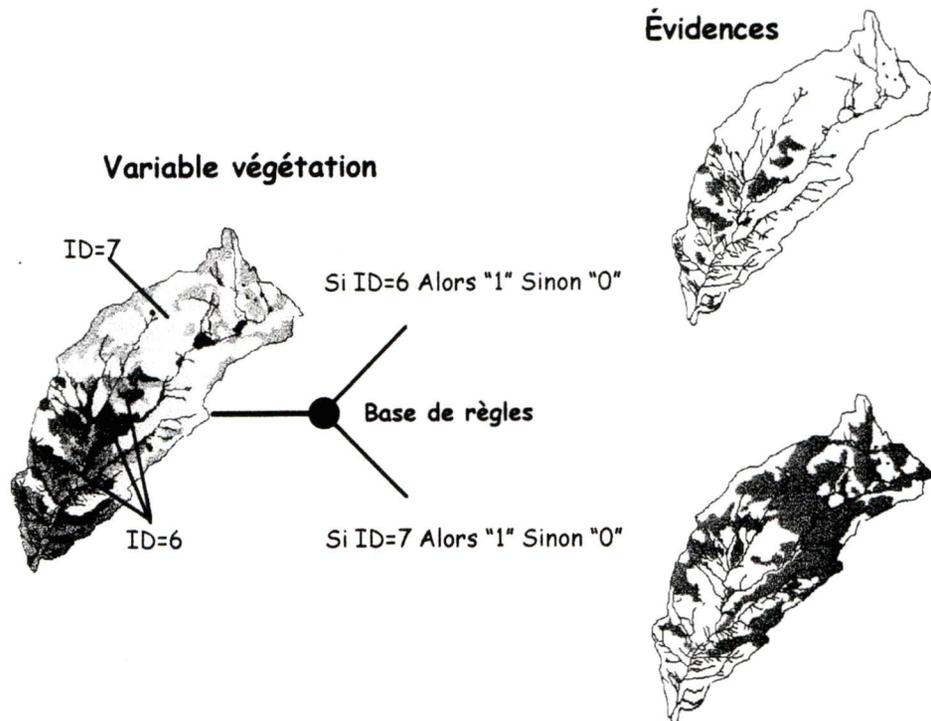


Figure 3.5. Méthode de reclassification des variables

Dans cet exemple, nous présentons la reclassification de la variable « végétation » en deux évidences distinctes. Dans la base de données spatiales, chacune des classes d'une variable est assignée d'un identificateur numérique unique. Dans le présent exemple, la classe « agriculture » est assignée de l'identificateur 6 et la

classe « graminée » est assignée de l'identificateur 7. Par la suite, à l'aide de la logique booléenne, nous posons les conditions nécessaires, sous forme de règles, de façon à isoler chacune des classes voulues. Le résultat final se traduit par la création d'autant de cartes d'évidences que de règles appliquées.

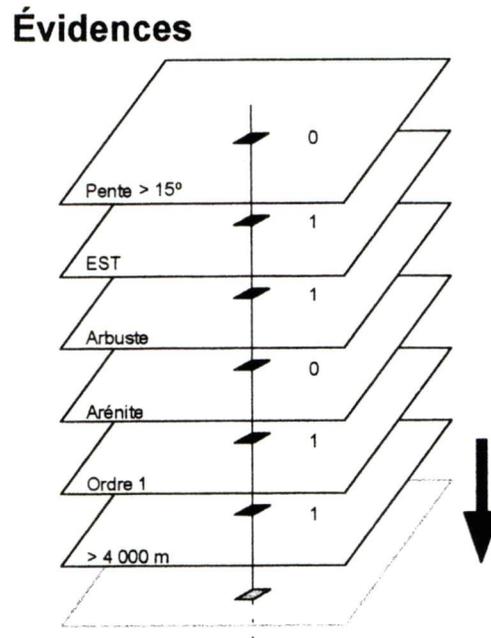


Figure 3.6. Représentation binaire finale des couches d'information

Suite à l'application de cette procédure à l'ensemble de la base de connaissances, nous avons pu créer autant de cartes d'évidences qu'il y a de classes pour représenter les neuf variables retenues. Cette méthode a été retenue puisqu'elle remet au même niveau les variables qualitatives et les variables quantitatives, ce qui permet finalement de représenter l'information originale sous la forme présentée à la figure 3.6. Au total, 44 cartes évidences binaires ont été créées selon cette procédure.

### **3.5. Présentation des informations intégrées à la base de connaissances globales**

Nous présentons ici la liste des informations retenues et intégrées à la base de connaissances globales selon le modèle organisationnel élaboré. Nous fournissons également les motivations qui ont justifié nos choix, en considérant les connaissances que nous possédons sur la zone d'étude, sur les phénomènes analysés et finalement sur l'inspiration puisée à même les travaux existants ayant retenus des objectifs semblables aux nôtres. Ainsi, tour à tour, nous présentons la liste des informations dérivées de chacun des thèmes principaux. Nous devons spécifier qu'une analyse de corrélations entre les évidences a été réalisée à cette étape-ci afin de satisfaire les prérequis imposés par les méthodes statistiques utilisées ultérieurement (Klecka, 1975) et aussi afin d'éviter l'utilisation d'un surplus d'information ou encore d'information non valable. Cet exercice nous a permis de retrancher cinq évidences qui étaient corrélées à plus de 0,80 avec d'autres évidences utilisées ou encore trop faiblement représentées.

#### **3.5.1. Évidences reliées aux caractéristiques topographiques**

La topographie représentée par un modèle numérique d'altitude (MNA) permet de caractériser et de quantifier plusieurs aspects de la géomorphologie du relief (Evans, 1980; Pike, 1988; Franklin *et al.*, 1990; Florinsky et Kuryakova, 1996; Florinsky, 1998). La grille d'un MNA contient les valeurs d'altitude pour des points régulièrement répartis (pixels) à partir desquels les caractéristiques reliées au relief peuvent être dérivées. Le MNA de *Taquiña* (figure 1.2) a été créé à partir de la carte topographique à l'échelle du 1 : 50 000. L'équidistance entre les courbes de niveau équivaut est de 50 m, ce qui procure une densité d'information satisfaisante considérant la topographie accidentée du bassin.

L'analyse du MNA, à partir des multiples fonctions maintenant intégrées aux SIG (ex. analyse du voisinage), permet de représenter numériquement plusieurs variables topographiques et de les illustrer indépendamment. Nous croyons qu'une ou plusieurs de celles-ci aient pu influencer ou diriger le jugement de l'expert lors de l'établissement des NSMT. Ces variables topographiques ont été appréciées au moyen de l'effet stéréoscopique rendu possible lors de l'examen des couples de photographies aériennes.

Afin que des liens existent entre les formes de terrain et les caractéristiques topographiques, certaines conditions doivent être respectées (Zevenbergen and Thorne, 1987; Pike, 1988) et sont effectivement respectées dans le cadre du projet; voici une liste des plus importantes de ces conditions :

- les différents processus (érosion et sédimentation) doivent laisser une empreinte topographique;
- la carte topographique utilisée doit contenir suffisamment de détails pour permettre l'inférence entre une forme géomorphologique et les caractéristiques de la topographie;
- la numérisation doit permettre la conservation des détails offerts sur la carte;
- les descripteurs quantitatifs utilisés pour caractériser la topographie doivent être adéquats ; les variables et évidences utilisées pour caractériser les formes doivent être suffisamment détaillées pour permettre une interprétation juste.

À cet effet, plusieurs succès d'identification de formes géologiques et la géomorphologie ont été obtenus à partir de l'extraction des variables topographiques et sont fréquemment discutés dans la littérature. À titre d'exemples, les travaux de Chorowicz *et al.* (1989) ont permis de reconnaître des structures monoclinales sédimentaires et une variété de dépôts de fluviatiles; les travaux de Florinsky (1998) ont rendu possible l'identification de cuestas, de failles et d'autres formes géologiques majeures. Une étude mise au point par Enzmann (1966) et raffinée par

Pike (1988) rassemble plusieurs paramètres reliés à la topographie pour établir une « signature géométrique », laquelle permet de cerner des indices topographiques et ainsi distinguer certaines formes de terrain.

Dans le présent contexte, les conditions topographiques sont représentées par quatre variables principales, desquelles 18 évidences ont été extraites. Une description de ces évidences est présentée au tableau 3.2.

### **3.5.2. Évidences reliées aux conditions de drainage**

Toutes les variables retenues sous le thème « conditions de drainage » ont été divisées selon deux groupes distincts. Le premier groupe présente des évidences reliées au patron et à la densité du drainage et le deuxième groupe présente des évidences rattachées plus particulièrement aux conditions d'écoulement. Toutes ces évidences ont été dérivées à partir du MNA. Sur le tableau 3.3, nous présentons une description de chacune des évidences.

### **3.5.3. Évidences reliées aux conditions géoécologiques**

Nous regroupons sous le thème « conditions géoécologiques » toutes les variables et évidences reliées à la géologie du substratum rocheux, à la nature des formations meubles (géomorphologie) et aux types de couvertures végétales qui caractérisent la zone.

La majorité de ces informations a été établie par PROMIC (Claire, 1993a ; Claire, 1993b) et a été intégrée telle quelle dans la base de connaissances globales, à l'exception de quelques regroupements de classes que nous avons jugés utiles. Les caractéristiques rattachées à ce thème sont présentées au tableau 3.4.

### **3.6. Application des statistiques univariées à la base de connaissances globales**

Dans cette première phase d'analyse statistique, nous vérifions les relations univariées qui existent entre les trois NSMT et chacune des évidences considérées indépendamment. Les résultats obtenus de cette analyse nous renseignent sur la capacité respective de chacune à pouvoir distinguer les trois NSMT.

#### **3.6.1. Méthodologie retenue**

Les relations univariées s'établissent par le croisement spatial entre chacune des couches d'évidences binaires et la couche d'information montrant la répartition des NSMT. Techniquement, cela se fait en superposant ces deux couches d'information puis en créant d'une nouvelle couche dont la valeur des pixels correspond à la multiplication des valeurs de pixels superposés. Puisque la carte des NSMT possède trois valeurs d'identificateur (1 : faible, 2 : moyen, 3 : fort), le résultat cartographique final de la nouvelle couche créée correspond à la distribution spatiale de la présence d'une évidence, caractérisée par une des trois valeurs de NSMT. Nous avons appliqué cette démarche pour chacune des 39 évidences retenues dans la base de connaissances globales. Par la suite, nous avons calculé la proportion que chacune des valeurs de NSMT occupe dans les plages où l'évidence analysée est présente. Ces résultats sont illustrés à l'aide des graphiques présentés aux figures 3.7, 3.8 et 3.9. Adjacent à chacun des graphiques, s'y trouve une carte illustrant la répartition de la présence de l'évidence analysée.

Par cette technique, nous pouvons évaluer si une évidence est davantage représentée par un NSMT particulier ou encore si les 3 NSMT recouvrent l'évidence selon des proportions semblables.

Tableau 3.2. Liste des variables et des évidences reliées aux caractéristiques topographiques

<b>Variables</b>	<b>Évidences</b>	<b>Provenance / Commentaires</b>
<b>Pentes ( ° )</b>	< 15	La pente est un paramètre très important et sans doute le plus utilisé pour établir les NSMT (Brabb <i>et al.</i> , 1972; Nielsen <i>et al.</i> , 1979; Evans, 1980). La carte de pentes correspond à la première dérivée de l'altitude.
	16-25	
	26-35	
	36-50	
	>50	
<b>Orientation</b>	Est	L'orientation constitue un paramètre intéressant et elle permet de distinguer les zones de pentes en travers la pente générale du bassin de celles qui sont dans le même sens, ces dernières étant beaucoup plus sensibles.
	Ouest	
	Nord	
	Sud	
<b>Courbures</b>	Hor. neg.*	Les caractéristiques des courbures peuvent être indicatrices d'une zone d'anciens glissement, mais elles peuvent aussi permettre de localiser d'autres zones topographiquement rugueuses (Pike, 1988), donc mal drainées et pouvant être sensibles. Les évidences V/H pos. et V/H neg., correspondent respectivement à des dépressions et à des buttons. Les courbures simples négatives ont été retranchées, sans analyse supplémentaire, puisqu'elles sont très fortement corrélées (négativement) avec les courbures simples positives, ceci étant causé par la faible proportion de zones planes, qui elles aussi ont été retranchées.
	Vert. neg.*	
	Hor. pos.	
	Vert. pos.	
	V/H pos.	
	V/H neg.*	
<i>Sans cour.</i>		
<b>Relief (m)</b>	< 3 000	Le gradient du relief a été retenu puisque les conditions géomorphologiques de <i>Taquiña</i> sont intimement liées à l'altitude. On y retrouve une zone d'érosion glaciaire dénudée, dans la partie sommitale, et une zone d'accumulation, au centre et au bas du bassin. Les travaux réalisés par Van Westen (1993) ont aussi pris en considération ce paramètre.
	3 000–3 500	
	3 500–4 000	
	> 4 000	

\* Évidence retranchée de la base de données parce que trop corrélée avec une autre variable

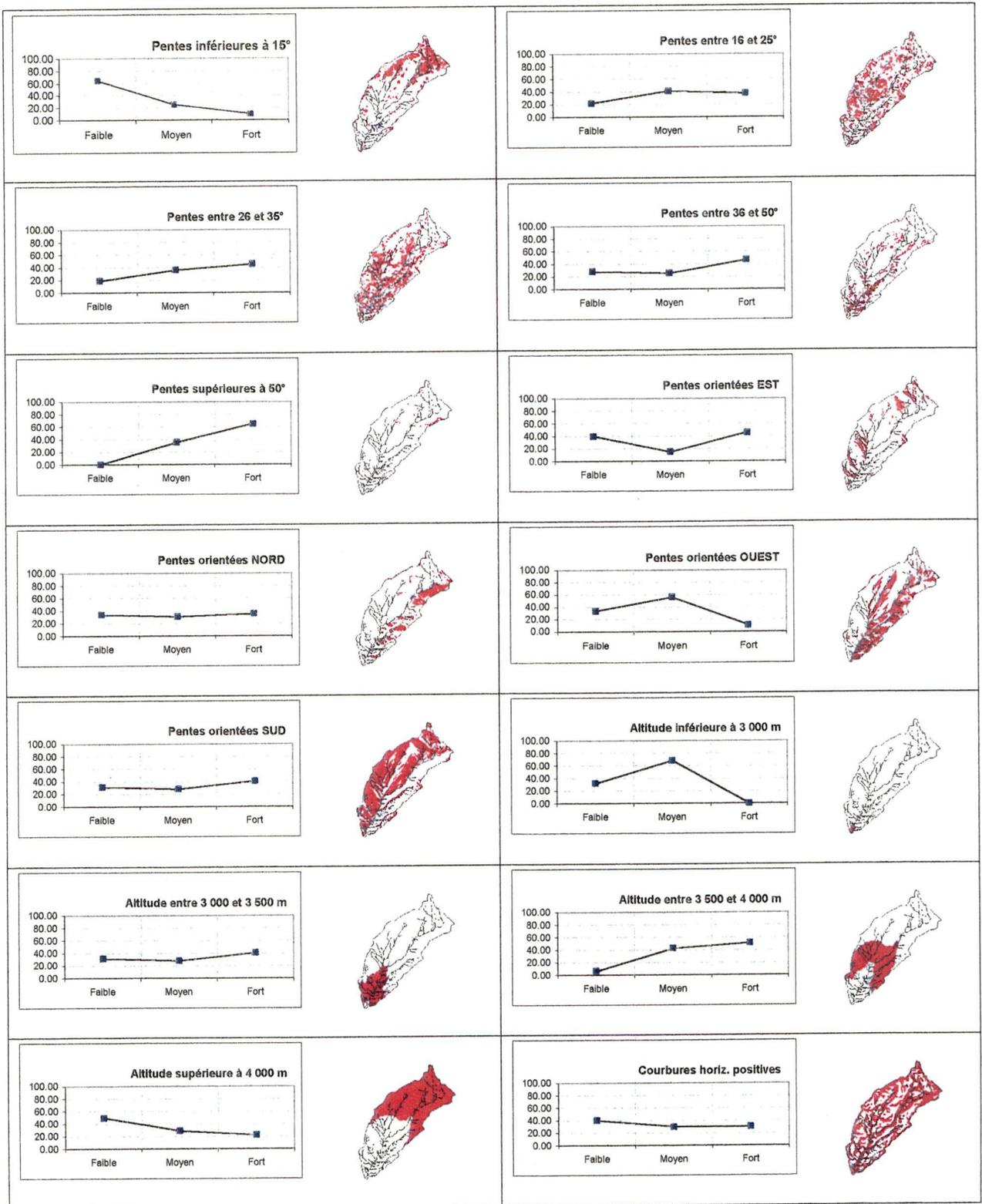
Tableau 3.3. Liste des variables et évidences reliées aux caractéristiques de drainage

<i>Variables</i>	<i>Évidences</i>	<i>Provenance / Commentaires</i>
<b>Hydrologie</b>	Ordre1 Ordre2 Ordre3 Ordre4	Chacune de ces cartes d'évidences, présente l'emplacement d'un ordre de cours d'eau particulier, entouré par une zone tampon de 50 m. Les pixels localisés à l'intérieur de cette zone obtiennent une valeur de 1 et les autres une valeur 0, ceci afin de vérifier si les zones de fortes sensibilités sont localisées dans le proche voisinage d'un ordre de cours d'eau particulier.
	1occurrence 2occurrences 3occurrences 4occurrences	La création de ces évidences a pour objectif de vérifier si les zones de forte sensibilité se situent au confluent de plusieurs cours d'eau à la fois. À titre d'exemple, l'évidence « 3occurrences », montre les pixels situés à moins de 100 m de trois cours d'eau à la fois.
<b>Écoulement</b>	ÉcouSM ÉcouM ÉcouPM	Ces évidences ont été calculées à partir d'un logiciel appelé TOPAZ (Garbrecht and Martz, 1993) qui permet de caractériser une série de paramètres reliés aux conditions d'écoulement, à partir de l'utilisation d'un MNA. Spécifiquement, le paramètre retenu établit la moyenne pondérée de tous les vecteurs d'écoulement qui entrent et qui sortent de chacun des pixels. Les trois évidences présentées expriment les résultats selon qu'ils sont inférieurs (SM), égales (M) ou supérieurs (PM) à la moyenne globale pour ce paramètre dans le bassin versant.

Tableau 3.4. Liste des variables et évidences rattachées aux caractéristiques géoécologiques

<b>Variables</b>	<b>Évidences</b>	<b>Provenance / Commentaires</b>
<b>Géologie</b>	Arénites Shales Quartzites	Cette carte montre les limites des trois lithologies présentes, lesquelles ont été extrapolées de sorte à obtenir une couverture complète de l'extension de chacune des lithologies.
<b>Géomorphologie</b>	Till indif. Blocs Colluvions Affl. indif.* Delta	Les classes représentées sur la carte initiale utilisée correspondent à une reclassification de certaines unités. À titre descriptif, le till correspond à tout dépôts, sous-glaciaires et supraglaciaires, mis en place au contact de la glace. La classe « blocs » réfèrent à des champs de blocs de moins d'un hectare en superficie et granulométriquement très homogènes. Toutes zones non recouvertes de dépôts de surface sont classifiées dans la classe "affleurements indifférenciés", peu importe la nature de la lithologie sous-jacente.
<b>Végétation</b>	Arbustes Forêts Graminées Zones dénudées Zones agricoles	La carte de végétation originale a été modifiée de sorte à répondre à nos besoins. Les modifications concernent essentiellement la fusion de certaines classes entre elles, comme, par exemple, le regroupement de plusieurs types de graminées en une seule classe. Nous avons aussi intégré à cette variable, les zones agricoles qui apparaissaient dans la carte d'utilisation des sols. Cette dernière présentait aussi l'emplacement des zones de pâturage, mais nous avons rapidement réalisé que ces emplacements correspondaient aux zones de graminées.

\* Évidence retranchée de la base de données parce que trop corrélée avec une autre variable



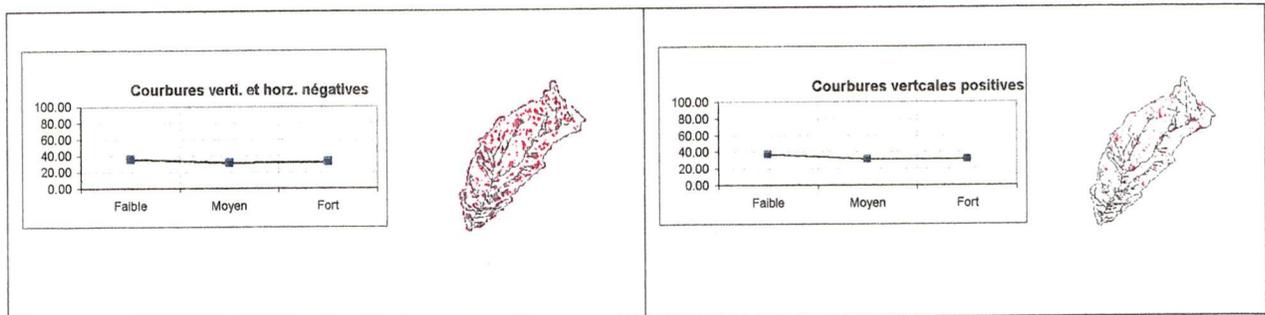


Figure 3.7. Représentation cartographique binaire et caractéristiques statistiques liées aux évidences topographiques

### 3.6.2. Interprétation des résultats

La forme de la courbe représentée sur chacun des graphiques nous indique la proportion que chaque NSMT occupe là où l'évidence est présente. Pour en faciliter l'analyse, nous avons regroupé les tendances en trois groupes distincts :

Groupe A : La courbe affiche un plateau entre deux niveaux consécutifs de NSMT dans les faibles proportions ou encore une forme en triangle pointée vers le haut. Ceci nous indique que l'évidence est presque essentiellement représentée par une seule classe de NSMT. Dans ces conditions, la force discriminante de l'évidence est maximum ;

Groupe B : la forme de la courbe est représentée par un triangle inverse (pointe vers le bas), par un plateau entre deux points consécutifs et localisé dans la zone de fortes proportions ou encore par une droite à 45° orientée dans un sens ou dans l'autre, ces différentes formes de la courbe représentent des conditions intermédiaires où une des trois classes n'est pas ou presque pas représentées dans l'évidence analysée;

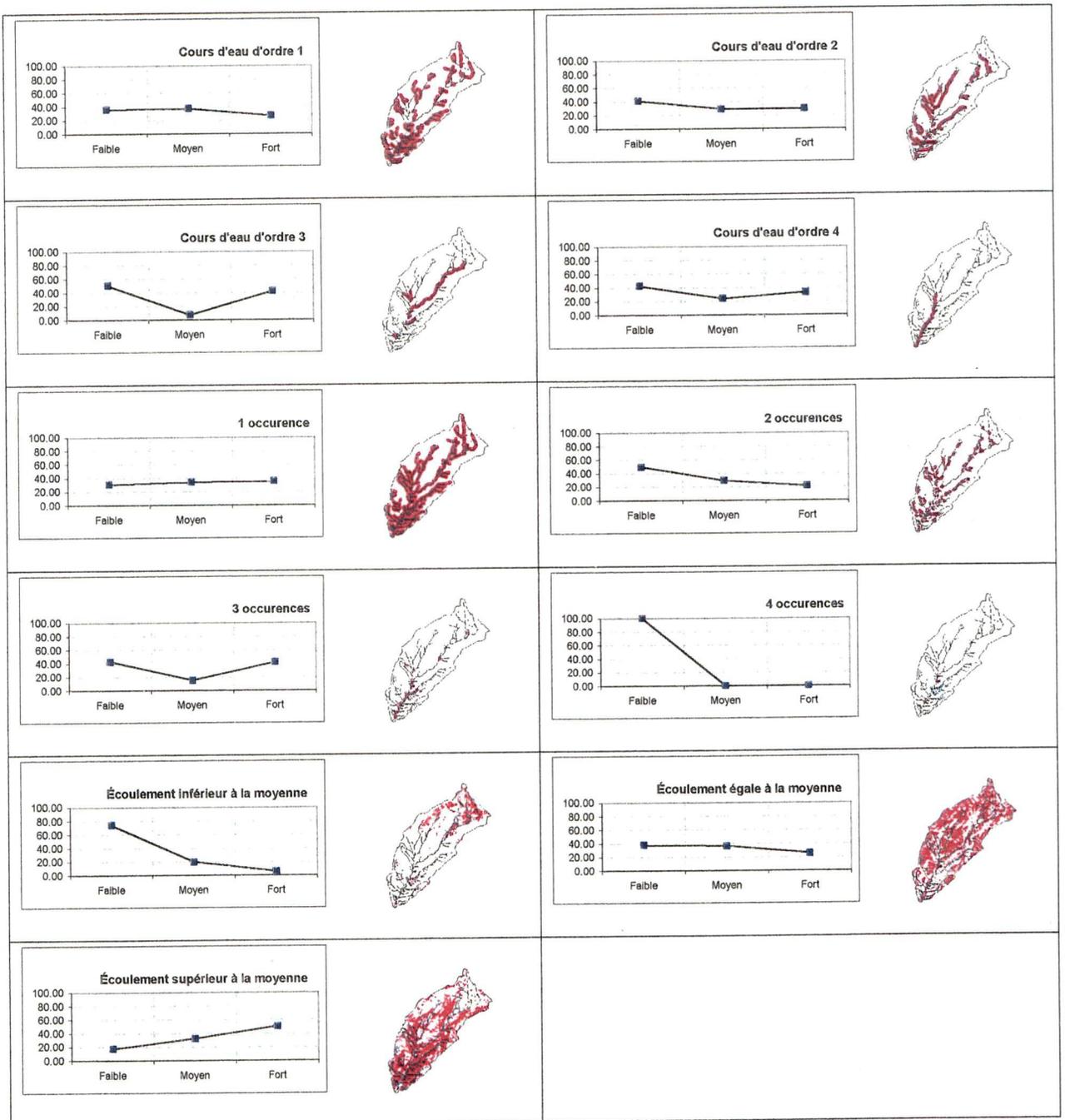


Figure 3.8. Représentation cartographique binaire et caractéristiques statistiques reliées aux évidences des conditions de drainage

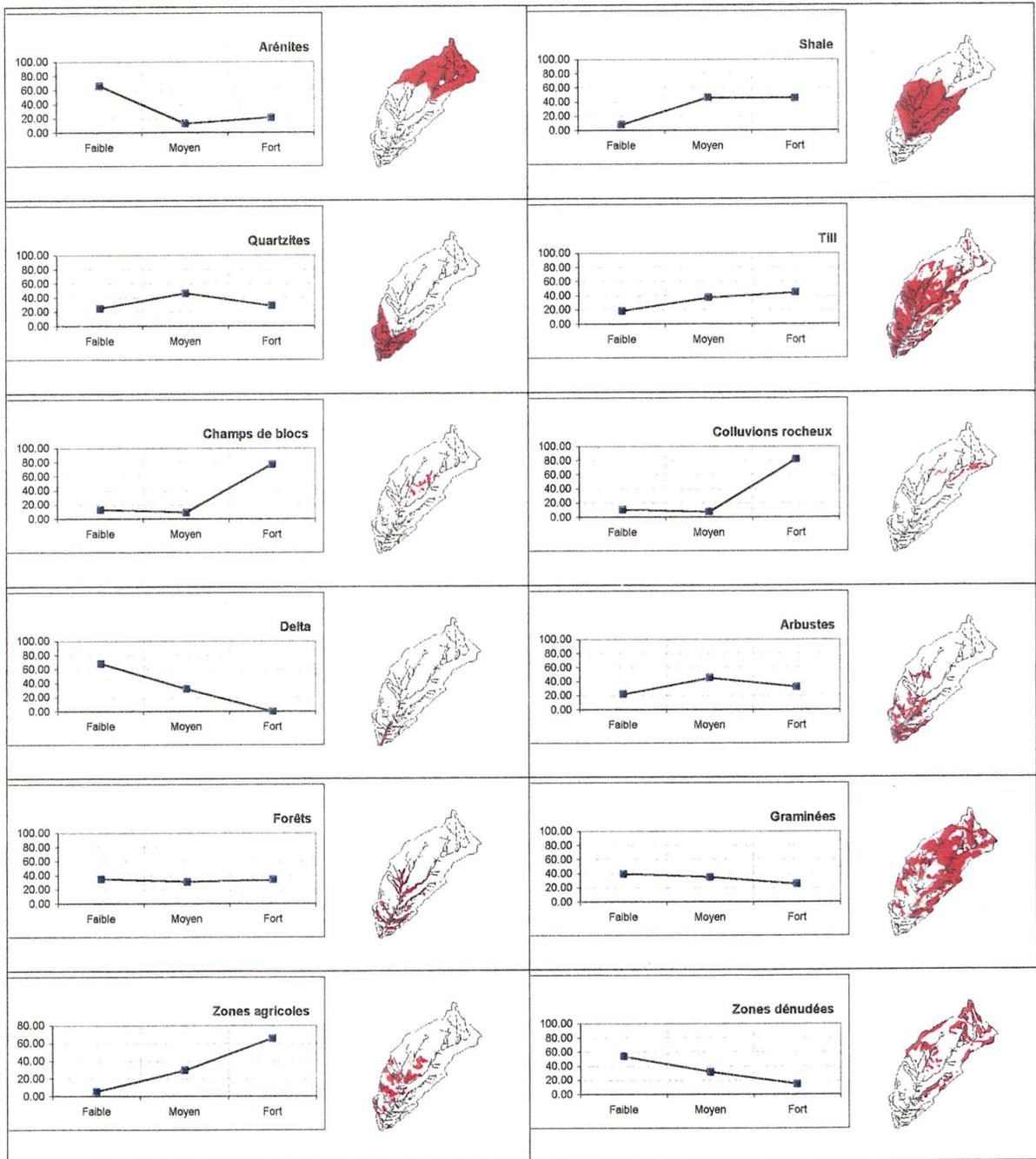


Figure 3.9. Représentation cartographique binaire et caractéristiques statistiques liées aux évidences géoécologiques

Groupe C : lorsque la courbe est presque horizontale, ceci témoigne d'une distribution égale des trois NSMT et démontre que l'évidence possède un faible pouvoir discriminant, ce qui prouve son indépendance aux différentes conditions de stabilité.

Les résultats de la classification sont présentés aux tableaux 3.5, 3.6 et 3.7. À noter que, dans certains cas, l'attribution d'une ou l'autre classe est relativement difficile à trancher. Ceci n'a cependant que peu d'incidence, puisqu'à cette étape notre objectif est tout simplement d'obtenir une évaluation préliminaire de la qualité du choix des évidences que nous avons retenues au départ. De plus, ceci nous fournit un aperçu du choix des évidences qui seront potentiellement retenues ou éliminées lors de la conception du modèle de sensibilité final que nous établissons à partir des statistiques multivariées, lesquelles sont étudiées à la section suivante.

À la lumière de ces résultats, nous constatons que le choix des variables et des évidences retenues en début de parcours est judicieux. Évidemment, uniquement sur la foi des résultats obtenus à ce stade, il demeure impossible de classer la zone d'étude avec exactitude selon les trois NSMT retenus, sachant que la stabilité d'un secteur se détermine plutôt par le croisement de plusieurs de ces évidences à la fois. Nous retenons cependant, la force discriminante élevée des évidences reliées à la géologie, à la géomorphologie et aux caractéristiques d'écoulement. Nous notons aussi la faiblesse des évidences reliées aux conditions de végétation.

### **3.7. Application des statistiques multivariées à la base de connaissances globales**

Les statistiques multivariées sont fréquemment utilisées en sciences de la Terre, plus particulièrement en géologie économique, pour déterminer l'emplacement de zones minéralisées (Agterberg, 1989 ; Bonham-Carter, 1994).

Tableau 3.5. Classification des évidences topographiques selon leur force discriminante

<b>Groupes</b>	<b>Évidences</b>	<b>Commentaires</b>
<b>A</b>	Aucune	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bien qu'aucune évidence topographique ne permette d'isoler un seul NSMT particulier, plusieurs d'entre elles possèdent une force discriminante élevée permettant d'exclure un NSMT ; celles-ci étant énumérées dans le groupe B. Le NSMT fort n'existe pas là où l'on retrouve des pentes &lt; 15° et où l'orientation des pentes est Ouest. Le NSMT faible n'existe pas où les pentes sont &gt; 50° ainsi qu'entre les altitudes 3 500 m et 4 000 m. Le NSMT moyen est presque totalement absent lorsque l'orientation des pentes est Est.</li> <li>Avec étonnement, nous constatons que les évidences liées aux courbures offrent très peu d'information. Les courbes de proportion calculées sont parfaitement horizontales ; ce qui est sans doute lié au contexte géologique particulier de notre zone d'étude.</li> </ul>
<b>B</b>	Pentes < 15°; pentes > 50; pentes orientées Est; pentes orientées Ouest; altitude < 3 000 m; altitude entre 3 500 m et 4 000 m	
<b>C</b>	Pentes entre 16° et 25° ; pentes entre 26° et 35° ; pentes entre 36° et 50 ; pentes orientées Nord ; pentes orientées Sud ; altitude entre 3 000 m et 3 500 m ; altitude entre 3 500 m et 4 000 m ; altitude >4 000 m ; courbures horiz. pos. ; courbures vert. pos. ; courbures horiz./vert. nég..°	

Tableau 3.6. Classification des évidences reliées aux caractéristiques de drainage selon leur force discriminante

<b>Groupes</b>	<b>Évidences</b>	<b>Commentaires</b>
<b>A</b>	4 occurrences ; écoulement inférieure à la moyenne.	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'écoulement inférieur à la moyenne isole parfaitement le NSMT faible et la représentabilité de cette évidences est grande. Bien que l'évidence 4 occurrences soit dans le groupe A, sa faible représentativité la rend moins intéressante .</li> <li>Les évidences Ordre 3 et 3 occurrences permettent de retrancher le NSMT moyen. L'écoulement supérieur à la moyenne retranche le NSMT faible.</li> <li>Mis à part l'ordre 1, qui est à la limite de pouvoir discarter le NSMT, tous les autres évidences du groupe C, offrent peu d'intérêt à cette étape-ci.</li> </ul>
<b>B</b>	Ordre 3 ; 3 occurrences ; écoulement supérieur à la moyenne	
<b>C</b>	Ordre 1, ordre 2 ; ordre 4 ; 1 occurrence, 2 occurrences ; écoulement égal à la moyenne.	

Tableau 3.7. Classification des évidences géoécologiques selon leur force discriminante

<b>Groupes</b>	<b>Évidences</b>	<b>Commentaires</b>
<b>A</b>	Arénites ; champs de blocs ; colluvions rocheuses.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seules les évidences géologiques et géomorphologiques se trouvent dans le groupe A. Les arénites sont réservés au NSMT faible et les champs de blocs et colluvions rocheuses ne présentent que des NSMT forts.</li> <li>• Dans le groupe B, les évidences shale et et zones agricoles permettent de retrancher le NSMT faible. L'évidence delta et zones dénudées permettent de retrancher le NSMT fort.</li> <li>• Trois évidences reliées à la végétation sont dans le groupe C. On peut déjà envisagé le peu de liaison entre la stabilité des pentes et les conditions de végétation. L'évidence till est frontalière entre B et C dû à la très faible proportion de NSMT faible.</li> </ul>
<b>B</b>	Shale ; delta ; zones agricoles ; zones dénudées	
<b>C</b>	Quartzites ; till ; arbustes ; forêts ; graminées	

Il est cependant surprenant de constater que l'utilisation de ces mêmes méthodes pour établir les NSMT est plutôt rare, même si certains auteurs les ont utilisées avec succès (Neuland, 1976; Reger, 1979; Carrara, 1983, 1988; Carrara *et al.*, 1977, 1991). Pourtant, le concept opérationnel et méthodologique de base est le même pour les deux types d'application; dans chacun des cas, on cherche à établir mathématiquement les relations qui existent entre une série de variables concrètes et mesurables, afin d'évaluer le potentiel qu'un phénomène non identifiable visuellement puisse exister.

Dans le cadre d'une série de travaux réalisés par Carrara et son équipe (1983, 1988) pour cartographier les NSMT à l'aide des statistiques multivariées, les concepts généraux retenus se résument dans les quelques étapes méthodologiques suivantes :

- division d'un bassin versant en zones uniformes d'unités de terrain ou d'unités de pentes;
- interprétation d'une zone témoin (sous-zone) à l'aide de photographies aériennes, pour identifier deux NSMT (stable et instable); les unités caractérisées par un NSMT instable correspondent à celles où plus de 2 % de la superficie de l'unité, présente des caractéristiques reliées à un ancien glissement; les autres secteurs qui montrent des superficies inférieures sont jugées stables;
- estimation des contributions relatives de chacun des facteurs (évidences) par l'application de l'analyse discriminante;
- régionalisation de l'étude par l'utilisation du modèle, selon les deux NSMT préétablis.

Les résultats obtenus dans les bassins où la méthode a été appliquée ont varié entre 72 % et 81 % ; c'est à dire que l'analyse statistique multivariée a permis de concrétiser et reproduire l'essentiel des connaissances qui caractérisent les deux NSMT cherchés.

Les travaux de Reger (1979) présentent aussi beaucoup d'intérêt, cependant ils sont plutôt orientés sur l'application de statistiques multivariées à une série de facteurs ponctuels (puits de forage) d'ordre géotechnique (limite d'Atterberg, degré de saturation). Bien que la nature des variables utilisées soit différente de celles que nous utilisons, les résultats obtenus lors de ces travaux ont aussi démontré l'utilité de l'analyse discriminante à l'établissement des NSMT.

### **3.7.1. Principes fondamentaux de l'analyse discriminante**

L'analyse discriminante a été développée par Fisher en 1936 et correspond à une technique de régression utilisée pour identifier les différences entre deux ou plusieurs groupes. Dans le cadre de notre étude, ces groupes réfèrent aux trois NSMT. Pour établir mathématiquement ces différences, le chercheur fait appel à une série de

« variables discriminantes (évidences) » qui mesurent les caractéristiques sur lesquelles les groupes peuvent se distinguer à partir d'une série de cas connus (échantillonnage) (figure 3.10). L'objectif mathématique de l'analyse discriminante est de pouvoir pondérer et combiner ces variables de façon linéaire et ainsi forcer les groupes à se séparer statistiquement. On nomme cette combinaison linéaire de variables discriminantes « fonction discriminante » ou « fonction canonique ». Elle se définit comme suit :

$$f_{km} = u_0 + u_1 X_{1km} + u_2 X_{2km} + \dots + u_p X_{pkm} \dots\dots\dots (1)$$

où

$f_{km}$  = valeur (score) de la fonction discriminante pour le cas m dans le groupe k;

$X_{ikm}$  = valeur de la variable discriminante  $X_i$  pour le cas m dans le groupe k ;

$u_i$  = coefficient qui produit les caractéristiques voulues dans la fonction.

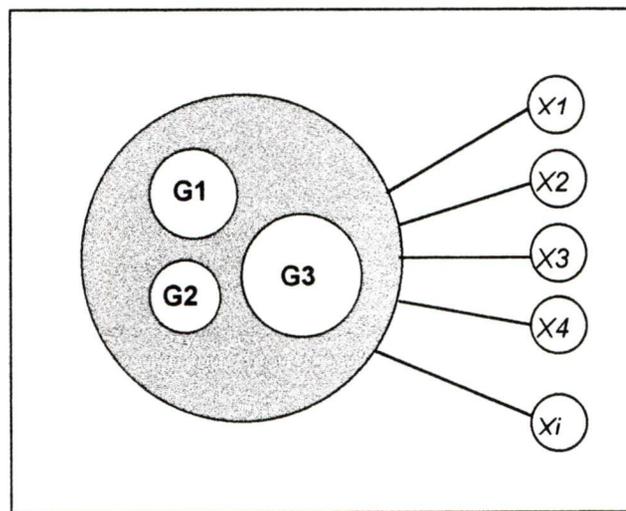


Figure 3.10. Relations entre les groupes et les variables

Ultimement, lorsque le choix des variables est bien sélectionné, il sera possible de classifier correctement un cas inconnu en additionnant le produit de chacune des variables par son coefficient.

Le terme « analyse discriminante » est général et réfère à une multitude d'activités statistiques intimement liées entre elles. Ces activités peuvent être regroupées en deux classes principales : 1) interprétation et 2) classification. Voici une description succincte des principes qui caractérisent chacune d'elles. Des explications plus détaillées de ces démarches sont présentées par Klecka (1975).

### **A- Interprétation**

À cette étape, le chercheur a déjà identifié les variables potentielles susceptibles de permettre la distinction *a priori* entre les différents groupes, en se basant sur ses connaissances en regard au problème traité. Le chercheur a aussi identifié une série de cas connus sur lesquels les techniques mathématiques seront appliquées pour définir correctement les coefficients de la fonction discriminante.

Considérons chacune des variables comme étant un axe dans un espace à  $p$  dimensions, où  $p$  égale le nombre de variables utilisées. Chacun des cas peut être positionné dans cet espace à partir des valeurs obtenues pour chacune des variables. Si des groupes *a priori* se distinguent dans leur comportement, on peut déjà imaginer que chacun sera représenté par un nuage de points concentrés dans une zone précise de cet espace. La caractérisation spatiale de chacun des groupes se fera par l'intermédiaire de son centroïde. Un centroïde est un point imaginaire qui possède des coordonnées correspondant à la moyenne de chacune des variables. Puisque chaque centroïde représente la position typique d'un groupe, on peut les utiliser pour mieux comprendre les différences entre ces groupes.

Pour dériver les coefficients de la fonction, on doit utiliser des méthodes qui permettent de mesurer le degré de différence entre les valeurs qui caractérisent chacun des cas. Le calcul de la moyenne et de l'écart type ne permet pas d'y arriver, puisqu'il ne fournit pas d'indication sur les interrelations entre les variables. Pour y

arriver, on entreprend le calcul d'une série de matrices (matrice carrée symétrique  $T$ , matrice de covariance), de façon à obtenir l'information de base concernant les relations internes aux groupes et entre les groupes. Ces mêmes informations sont ensuite utilisées pour dériver des fonctions discriminantes avec les propriétés que nous désirons, c'est-à-dire une fonction linéaire où chacune des variables est associée à un coefficient unique. Lorsque le signe (+ ou -) de ce coefficient est ignoré, chacun représente la contribution relative de la variable associée dans la fonction. Le signe, quant à lui, indique dans quel sens la variable contribue. Cette interprétation est analogue à celle d'une régression multiple.

Plus d'une fonction peuvent être définies. Le nombre maximum pouvant exister correspond à une de moins que le nombre de groupes retenus. Les fonctions discriminantes ainsi établies, sont dérivées de sorte à ce que la première fonction offre le maximum possible de distinction entre les groupes. L'utilisation de plus d'une fonction permettra, dans certains cas, de définir plus précisément la position du centroïde de chacun des cas, sachant que l'objectif final est de faire en sorte que les groupes puissent se distinguer le plus adéquatement possible.

## **B- Classification**

Les étapes de classification réfèrent au processus requis qui permet de déterminer à quel groupe un cas précis est rattaché une fois la fonction solutionnée en un score discriminant. À cet effet, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. Chacune de celles-ci intègre des notions probabilistes reliées au calcul de la distance entre le score discriminant obtenu pour un cas et le centroïde des différents groupes potentiels (ex. méthode bayésienne).

Une alternative est l'utilisation d'une méthode de seuillage afin de regrouper les scores discriminants semblables selon le nombre de classes *a priori*. Dans ce dernier cas, l'utilisation de la logique floue peut constituer une voie intéressante,

puisqu'elle permet d'éviter l'adoption de règles trop strictes et ainsi permettre la création de classes intermédiaires entre les classes de base prédéfinies par l'expert (Leung and Leung, 1997a).

### 3.7.2. Méthodologie d'application de l'analyse discriminante

Les informations binaires de la base de connaissances globales ont été intégrées au logiciel statistique SPSS version 4.0, dans lequel il est offert quelques variantes d'application de l'analyse discriminante. La méthode retenue se nomme « analyse discriminante par étape (*stepwise*) ». Sa caractéristique principale est d'intégrer les évidences binaires une à une, en commençant par la plus performante. Lorsqu'une nouvelle évidence est entrée, on vérifie si cette dernière accentue la force discriminante totale obtenue à ce point. Si la force discriminante est augmentée, l'évidence sera conservée, sinon elle sera tout simplement rejetée (Klecka, 1975). La finalité de ce processus se traduit par une fonction abrégée où seules les évidences performantes sont conservées.

Dans cette première étape, nous établissons la fonction discriminante à partir de l'ensemble des informations dont nous disposons pour la *Taquiña*. Nous appliquons ensuite cette analyse sur trois autres scénarios différents (figure 3.11) qui représentent l'état potentiel des connaissances disponibles dans les autres bassins versants voisins et qui devront être cartographiés lors de la régionalisation de l'étude. Ceci permettra d'établir la précision que l'on peut espérer d'une carte de NSMT lorsque certaines informations statutaires importantes ne sont pas disponibles pour un bassin versant étudié.

De plus, l'analyse des différents scénarios permet d'estimer l'apport en précision de chaque thème et variable. Plus théoriquement, cette analyse « par scénario », nous indique l'importance de chacune des variables dans le processus de stabilité des

versants ainsi que l'importance des effets relatifs sur le jugement de l'expert lors de sa prise de décision.

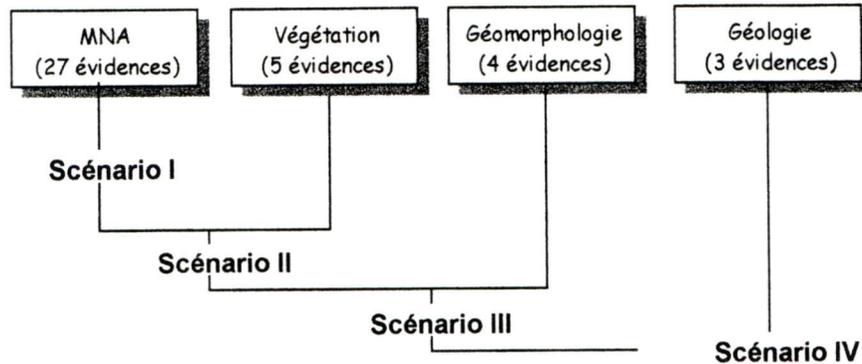


Figure 3.11. Contenu en informations de chacun des scénarios considérés

Ainsi, pour chacun des scénarios considérés, nous évaluons aussi, selon la même procédure, le degré de succès lorsque seulement deux NSMT extrêmes (faible et fort) sont requis. Bien que globalement on puisse considérer que l'utilisation de seulement deux NSMT constitue en soi une réduction d'information, plusieurs travaux ont démontré que, dans certaines conditions, ce niveau d'information sera largement suffisant pour orienter les décideurs dans leurs travaux d'aménagement du territoire (Brabb, 1984; Varnes, 1984; Gares *et al.*, 1994 )

La description du contenu d'information qui caractérise chacun des quatre scénarios est présentée au tableau 3.8.

Pour les fins d'entraînement des modèles et les fins de validation des fonctions, nous nous sommes appuyés sur un échantillonnage de 603 individus sélectionnés aléatoirement à partir de la population totale. Cet échantillonnage représente une densité de 33 individus par km<sup>2</sup>. Ce corpus de base a ensuite été divisé en deux groupes distincts : le premier groupe (306 individus) a été utilisé pour établir les différents modèles (un modèle par scénario); le deuxième groupe (297 individus) a

été utilisé afin de vérifier la précision qu'ils procurent. Sur le tableau 3.9, nous présentons la distribution des échantillons selon le NSMT auquel ils correspondent.

Tableau 3.8. Informations retenues pour chacun des scénarios considérés

<b>Scénario</b>	<b>Informations retenues</b>
<b>I</b>	Seules les informations topographiques (MNA) sont utilisées. Les évidences rattachées aux conditions hydrologiques et aux conditions d'écoulement sont aussi intégrées puisqu'elles sont dérivées du MNA. Au total, 29 évidences sont considérées.
<b>II</b>	Toutes les informations du scénario I et les cinq évidences de la variable végétation.
<b>III</b>	Toutes les informations du scénario II et les quatre évidences de la variable géomorphologie.
<b>IV</b>	Toutes les informations du scénario III et les trois évidences de la variable géologie. Ce qui correspond à la base de connaissances globales disponibles pour la <i>Taquiña</i> . Donc, la situation idéale, où un maximum de données est utilisé.

Tableau 3.9. Distribution du nombre d'échantillons selon le NSMT

<b>Classes</b>	<b>Entraînement</b>	<b>Vérification</b>	<b>Superficie (km<sup>2</sup>)</b>
Faible	105	101	6,7
Moyenne	147	142	9,2
Forte	54	54	3,5
<b>TOTAL</b>	<b>306</b>	<b>297</b>	<b>19,4</b>

### **3.7.3. Présentation des modèles de sensibilité obtenus pour chacun des scénarios considérés**

Dans cette section, nous présentons chaque fonction discriminante calculée pour chacun des scénarios retenus. Ces fonctions nous informent sur l'identité des évidences les plus performantes et sur les coefficients qui multiplient chacune d'elles. L'assemblage de ces informations, sous la forme d'une fonction, constitue ainsi un modèle de sensibilité particulier.

Sur le tableau 3.10, nous présentons les modèles obtenus pour les quatre scénarios selon deux ou trois NSMT. Puisque la méthode d'analyse par étapes a été retenue, seulement les évidences les plus performantes apparaissent pour définir le modèle. L'interprétation de ces modèles se fait en considérant la valeur absolue du coefficient, associée à chaque évidence, et qui s'interprète comme étant son poids à l'intérieur du modèle.

Sur la foi de ces informations, nous présentons et décrivons sommairement, au tableau 3.11, les modèles de sensibilité calculés pour chaque scénario. À noter, qu'à cette étape, nous ne possédons aucun résultat concernant la qualité à laquelle chacun des modèles peut recréer la réalité de terrain.

### **3.7.4. Méthode de calcul du taux de succès et analyse des résultats**

Les résultats du taux de succès obtenus pour chacun des scénarios considérés sont calculés en solutionnant l'équation d'un modèle à partir des valeurs du corpus d'échantillons « validation ». Certains chercheurs ont évalué ce taux de succès sur les échantillons utilisés pour développer les fonctions discriminantes (Reger, 1979 ; Carrara, 1988).

Tableau 3.10. Modèle de sensibilité établi pour chaque scénario considéré

SCÉNARIO	Niveaux de susceptibilité retenus			
	2 NSMT		3 NSMT	
I	AL 3500-4000	0.60	AL 3500-4000	0.73
	AL>4000	-0.44	FLOWPM	0.38
	OUEST	-0.36	FLOWSM	-0.37
	> 50 deg	0.26	ORDR3	-0.34
	16-25 deg	0.24	OUEST	0.15
	FLOWPM	0.53		
	ORDR2	-0.36		
	ORDR3	-0.26		
II	AL 3000-3500	0.35	AI 3500-4000	0.65
	AI 3500-4000	1.06	FLOWPM	0.42
	> 50 deg	0.28	FLOWSM	-0.33
	16-25 deg	0.25	ORDR3	-0.28
	FLOWPM	0.59	OUEST	0.10
	ORDR2	-0.33	AGRIC	0.29
	FORET	-0.53		
III	AI 3500-4000	0.64	AI 3500-4000	0.52
	AL>4000	-0.47	FLOWMOY	0.42
	FLOWPM	0.36	FLOWPM	0.75
	ORDR2	-0.31	ORDR3	-0.28
	ORDR3	-0.32	OUEST	0.02
	OUEST	-0.28	> 50 deg	0.36
	> 50 deg	0.34	AGRIC	0.22
	FORET	-0.29	BLOCS	0.23
	BLOCS	0.35	COLL. ROCHEUX	0.35
	COLL. ROCHEUX	0.47	TILL	0.46
	TILL	0.41		
IV	AL3540	0.45	AL3035	0.33
	PENTES 16-25	0.28	FLOWPM	-0.16
	FLOWPM	0.39	ORDR2	0.26
	ORDR2	-0.28	ORDR3	0.32
	ORDR3	-0.32	OUEST	-0.14
	PF50	0.36	> 50 deg	-0.28
	AGRIC	0.32	AGRIC	-0.07
	DENUD	-0.23	BLOCS	0.03
	FORET	-0.28	DELTA	0.24
	COLL. ROCHEUX	0.47	COLL. ROCHEUX	-0.22
	SHALE	0.68	TILL	0.14
			AREN	1.07

Dans ces conditions, les résultats obtenus sont habituellement surévalués puisque l'on ne fait appel à aucun inconnu. Par analogie, cette pratique est équivalente à l'évaluation de la qualité d'une classification automatisée d'image satellitaire en utilisant les sites retenus pour établir les signatures spectrales. En conséquence, bien que notre méthode soit plus sévère, elle exprime cependant un taux de succès conservateur pour établir la qualité et l'incertitude du modèle proposé pour chaque scénario.

Techniquement, le taux de succès s'obtient en trois étapes. La première étape vise à obtenir le score discriminant pour chaque échantillon évalué. Ceci se réalise en solutionnant l'équation du modèle, c'est-à-dire en multipliant les valeurs des échantillons, pour les évidences retenues par le modèle, au coefficient respectif, puis ensuite en additionnant chacun des membres ainsi calculés et la constante du modèle. La deuxième étape requiert que chacun des 297 scores discriminants ainsi calculés, soit classifié de façon à correspondre à une des trois valeurs de NSMT possibles. Le taux de succès final s'obtient en comparant ces résultats à la réalité de terrain.

Sur le graphique présenté à la figure 3.12, on montre le taux de succès obtenu pour chacun des scénarios utilisés, selon le nombre de NSMT considéré. Les losanges indiquent le taux de succès obtenu lorsque deux NSMT sont considérés. Les carrés représentent le taux de succès lorsque trois NSMT sont utilisés.

À l'analyse de ce graphique, nous constatons qu'effectivement notre démarche fait la preuve qu'il est possible de recréer numériquement le processus intellectuel de l'expert pour réaliser la tâche complexe que représente l'identification des NSMT, ceci en obtenant des résultats de 89 % et 78 %, lorsque deux et trois NSMT sont respectivement considérés. Ces résultats affichent des performances légèrement supérieures à celles obtenues par d'autres chercheurs cités préalablement et ayant les mêmes objectifs que nous (Carrara, 1983, 1988).

Tableau 3.11. Description des modèles de sensibilités pour chaque scénario

Scénarios	Description	
	2 NSMT	3 NSMT
I	Au total, 8 évidences parmi les 29 évidences analysées sont conservées. Les plus performantes sont liées à l'altitude, bien que l'évidence d'écoulement supérieur à la moyenne obtienne un poids considérable. Deux évidences de pentes sont conservées (16-25° et > 50°). Les groupes d'évidences reliées aux courbures et à l'occurrence des cours d'eau sont absents.	Seulement 5 évidences sont conservées dans ce modèle. Comme pour l'option à 2 NSMT, l'intervalle d'altitude 3 500 – 4 000m constitue l'évidence la plus performante. Aucune évidence reliée aux pentes n'est conservée ; ceci au profit de l'écoulement inférieur à la moyenne.
II	L'ajout des évidences liées à la végétation affecte peu le modèle. L'effet principal est de retrancher l'évidence des pentes orientées Ouest et de l'ordre 2 au profit des forêts qui occupent toutefois la troisième place en importance.	L'ajout des évidences liées à la végétation n'a eu pour effet que d'ajouter une sixième variable au modèle, soit les zones agricoles.
III	L'ajout des évidences géomorphologiques permet de créer une fonction à 11 variables dont les évidences blocs, colluvions et till, comptent parmi les plus performantes. Encore une fois l'intervalle d'altitude (3 500 m – 4 000 m) occupe la première place.	L'ajout des évidences géomorphologiques a eu pour effet d'augmenter le poids des évidences liées à l'écoulement et d'intégrer pour la première fois l'évidence de pentes > 50°. Leur performance est cependant moins élevée que pour l'option à 2 NSMT
IV	Les shales et les colluvions rocheuses sont de premières importances dans ce modèle. Bien que trois évidences reliées à la topographie soient demeurées, leur importance a été réduite. Il en est de même pour les caractéristiques de drainage et d'écoulement. On constate un partage égale entre les thèmes topographie et géoécologie.	Mise à part l'évidence arénite qui possède une forte performance en faveur des NSMT faibles, les onze autres évidences ont des poids relativement semblables. L'évidence des zones agricoles constitue encore la seule évidence liée à la variable végétation. L'évidence reliée à l'intervalle d'altitude 3 500 – 4 000 m ) a été substituée par l'intervalle 3 000 – 3 500 m.  En résumé, mises à part les évidences liées à la topographie, l'application de cette fonction peut se faire uniquement si les évidences géoécologiques suivantes sont connues : <b>arénites</b> , zones agricoles, colluvions rocheuses, champs de bols et till

Plus en détail, on note que la distinction entre les deux NSMT extrêmes est plus franche que celle entre les trois NSMT. Cependant, cette différence réduit en importance au fur et à mesure que l'on ajoute des évidences supplémentaires à l'analyse. Sur le graphique, on remarque cette tendance par le rapprochement plus

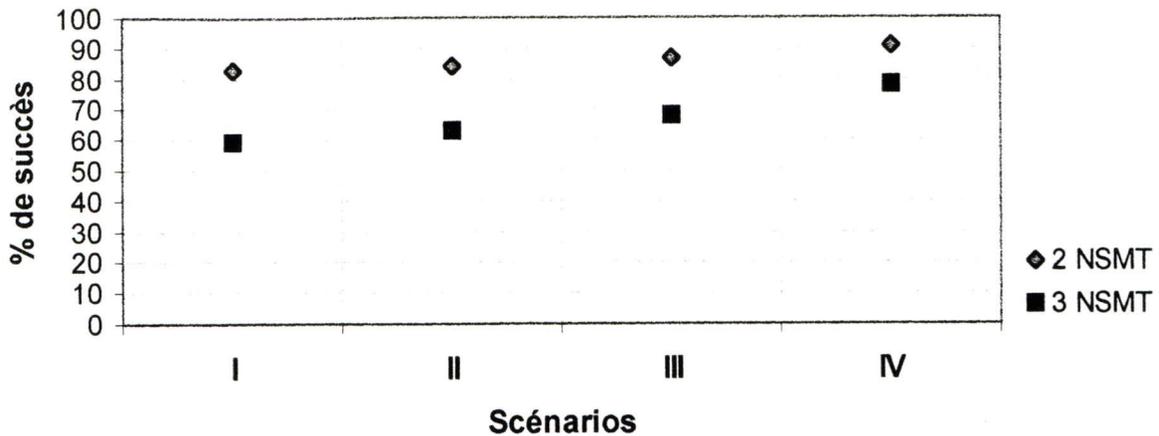


Figure 3.12. Résultats de classification selon le scénario considéré et le nombre de NSMT

serré des points entre les scénarios I et IV. Ceci constitue un indice clair que le NSMT moyen est moins bien cerné par l'expert et correspond sans doute à des conditions mitigées qui ne sont pas toujours fondées sur les mêmes critères et qui appartiennent tantôt aux NSMT faibles et tantôt aux NSMT forts. Il est sans doute probable que nous n'avons pas su identifier les évidences précises permettant de mieux cerner les caractéristiques du NSMT moyen.

Les évidences reliées à la topographie offrent clairement les connaissances les plus appropriées pour séparer avec succès les différents NSMT, surtout lorsque seulement deux niveaux sont retenus (83 %). Cette contribution est cependant réduite lorsque trois niveaux doivent être cartographiés; le taux de succès étant de seulement 59 %.

L'ajout des évidences reliées à la géomorphologie et à la géologie accroît de façon significative le niveau de succès lorsque trois NSMT sont considérés, en augmentant de plus de 20 % le taux succès global. Cette augmentation est beaucoup plus subtile lorsque deux NSMT sont considérés. Mis à part l'évidence « zones agricoles », les caractéristiques rattachées à la végétation procurent les connaissances les moins

utiles pour augmenter le taux succès de la classification en offrant une augmentation inférieure à 5 %.

Sur le graphique présenté à la figure 3.13, nous présentons le taux de succès de classification de chaque NSMT. Chacun des points représente la valeur obtenue pour un NSMT selon le scénario considéré. Puisque ces valeurs augmentent constamment entre les scénarios I et IV, ceci révèle que l'ajout d'évidences améliore la qualité de la classification. De plus, la qualité de classification du NSMT faible démontre un accroissement plus franc que les deux autres NSMT, en plus de fournir les plus fortes valeurs de succès. Bien que très élevé, le taux de succès obtenu pour les NSMT forts est légèrement inférieur à celui des NSMT faibles, mais quand même supérieur au taux de succès du NSMT moyen qui n'excède pas 70 %.

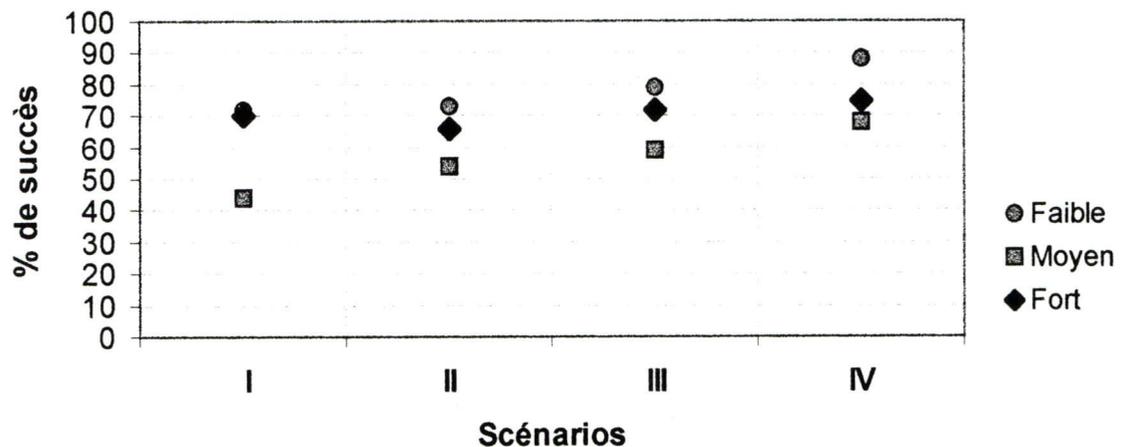


Figure 3.13. Performance du modèle pour établir la distribution spatiale de chacun des NSMT

Ces résultats nous laissent croire à une certaine confusion entre les NSMT forts et moyens, ce qui peut être le résultat de conditions partagées.

Les résultats obtenus dans les deux phases d'analyse statistique (univariée et multivariée) précédentes sont cohérents puisque les évidences retenues dans les différents modèles établis correspondent aux évidences ayant montré des courbes de

proportion fournissant des indices de leur liens intimes avec les conditions de stabilité.

### 3.8. Résultats cartographiques et interprétation

Pour bien visualiser la précision que le modèle de sensibilité procure, nous présentons, à la figure 3.14, une comparaison entre la carte des NSMT telle qu'obtenue en appliquant le modèle de sensibilité du scénario IV, lorsque trois NSMT sont utilisés ainsi que la carte de réalité terrain obtenue de l'expert.

À l'analyse détaillée de ces deux images, nous constatons une répartition relativement égale de chacune des plages principales de NSMT. Cependant, contrairement à la réalité terrain de l'expert, où chaque zone de NSMT semblable est représentée par une plage uniforme, les résultats générés par notre modèle de sensibilité sont moins homogènes et présentent plusieurs secteurs de quelques pixels seulement, isolés ici et là, et non rattachés à une plage de plus grande dimension.

Ceci est clairement démontré dans la partie sommitale, à l'est du lac *Taquiña*. Cet exemple illustre bien le réflexe de l'expert à généraliser les conditions selon une résolution intuitive et non-cartésienne. Cependant, ces artefacts peuvent facilement être retranchés en appliquant différentes techniques de traitements d'images (ex. filtres).

Tel que nous l'avons démontré à partir les graphiques 3.12 et 3.13, on constate effectivement que les NSMT faibles et forts sont mieux définis que les NSMT moyens. À cet effet, deux zones importantes retiennent notre attention : la première

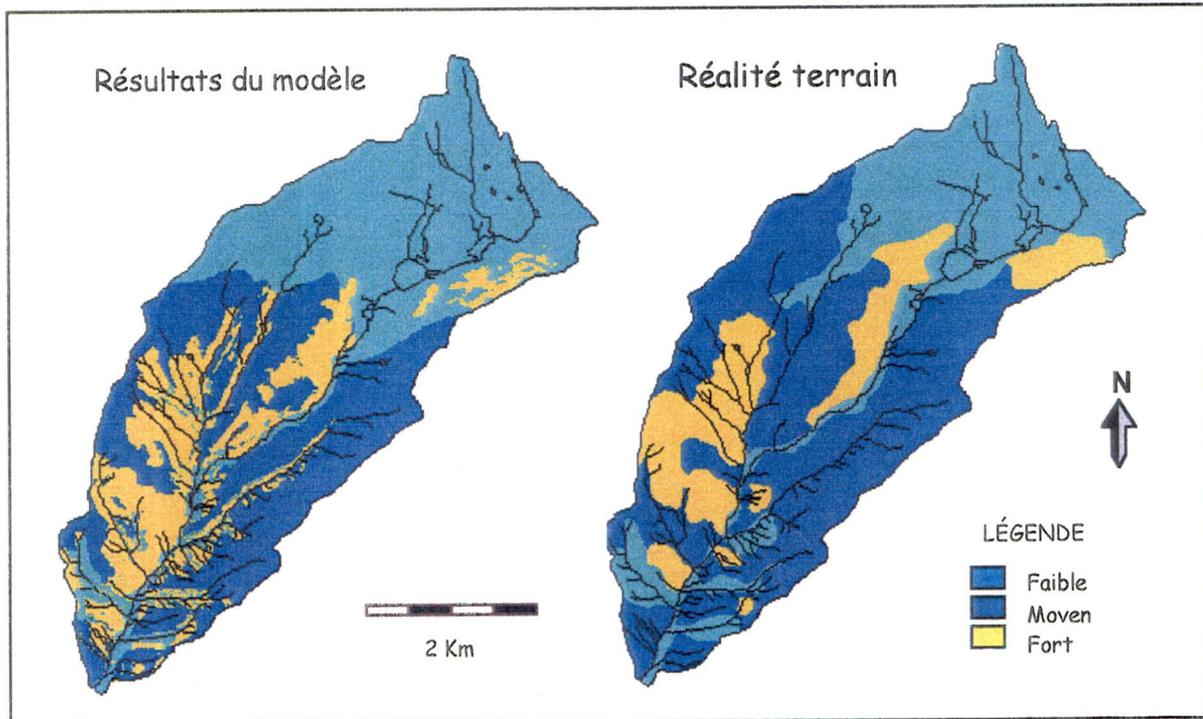


Figure 3.14. Comparaison entre la carte produite par l'expert et la carte obtenue en appliquant le modèle sensibilité.

concerne la zone de NSMT moyen sur le versant Ouest, où l'on note que la force discriminante accordée aux arénites, a supplanté celle du till, pour traduire les valeurs classifiées en NSMT faible plutôt qu'en NSMT moyen, comme l'avait proposé l'expert; la deuxième zone se situe encore sur le versant Ouest, à mi-altitude, où la portion frontalière avec le bassin versant voisin a été classifiée en NSMT moyen plutôt que fort; cette différence provient sans doute des conditions d'écoulement souvent difficiles à caractériser aux limites des bassins. Pour ajouter à cette liste, nous avons aussi remarqué que les fonds de vallée occupés par les cours d'eau sont souvent caractérisés par des NSMT forts selon notre modèle et nous constatons que l'expert a rarement caractérisé spécifiquement ces régions, mais les a plutôt classifiées selon une valeur de NSMT égale à la valeur environnante.

Finalement, bien que les limites des grandes zones ne soient pas reproduites avec perfection par le modèle, nous constatons cependant que l'emplacement des centres de chacune des zones correspond parfaitement à la réalité terrain et que, dans l'ensemble, les résultats obtenus procurent le niveau d'information recherché avec autant de précision que ce que l'expert nous a offert, sachant que son interprétation renferme aussi une part d'incertitude.

### **3.9. Synthèse**

Les résultats amassés jusqu'à présent nous permettent d'identifier concrètement les liens qui existent entre les différentes évidences et les trois NSMT établis par l'expert. D'une part, ces informations nous informent théoriquement sur le contexte dans lequel chacun des NSMT se retrouve, mais aussi elles nous permettent d'élaborer une stratégie opérationnelle pour cartographier les différents NSMT dans les régions voisines de la *Taquiña*.

À l'analyse des différents modèles de sensibilité obtenus pour les différents scénarios considérés, nous avons démontré que l'ajout d'évidences géoécologiques aux évidences topographiques permet d'atteindre une précision élevée. En conséquence, il est important que les évidences reliées au contextes géologique et géomorphologique soient utilisées de sorte que le scénario IV, celui qui offre les meilleurs résultats, puisse être appliqué.

Les résultats obtenus par nos techniques d'extraction des connaissances et d'analyse discriminante binaire sont comparables et légèrement supérieures à celles obtenues par les chercheurs qui ont utilisé les méthodes statistiques multivariées avec les mêmes objectifs cartographiques que les nôtres.

Une contribution importante de cette section de notre recherche est d'avoir pu concevoir un modèle de sensibilité, non pas en s'inspirant des conditions de terrain montrant des évidences d'anciens glissements, mais plutôt à partir des connaissances et de l'expérience d'un expert dans ce domaine exprimé sur une carte qu'il a conçue lui-même.

## 4

# INTÉGRATION DE LA TÉLÉDÉTECTION DANS L'ÉTUDE DE CARTOGRAPHIE RÉGIONALE DES NSMT

### 4.1. Introduction

Nous avons identifié que la cartographie des NSMT peut se réaliser avec succès lorsque la répartition de certaines évidences topographiques et géoécologiques bien précises est connue. L'assemblage de ces informations, sous la forme de la fonction discriminante établie pour le scénario IV, constitue le modèle de sensibilité de la *Taquiña*. Par extrapolation, nous convenons que ce modèle puisse désormais être utilisé avec un taux de succès semblable dans toutes autres régions caractérisées par les mêmes contextes topographique, géologique et géomorphologique, ce qui est le cas pour les 38 bassins versants voisins de la zone témoin. Malheureusement, aucune information autre que celle reliée aux conditions topographiques n'est disponible dans la plupart de ces secteurs et nous avons démontré au préalable que la seule utilisation de ces évidences réduit significativement la qualité des résultats finaux lorsque trois NSMT sont retenus (taux de succès égal à 59 %).

Suite à l'analyse du modèle de susceptibilité (scénario IV), nous avons identifié que mises à part les évidences topographiques, la répartition de cinq évidences géoécologiques doit absolument être connue afin d'atteindre le taux de succès de 78

% généré par le modèle lorsque trois NSMT sont cartographiés. Ces évidences correspondent aux conditions reliées à la nature du substratum rocheux, à l'utilisation des sols et à certaines conditions géomorphologiques. En voici la liste :

- arénites
- champs de blocs
- till
- colluvions rocheuses
- Zones agricoles

La cartographie de ces évidences, dont les caractéristiques sont décrites en détails à la section 3.5, peut être réalisée à l'aide de photographies aériennes ou de visites sur le terrain. Cependant, ces méthodes nécessitent des connaissances pointues afin que des résultats de qualité puissent être obtenus, sans compter que le temps nécessaire à la réalisation de ces étapes est habituellement important.

Dans le contexte du développement final du système expert EXPERIM, nous évitons l'intégration de toute étape nécessitant des compétences expertes, ceci afin de rendre le plus accessible possible la cartographie des NSMT. Nous avons donc retenu l'alternative qui est d'évaluer le potentiel des images satellitaires de trois capteurs différents (RADARSAT, TM et HRV/XS) pour compléter la cartographie régionale des évidences géoécologiques manquantes.

Notre hypothèse de base établit que si les techniques de classification automatisées des images permettent une classification précise des évidences, alors il sera possible d'automatiser ces étapes de traitements et faire en sorte qu'un minimum de manipulations soit exigé d'un usager peu expérimenté. Ces manipulations seront ultérieurement intégrées à la base de connaissances globales et déclenchées automatiquement par EXPERIM, selon les requêtes de l'utilisateur.

Dans ce chapitre, nous présentons les techniques et les résultats de classification obtenus pour cartographier les évidences géoécologiques discriminantes à l'aide d'images satellitaires. Puisque trois types d'images ont été utilisés, nous présentons du même coup, une analyse comparative du potentiel de chacun des capteurs pour atteindre cet objectif.

Nous présentons aussi les résultats de l'application du modèle de susceptibilité lorsque les informations intégrées au modèle proviennent des images satellitaires plutôt que de l'interprétation des photographies aériennes ou des campagnes de terrain. Ces derniers résultats fournissent une évaluation du taux de succès, lorsque le modèle sera utilisé pour régionaliser la cartographie des NSMT.

## **4.2. Description et organisation de la base de données images**

Dans cette section, nous présentons la base de données images intégrées à la base de connaissances globales, ainsi que les différentes manipulations nécessaires pour la construire de façon à ce qu'elle puisse offrir un maximum de potentiel pour cartographier avec succès les cinq évidences géoécologiques.

Ces étapes sont particulièrement importantes pour l'obtention de résultats de qualité lors des étapes subséquentes de classification. Dans les paragraphes suivants, nous exposons en détails chacune des étapes de traitements réalisées depuis la correction radiométrique des images jusqu'à la fusion complètes des trois sources de données utilisées à la base de connaissances globales.

### **4.2.1. Caractéristiques générales des données satellitaires utilisées**

Trois types d'images satellitaires composent la base de données images : une image TM, une image HRV/XS et une image en mode fin de RADARSAT. Un résumé des caractéristiques techniques de chacune des images ainsi que les résultats d'une

évaluation visuelle sommaire du potentiel de chacune à distinguer les évidences géoécologiques recherchées est présenté au tableau 4.1.

Des caractéristiques visuelles, on retient que l'image HRV/XS procure à l'interprète une grande facilité à distinguer à la fois les différentes classes de végétation, mais aussi certains aspects reliés aux conditions géomorphologiques, telles que les champs de blocs et les zones de colluvions rocheuses. Ces distinctions fines sont pratiquement impossible à établir à partir de l'image TM, compte tenue la résolution plus grossière (30 m) qu'elle offre. Cependant, cette dernière procure une plus grande facilité à distinguer les zones agricoles. L'image RADARSAT offre incontestablement l'information la plus réaliste des conditions topographiques et permet aussi d'établir clairement l'emplacement des zones d'anciens glissements ou encore des cicatrices de ravinement intense.

#### 4.2.2. Pré-traitements numériques de base

Chacune des trois images a été découpée de façon à ce qu'elle soit centrée précisément sur la *Taquiña*. Les images TM et HRV/XS, codées initialement en niveaux de gris (DN) sur 8 bits, ont été transformées en luminance à l'aide de l'équation suivante :

$$L^*(\lambda) = DN(\lambda)Gain(\lambda) + Offset(\lambda) \quad (2)$$

Les constantes d'étalonnage ont été obtenues sur le site Internet d'EOSAT pour chacun des deux capteurs, en référence aux dates d'acquisition correspondantes. Le *gain* et l'*offset* de l'équation (2) ont été calculés par les équations suivantes:

$$Gain(\lambda) = [L_{\max}(\lambda) - L_{\min}(\lambda)] / 255 \quad (3)$$

$$Offset(\lambda) = L_{\min}(\lambda) \quad (4)$$

Tableau 4.1. Caractéristiques techniques et impressions visuelles des images satellitaires utilisées

<b>Types d'image</b>	<b>Caractéristiques techniques</b>	<b>Impressions visuelles</b>
<b>TM</b>	Résolution: 30 m Bandes utilisées: 1,2,3,4,5,7 Date d'acquisition: 15 juin 1993	<ul style="list-style-type: none"> <li>• distinction claire entre les zones d'affleurements rocheux et les zones de formations meubles;</li> <li>• distinction difficile entre les champs de blocs et les zones de colluvions rocheuses ;</li> <li>• seules les zones d'agriculture intense peuvent être localisées, elles sont toute fois caractérisées par une importante hétérogénéité spectrale.</li> </ul>
<b>HRVXS</b>	Résolution: 20 m Bandes utilisées: 1,2,3 Date d'acquisition: 20 mai 1993	<ul style="list-style-type: none"> <li>• distinction claire entre les zones de végétation et les zones dénudées;</li> <li>• les zones de till peuvent être facilement distinguées des zones de forêts arbustives ou des forêts indigènes;</li> <li>• les champs de blocs et les colluvions rocheuses peuvent être distinguées des zones d'affleurement rocheux.</li> <li>• les zones agricoles ne peuvent être distinguées;</li> <li>• le réseau de fractures est clairement représenté.</li> </ul>
<b>RADARSAT</b>	Mode: fin 3 Angle de visé : 41-44° Résolution* 3,25 m Bande utilisée: 1 (bande C (5,3 Mhz) Date d'acquisition : 12 mars 1997  *La résolution à l'acquisition est de 6,25 m. Cependant suite aux traitements post-acquisition, appelés <i>Image plus</i> et réalisés par RADARSAT International, l'espacement final entre les pixels est de l'ordre de 3 m.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• distinction subtile entre les zones de végétation et les zones dénudées, lesquelles offrent des valeurs de rétrodiffusion plus faibles (plus sombres);</li> <li>• les caractéristiques du relief sont très bien représentées et très réalistes;</li> <li>• certaines cicatrices d'anciens glissements ou de ravinement intense apparaissent très clairement;</li> <li>• les zones agricoles ne peuvent être identifiées adéquatement.</li> </ul>

Cette transformation permet d'uniformiser les mesures en s'assurant que l'information utilisée est standard et correspond effectivement aux caractéristiques spectrales propres à la surface imagée (Bonn et Rochon, 1992; Bannari, 1996). L'image originale RADARSAT, acquise en 16 bits, a été rehaussée à l'aide d'un filtre de type Lee de dimension 7 X 7. Ce filtre a pour effet d'éliminer le chatoiement, tout en conservant la netteté des limites entre les différentes classes d'objets. Cette étape a été réalisée avant de convertir l'image en 8 bits, pour éviter une trop grande perte d'information valable (Knipp, 1993).

#### **4.2.3. Corrections géométriques**

Puisque les plates-formes satellitaires ne sont pas toujours stables, que les images sont parfois acquises à des angles élevés de visée latérale et que le relief de la zone imagée peut être une source de distorsion, les images satellitaires sont donc souvent déformées géométriquement (Toutin, 1995; 1996). Si ces déformations ne sont pas corrigées, il sera désormais impossible de les superposer convenablement à des documents planimétriques existants, à les intégrer à une base de données thématiques (multiformats vecteur/matricielle) ou encore, à permettre de les fusionner à d'autres données satellitaires.

Puisque nos travaux nécessitent l'intégration complète des données images, sous toutes leurs formes et sans contraintes, nous avons corrigé ces documents avec le plus grand soin possible.

Deux méthodes différentes ont été utilisées pour réaliser ces corrections :

- la correction polynomiale a été retenue pour corriger l'image TM et l'image HRV/XS, puisque, visuellement, il nous est apparu que les déformations étaient de faible magnitude (Novak, 1992); le principe de base de cette

méthode est de retrouver, pour tout point  $m$  et  $n$  de l'image représentée par la fonction  $f(m,n)$ , sa nouvelle position  $u$  et  $v$  dans un autre référentiel au moyen d'une fonction  $h$  déterminée empiriquement; pour ce faire, on identifie des points de repère dans l'image à corriger et dans le système de référence (carte topographique) en se basant sur des évidences visuelles fixes (ex. croisement de routes) (Bégin *et al.*, 1988); pour établir la précision finale de la correction, nous calculons les erreurs résiduelles entre la valeur obtenue par la fonction et la valeur réelle (méthode des moindres carrées); nous avons obtenu pour chacune de ces deux images une erreur de l'ordre du demi pixel (11 m pour HRV/XS et 14 m pour TM);

- la méthode de corrections photogrammétriques a été requise pour corriger l'image RADARSAT; compte tenu de l'angle d'incidence élevé ( $41^\circ$  -  $44^\circ$ ) à l'acquisition, les distorsions géométriques associées à ces images sont souvent plus importantes; en conséquence, la procédure de correction est plus élaborée et doit intégrer les paramètres de saisie et les paramètres reliés aux caractéristiques topographiques de la région imagée; la méthode de corrections photogrammétriques a été appliquée selon la technique décrite par Toutin (1996); le résultat obtenu à partir de cette méthode est très précis et nous fournit une erreur de l'ordre de 4,5 m.

### 4.3. Fusion des images multisources

Par définition, la fusion d'images est une combinaison de deux ou plusieurs images différentes pour former une nouvelle image en utilisant un algorithme précis (Pohl and Van Genderen, 1993). Cette technique a pour principal objectif de combiner des données complémentaires de façon à augmenter la quantité et la qualité de l'information. Ceci permet ultimement d'espérer une meilleure interprétation des conditions observées lors de l'interprétation visuelle et lors de la classification automatisée des images (Pohl and Van Genderen, 1998). Une revue de la littérature,

a révélé que l'application de la fusion d'images satellitaires procure les avantages suivants :

- augmente la netteté de l'image ( Chaves *et al.*, 1991);
- améliore la qualité des corrections géométriques (Strobl *et al.* 1990);
- améliore la reconnaissance de certains détails, invisibles lorsque les données d'un seul capteur sont utilisées (Leckie, 1990);
- augmente la qualité des résultats de classification (Schistad-Solberg *et al.* 1994);
- substitue l'information manquante (ex. nuage, ombre) (Aschbacher and Lichtenegger, 1990).

L'avantage le plus précieux de cette méthode pour nos travaux est la possibilité d'augmenter le taux de classification lors de l'utilisation des méthodes statistiques de classification dirigée.

La méthodologie utilisée pour fusionner les images satellitaires est inspirée de Pohl (1996). Tel que présenté à la figure 4.1, trois étapes importantes sont requises et elles nous apparaissent particulièrement importantes pour s'assurer du succès final.

Le choix d'une méthode d'intégration appropriée est particulièrement important lorsque l'objectif final de la fusion d'images est d'obtenir la meilleure qualité visuelle possible. Lorsque la technique de fusion d'images est retenue pour accentuer la qualité d'une classification automatisée, la méthode d'intégration perd de son importance puisque toutes les valeurs spectrales/rétrodiffusion, de chacun des pixels, sont éventuellement utilisées pour établir la signature des zones d'entraînement.

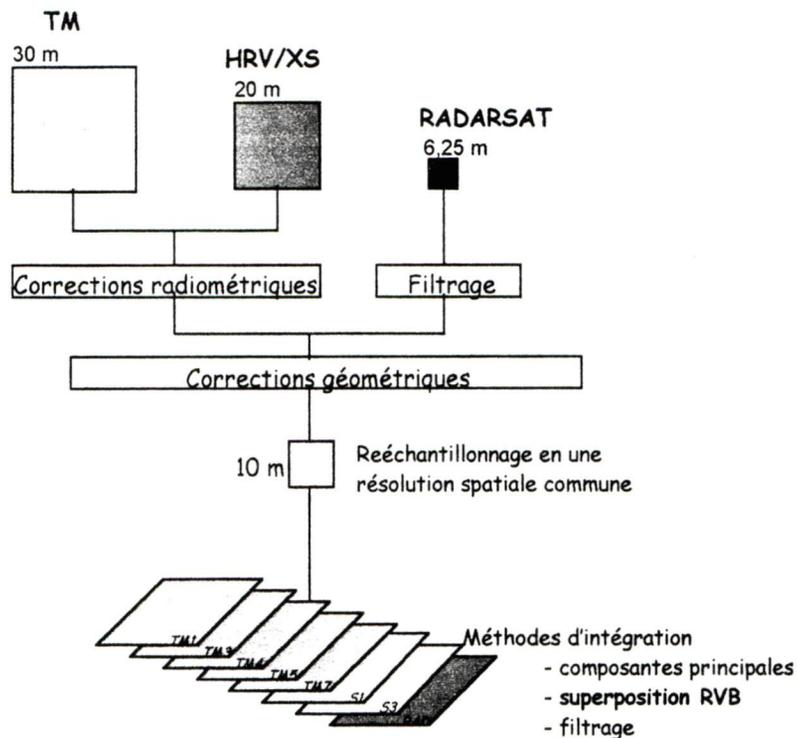


Figure 4.1. Organigramme de la méthodologie de fusion d'image

Jusqu'à présent, seule l'étape de rééchantillonnage des images en taille de pixel d'égales dimensions doit être réalisée afin de compléter la procédure de fusion d'images dans le cadre de nos travaux, les corrections radiométriques et géométriques ayant déjà été réalisées au préalable.

Nous avons établi à 10 m la résolution spatiale commune de l'image finale. Cette décision est fondée sur le fait que nous tenons à bénéficier des meilleurs atouts de chacune des images (Hutchinson, 1982; Valenzuela and Baumgardner, 1990; Harris *et al.*, 1994), donc de la grande résolution spatiale qu'offre l'image RADARSAT et de la variété spectrale offerte par l'image TM. D'autre part, ces données seront ultérieurement introduites dans la base de connaissances globales et les informations thématiques qui y sont incluses sont elles-mêmes intégrées avec une résolution

spatiale de 10 m. Cette résolution est largement acceptable, étant donnée la nature des documents utilisés pour en faire l'interprétation.

En conséquence, la taille des pixels de chaque image a été altérée. Le nombre de pixels des trois bandes de l'image HRV/XS (20 m ) a été quadruplé, celui des six bandes de l'image TM a été multiplié par neuf et, finalement, le nombre de pixels de l'image RADARSAT a été réduit approximativement d'autant, le tout selon la méthode de rééchantonnage linéaire, sans modification des valeurs originales.

La base de connaissances images ainsi créée procure, pour chacun des pixels, un vecteur à neuf valeurs spectrales/rétrodiffusion. Puisque ces données sont maintenant en registre parfait, il est désormais possible de vérifier l'apport en information de chacune des bandes et ainsi vérifier s'il y existe un surplus d'informations inutiles. Pour évaluer cet aspect, nous avons créé une matrice de corrélation intra et interimages. Cette matrice est présentée au tableau 4.2. À l'analyse de cette information, nous avons retranché les bandes qui affichaient une trop forte corrélation entre elles. Bien que les corrélations intrabandes sont généralement plus élevées, comparativement aux corrélations interbandes, nous avons fixé le retranchement lorsque la valeur de corrélation était supérieure à 0,95. Par conséquent, les bandes TM2 et HRV/XS2 ont été retirées de la base de connaissances images.

#### **4.4. Intégration des données images à la base de connaissances globales**

Plusieurs travaux ont démontré l'intérêt d'utiliser les données auxiliaires pour améliorer la qualité de la classification des images satellitaires (Hutchinson, 1982; Franklin and Gillespie, 1989, Franklin *et al.*, 1990, Ehlers *et al.*, 1989; Janssen *et al.*, 1990; Brown *et al.* 1993; Maselli *et al.*, 1995; Hinton, 1996).

Tableau 4.2. Matrice de corrélation

	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7	XS1	XS2	XS3	RAD
TM1										
TM2	0,93									
TM3	0,93	0,97								
TM4	0,74	0,80	0,80							
TM5	0,84	0,86	0,88	0,78						
TM7	0,86	0,87	0,89	0,71	0,95					
XS1	0,69	0,70	0,71	0,57	0,71	0,71				
XS2	0,69	0,71	0,73	0,59	0,73	0,72	0,99			
XS3	0,55	0,54	0,59	0,71	0,63	0,57	0,80	0,82		
RAD	-0,10	-0,11	-0,10	-0,22	-0,12	-0,08	0,01	0,01	-0,10	

Il est en effet reconnu que la simple utilisation des valeurs spectrales pour classifier une région géomorphologiquement complexe peut présenter des résultats décevants (Price *et al.*, 1985). Ceci a même donné mauvaise réputation à la télédétection en générale où plusieurs commentaires et conclusions ont été tirées, tel que les capteurs imageurs devaient être améliorés (Doyle, 1981), les algorithmes de classification devaient être perfectionnés (Dougherty and Gardina, 1987) et que les valeurs spectrales n'étaient pas des descripteurs adéquats pour identifier différentes conditions de terrain (Estes, 1985).

Selon les objectifs visés, il est utile de combiner, aux données images, une catégorie d'informations supplémentaires. À titre d'exemple, des indices géophysiques (Kowalick and Glenn, 1987) et des indices géochimiques (Bolivar *et al.*, 1982) ont été intégrés aux images MSS pour discriminer différentes lithologies géologiques ; des données climatologiques ont été intégrées aux images MSS par Cibula and Nyquist (1987) pour établir une meilleure classification des conditions forestières

Mis à part l'intérêt évident pour améliorer les résultats de classification, l'intégration des données auxiliaires peut aussi servir pour corriger géométriquement et radiométriquement les images dans les secteurs montagneux, où les distorsions sont souvent importantes (Jones *et al.*, 1988; Bertolo *et al.*, 1993). D'autres avantages concernent les études multidates, où les tendances et la nature des changements reliés aux ressources naturelles peuvent être évalués avec une précision plus élevée (Hasting and Di, 1994).

Dans le cadre de ce projet, l'intérêt que nous portons à l'intégration des données satellitaires aux données auxiliaires est essentiellement orienté pour améliorer les résultats de la classification automatisée. À cet effet, plusieurs stratégies de classification sont proposées pour atteindre cet objectif, lesquelles sont ou bien déterministes ou bien probabilistes. Les travaux de McKeown (1987), de Tom et Miller (1984) et d'Hutchinson (1982) en font une revue complète.

La méthodologie que nous avons retenue correspond à un amalgame de ces deux approches.

#### **4.5. Stratégie d'intégration des données auxiliaires pour améliorer les résultats de classification d'images**

La régionalisation de la cartographie des NSMT est possible en autant que la classification des évidences puisse offrir des résultats satisfaisants, sachant que les données satellitaires et les cartes topographiques constituent les seuls éléments d'informations concernant les régions voisines. Pour y arriver, nous avons mis au point une stratégie originale qui utilise pleinement la diversité de la base de connaissances images intégrées aux informations auxiliaires existantes. Cette stratégie a été développée avec le souci qu'elle puisse être utilisée de façon opérationnelle par des usagers non-expérimentés en traitement d'image et en SIG.

En conséquence, chacune des étapes a été mise au point de façon à pouvoir être automatisée subséquemment à partir de EXPERIM.

L'objectif ultime de cette stratégie est d'identifier, avec le plus de précision possible, la présence/absence de chacune des cinq évidences géoécologiques requises par le modèle. Pour ce faire, notre stratégie s'oriente sur les spécificités de chacune des évidences en terme de leurs caractéristiques spectrales multisources et de leurs caractéristiques contextuelles pouvant être établies à partir des informations auxiliaires disponibles. Contrairement à la tendance habituelle, qui vise à établir simultanément l'emplacement de plusieurs éléments d'une même légende dans une même étape de classification, nous cernons plutôt les éléments méthodologiques requis pour obtenir un maximum de précision lorsque chacune des évidences est cartographiée indépendamment. Nous y arrivons en appliquant une stratégie à trois volets (figure 4.2):

- hiérarchisation et probabilités *a priori*;
- sélection spectrale optimale;
- algorithme de maximum de vraisemblance.

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les détails de chacun des volets stratégiques.

#### **4.5.1. Hiérarchisation et calculs des probabilités *a priori***

##### **A- Théorie et principes de base**

La hiérarchisation est une approche déterministe de préclassification. Elle a été développée et appliquée pour la première fois par Strahler *et al.* (1978) et Strahler (1980). D'autres aspects de cette approche ont aussi été élaborés par Hutchinson (1982). Cette méthode de pré-classification est aussi appelée « *stratification* » et a

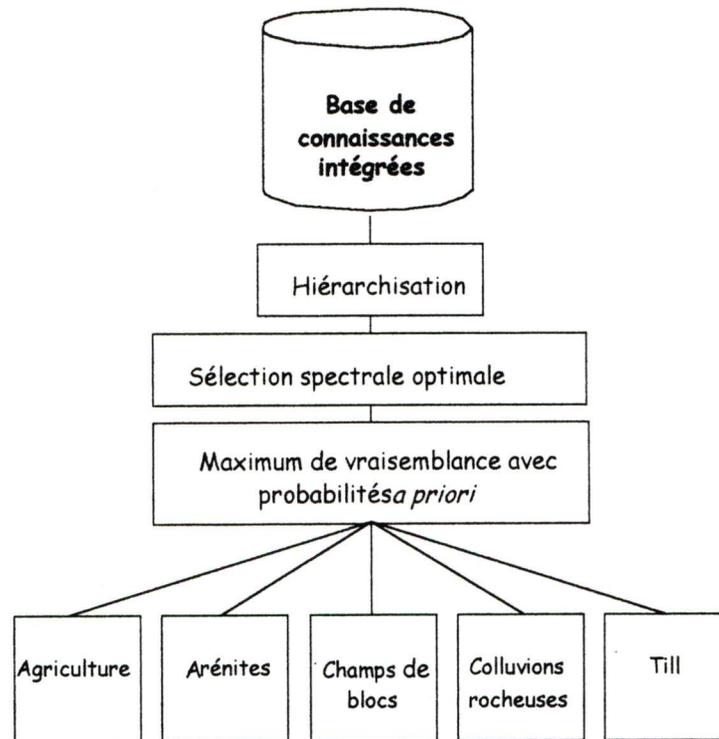


Figure 4.2. Méthodologie de classification retenue

pour objectif d'augmenter la qualité des résultats de classification en appliquant l'algorithme de maximum de vraisemblance sur des sous-secteurs d'une image par le masquage des zones, dans lesquelles il est improbable de retrouver une classe recherchée. L'avantage principal de cette technique est de réduire la variance totale de l'image à classifier selon le principe que, plus la variance interne de l'image est grande, plus élevée sont les probabilités de confondre des classes spectralement semblables (Bryant *et al.*, 1979).

Les travaux de Strahler (1980), de Frank (1988) et de Franklin and Wilson (1992) ont démontré que, dans des conditions de terrain complexes, l'utilisation combinée des informations topographiques et des données satellitaires augmentent significativement les résultats d'une classification automatisée. La méthode de hiérarchisation (*stratification*) de Hutchinson (1982) constitue une des techniques d'intégration de ces deux catégories d'information.

Une application classique de cette méthode est de classifier de façon indépendante les zones caractérisées par des conditions d'éclairement solaire différentes (Carlotto, 1986), selon le principe que les pixels d'une unité quelconque n'offriront pas la même réponse spectrale selon qu'ils sont situés dans une zone ombragée ou dans une zone éclairée.

Par conséquent, il est peu probable que les pixels d'une même unité, localisés dans deux conditions d'éclairement différentes, puissent être regroupés dans une classe unique selon loi bayésienne. L'alternative est donc d'appliquer l'algorithme de classification sur des zones d'éclairement semblables. Pour ce faire, il s'agit d'identifier des règles décisionnelles que l'on applique au MNA, pour permettre la création d'un masque (carte binaire) qui couvrira une zone non-voulue de l'image. Le croisement de ce document binaire et des différentes bandes de l'image utilisée pour la classification, se traduira par la création de deux nouvelles images, chacune d'elles représentant des zones d'éclairement semblables. Le même algorithme de classification sera alors appliqué sur chacune des deux images et le résultat final de classification correspondra à l'amalgame des deux documents classifiés.

Dans le cadre de ce travail, nous utilisons le potentiel de ce principe pour identifier, avec le plus grand succès possible, la présence/absence de chacune des évidences. En conséquence, un masque est minutieusement créé en fonction des attributs topographiques qui caractérisent chacune des évidences. Ultimement, cette stratégie peut être amenée à un niveau supérieur, en utilisant les résultats de la classification d'une évidence pour les ajouter à un masque d'une autre évidence. Évidemment, cela peut se traduire par un enchaînement d'erreurs et ainsi réduire de façon significative la qualité des résultats finaux. De plus, aucune mention claire n'a été identifiée dans la littérature à cet effet.

## B- Identification des règles décisionnelles

Les règles décisionnelles adoptées pour créer les masques sont établies à partir d'une analyse statistique où la répartition de chacune des évidences a été croisée numériquement avec la répartition des 29 évidences topographiques dérivées du MNA. Cet exercice permet d'établir le contexte idéal de chacune des cinq évidences recherchées et d'exclure les zones où il est improbable de la retrouver sur la foi de cette analyse et aussi sur la foi de nos connaissances générales concernant la mise en place de ces unités géoécologiques.

Le masquage des zones peut cependant être une source d'erreur substantielle si les règles appliquées ne correspondent pas exactement aux attributs de l'évidence (Hutchinson, 1982). Donc, suite à l'application des règles décisionnelles de masquage, nous vérifions la qualité du document produit en le comparant à la réalité terrain. Si plus de 5 % de la superficie d'une évidence est retranchée lors du masquage, le masque est jugé non-conforme et de nouvelles règles décisionnelles sont produites en vue de créer un masque plus adéquat.

Étant donné que les règles décisionnelles retenues pour créer les masques sont utilisées lors de la régionalisation de la cartographie des NSMT, nous évitons d'être trop spécifique aux conditions retrouvées dans la *Taquiña*. Ainsi, bien que les règles décisionnelles soient inspirées des résultats obtenus de l'analyse statistique, nous évaluons toutefois ces résultats afin de vérifier si les conditions observées ne sont pas que le fruit d'un hasard ou encore trop spécifiques pour *Taquiña*. À titre d'exemple, l'analyse statistique démontre qu'aucun champs de blocs ne se trouve à une altitude inférieure à 3 500 m; pourtant, il n'y a aucune explication géoscientifique concrète pour expliquer cette situation. En conséquence, cette règle ne peut être généralisée aux autres bassins versants et donc aucun masquage n'est réalisé en ce sens.

Sur le tableau 4.3, nous présentons les règles décisionnelles retenues pour créer les masques de chacune des évidences ainsi que le pourcentage du territoire que chaque masque peut retrancher.

Tableau 4.3. Description des règles décisionnelles pour créer les masques d'évidence

<b>Évidences</b>	<b>Règles décisionnelles</b>	<b>% ret.*</b>	<b>Explication des règles décisionnelles</b>
<b>Champs de blocs</b>	Pentes : > 16° et < 36° Orientation : est, ouest et sud Altitude : < 4 200 m	<b>60</b>	Présent dans la zone d'accumulation – superposés au till.
<b>Arénites</b>	Pentes : < 36° Altitude : > 4 200 m	<b>58</b>	Toujours en affleurement dans la zone d'érosion.
<b>Colluvions rocheuses</b>	Pentes : > 15° Altitude : > 4 000 m	<b>65</b>	Aux pieds de falaises localisées dans la zone d'érosion – variations de T° en altitude, favorables à leur développement.
<b>Till</b>	Pentes : > 15° Altitude : < 4 200 m	<b>34</b>	Difficile à isoler – toujours sous la zone d'érosion
<b>Zones agricoles</b>	Pentes : < 36° Orientation : est, sud et ouest Altitude : < 4 200 m	<b>44</b>	Toujours sur les dépôts de till – puisque les champs peuvent être très petits, ils peuvent être présents sur des replats de faibles dimensions

\* Correspond au pourcentage de la superficie retranchée de l'image originale

Les résultats cartographiques de l'application de ces règles décisionnelles sont présentés à la figure 4.3. Dans la première colonne on y retrouve, pour chaque évidence, les zones restantes une fois que le masque spécifique à l'évidence est appliqué. Les valeurs indiquées dans les colonnes de droites correspondent au pourcentage que chacune des unités de terrain, visibles à partir du capteur, occupe dans l'espace non masqué qui sera classifié. À la lumière de cette figure, on constate que certains masques permettent de retrancher complètement une ou plusieurs classes, démontrant ainsi que certaines unités de nature différente ne peuvent coexister dans un même contexte topographique. Cependant, dans d'autres cas, la superficie de certaines classes ne sera que légèrement amputée.

D'autre part, émanant de cette information, nous avons établi la probabilité *a priori* qu'un pixel appartienne à une des classes restantes dans l'image masquée. Cette information sera intégrée ultérieurement lors de l'application de l'algorithme de maximum de vraisemblance utilisée pour classifier l'image (Strahler, 1980).

#### **4.5.2. Sélection spectrale contextuelle optimale**

Par l'étude des caractéristiques intrinsèques de chacune des évidences, il est effectivement possible d'anticiper les bandes et les combinaisons de bandes spectrales les plus efficaces pour établir la présence/absence de chacune d'elles dans la *Taquiña*. Cependant, plutôt que de s'en remettre à cet exercice théorique, nous avons préféré évaluer systématiquement le potentiel de toutes les combinaisons de bandes possibles. Cette évaluation a été réalisée pour chacune des évidences, en appliquant l'algorithme de maximum de vraisemblance sur l'image masquée de celle-ci; sachant que la sélection spectrale optimale, pour une évidence, est intimement liée au contexte géoécologique dans lequel elle se retrouve.

- La méthodologie adoptée pour établir la sélection spectrale optimale est présentée à la figure 4.4 et est constituée des quatre étapes principales suivantes : sélection itérative de toutes les combinaisons de bandes intra et interimages possibles;
- procédure itérative de masquage pour chacune des évidences recherchées;
- application de l'algorithme de maximum de vraisemblance à partir de sites d'entraînement communs et en considérant les résultats du calcul des probabilités *a priori* pour chacun des masques d'évidences;

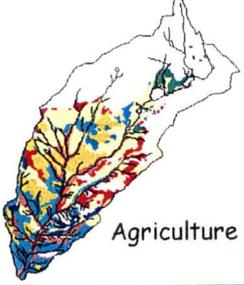
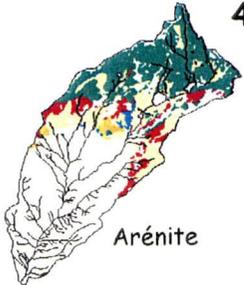
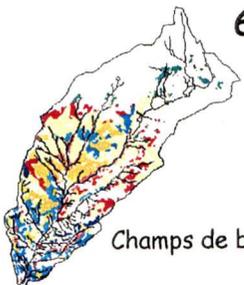
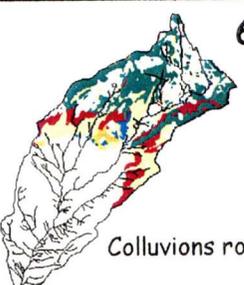
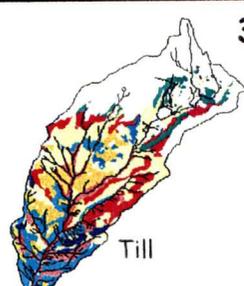
MASQUES	Arbuste	Eau	Agricult.	Shale	Quartzite	Arénite	Till	Forêts	Blocs	Colluvions rocheuses
<b>56 %</b>  Agriculture	18	0	17	9	2,5	3	35	13	1,8	0,5
<b>42 %</b>  Arénite	0,3	0	3	9	0	51	32	0	1,7	2,9
<b>60 %</b>  Champs de blocs	14,4	0	18	10	2,2	3,6	40	8,5	2,8	0,5
<b>64 %</b>  Colluvions rocheuses	0,3	0	2,7	13	0	43	34	0	2	5
<b>34 %</b>  Till	16	0	13	13	3	6	33	12	2	2

Figure 4.3.Représentation cartographique des masques et caractéristiques statistiques

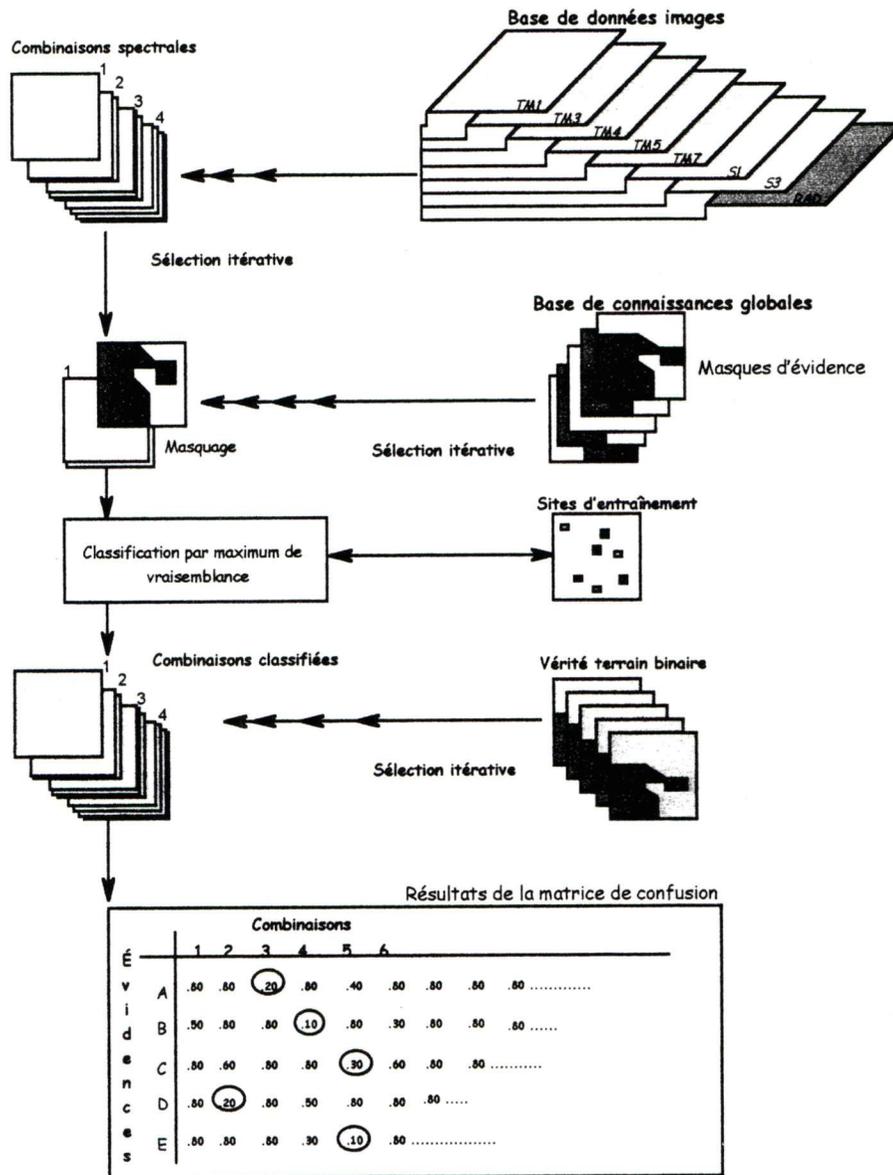


Figure 4.4. Organigramme de la méthodologie de sélection spectrale optimale

- évaluation de l'exactitude de chacune des classifications à partir de la construction d'une matrice de confusion et de l'utilisation de la valeur d'exactitude de l'ensemble de la classification, selon la méthode présentée à la figure 4.5.

Cette méthodologie utilisée pour déterminer le potentiel des combinaisons intra et interimages permet d'identifier concrètement la capacité de chacun des essais pour identifier la répartition de chacune des évidences. Puisque l'exécution de ces essais exige plusieurs étapes et requiert une rigueur continue, nous avons conçu une application informatique qui automatise la procédure itérative complète pour l'exécution de l'ensemble des essais requis.

Les résultats de cet exercice seraient différents si l'évaluation avait été opérée sur l'image entière, puisque l'algorithme de maximum de vraisemblance est fondé sur la probabilité qu'un pixel appartienne à une des classes potentiellement présente (Zhuang *et al.*, 1995). Conséquemment, si deux classes ont des caractéristiques spectrales semblables, pour une combinaison quelconque, il est fort probable que cette combinaison affiche des résultats plus ou moins intéressants. Cependant, l'application du masque peut retrancher complètement une des deux classes et faire en sorte que la combinaison affichant des résultats médiocres soit finalement retenue comme étant la plus efficace.

Finalement, il est important d'indiquer que cette évaluation ne constitue pas une mesure de l'impact de la télédétection sur la qualité des résultats finaux de cartographie des NSMT, mais plutôt un indice nous permettant d'évaluer correctement le potentiel brut de chacun des capteurs à pouvoir identifier les évidences recherchées. Les connaissances reliées à cette étape seront intégrées, à titre de faits, dans la base de connaissances globales.

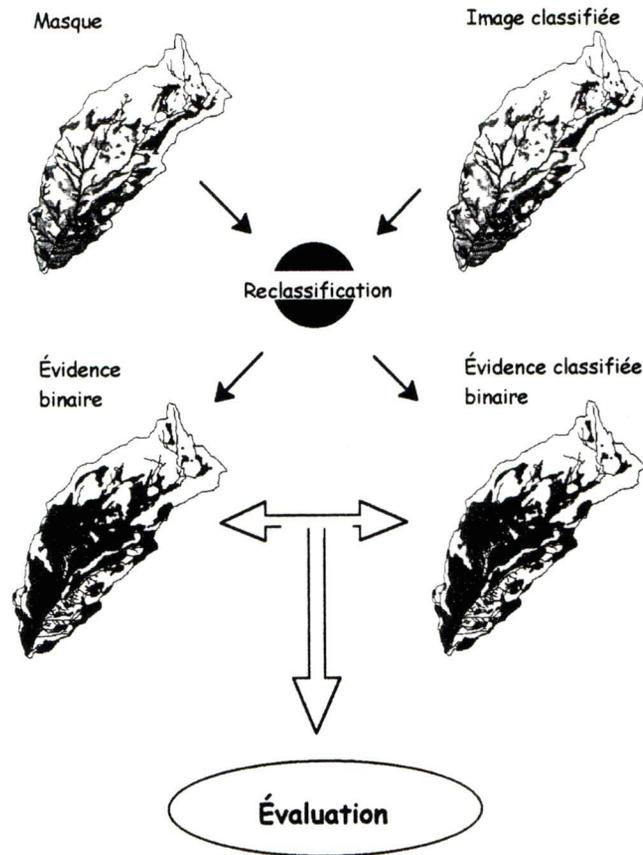


Figure 4.5. Méthodologie d'évaluation de la sélection spectrale optimale

#### 4.5.3. Réalité terrain spectrale et sites d'entraînement

La carte finale de réalité terrain a été construite à partir des documents thématiques disponibles. Cette carte provient du croisement de trois cartes thématiques principales: 1) la carte géologique; 2) la carte géomorphologique et 3) la carte de végétation.

L'intégration de ces trois documents a pour but de créer une carte de réalité terrain spectrale qui correspond à ce que les capteurs satellitaires enregistrent réellement au sol. Cette étape est très importante, puisque les limites lithologiques ou les limites

des formations meubles montrées sur les cartes sont habituellement établies par extrapolation des observations faites durant les campagnes de terrain. Ainsi, certaines portions de ces unités seront, quelques fois, recouvertes de végétation ou encore, elles seront recouvertes par des formations meubles. L'intégration de ces différents thèmes a justement pour objectif d'établir ce qui est mesuré au capteur. C'est à partir de cette carte de « réalité terrain spectrale » que la qualité des résultats de classification des images sera établie.

L'identification des sites d'entraînement demeure un élément important de la procédure de classification automatisée des données satellitaires. Chacun des sites correspond à un regroupement contiguë de pixels, à partir desquels des mesures statistiques sont calculées pour caractériser les conditions spectrales d'une unité particulière présente dans la zone d'étude. Selon la superficie des unités, deux ou plusieurs sites d'entraînement sont utilisés pour caractériser spectralement l'unité. L'emplacement de ces sites a été établi judicieusement de façon à ce que les caractéristiques qui en seront tirées soient représentatives de l'évidence à classifier. Si ces sites sont mal sélectionnés, la qualité de la classification sera fortement hypothéquée. Pour ce faire, nous avons d'abord identifié ces sites à partir des photographies aériennes puis nous les avons validé sur le terrain (Péloquin *et al.*, 1995).

Il faut aussi tenir compte que, même si tous les sites d'entraînement sont localisés dans la zone témoin, nous jugeons qu'ils sont représentatifs, sachant que les trois images utilisées recouvrent l'ensemble du secteur de notre étude et que les zones les plus éloignées des sites d'entraînement sont localisées à moins de 50 km de la *Taquiña*.

#### 4.6. Résultats et interprétation

La procédure itérative de combinaison de bandes a permis d'évaluer 23 combinaisons intrabandes et 29 combinaisons interbandes. Les résultats de cette analyse permettent maintenant d'identifier les combinaisons spectrales qui offrent le potentiel le plus élevé pour établir la répartition de chacune des évidences. Ces résultats sont présentés au tableau 4.4. Ils indiquent, pour chacune des évidences recherchées, la meilleure combinaison intra-image et la meilleure combinaison interimage. Les valeurs encadrées indiquent la meilleure performance obtenue indépendamment du type de combinaison utilisé.

L'emplacement des zones de colluvions rocheuses et l'emplacement des champs de blocs affichent les meilleurs résultats de classification, indépendamment du type de capteurs utilisés. Ces résultats sont peu surprenants, compte tenu de leurs caractéristiques physiques et surtout du contraste que ces évidences présentent dans le contexte où elles sont localisées. Les champs de blocs sont habituellement dénudés et superposés au till qui, lui, est recouvert d'une végétation de graminées. Ces champs de blocs pourraient être confondus avec les affleurements d'arénites présents dans la partie sommitale et qui constituent la source principale de blocs. Cependant, puisque les champs de blocs tendent à se déplacer vers le bas de la pente, ceci a pour effet de limiter l'évolution de l'altération superficielle à un degré inférieur à celui qui caractérise les arénites en affleurements.

Il faut aussi mentionner que, dans la procédure de masquage, la majorité des zones d'arénites sont retranchées. La même explication est aussi valable pour les zones de colluvions rocheuses qui, elles aussi, se distinguent bien des lithologies de même nature en amont. Dans les deux cas, la même sélection de bandes TM a montré les résultats les plus performants.

Tableau 4.4. Résultats de classification des évidences à partir des meilleures combinaisons intra et interimages

	<b>Capteurs</b>	<b>Bandes</b>	<b>Agriculture</b>	<b>Arénites</b>	<b>Champs de blocs</b>	<b>Colluvions rocheuses</b>	<b>Till</b>
I N T R A	<b>TM</b>	<b>1,3,7</b>	86 %	-	-	-	-
		<b>1,3,4,7</b>	-	74 %	-	-	-
		<b>1,4,7</b>	-	-	93 %	95 %	-
		<b>4,5,7</b>	-	-	-	-	52 %
	<b>HRV/XS</b>	<b>3</b>	81 %	-	-	-	48 %
		<b>1,3</b>	-	72 %	91 %	96 %	-
	<b>RADARSAT</b>		83 %	60 %	89 %	92 %	41 %
I N T E R	<b>Combinaisons</b>						
	<b>Rad – S3</b>		88 %	-	-	-	-
	<b>Tm1,3,4,7 – S1,3</b>		-	68 %	-	-	-
	<b>Tm 1,4,7 – S13</b>		-	-	93 %	97 %	-
	<b>Tm 4,5,7 – S3</b>		-	-	-	-	48 %

Les zones agricoles sont aussi bien reconnues. Effectivement, au moment de la prise des images, ces zones étaient, pour la plupart, dénudées et donc les valeurs enregistrées correspondaient davantage à celles des sols nus. Ainsi, puisque ces sols nus sont peu représentés dans la région, ceci a un effet contrastant et unique. En fait, les seules zones de sols nus autres que les zones agricoles « non-cultivées », sont les secteurs de ravinements intenses. Puisque ces zones ont été retranchées lors du masquage, dû à la pente trop forte sur laquelle on les retrouve habituellement, elles ne sont donc pas intervenues pour réduire la qualité des résultats.

Les zones d'arénites n'ont pas été classifiées avec un très grand succès. Pourtant, à l'observation des images, on se serait attendu à des résultats plus performants. Il est donc possible que les zones d'arénites ne sont pas aussi homogènes qu'on ne le prétend ou encore, que la réalité terrain établie pour cette évidence n'est pas totalement exacte. Effectivement, lors des visites sur le terrain, nous avons noté que les arénites sont plutôt difficiles à cartographier avec précision, compte tenu des nombreuses plages de till qui les recouvrent à certains endroits et qui peuvent laisser croire à un affleurement lors de l'interprétation des photographies aériennes

Les zones de till sont relativement difficiles à identifier. Ceci s'explique de trois façons différentes : 1) la nature même du dépôt qui est granulométriquement très variable; 2) la couverture végétale qui recouvre habituellement ce dépôt, est très changeante avec l'altitude et 3) le masque appliqué est de faible superficie étant donnée la forte représentation de cette unité dans la *Taquiña* et des différents contextes dans lequel elle peut être présente. En conséquence, l'image finale à classifier contient une variance élevée, ce qui laisse planer une plus grande confusion durant le processus de classification.

Bien que les résultats de classification soient très rapprochés entre les capteurs utilisés, nous constatons que les bandes de TM offrent des résultats légèrement supérieurs aux autres capteurs. Nous sommes toutefois très satisfaits des résultats obtenus avec l'image RADARSAT qui procure les meilleurs résultats comparatifs lorsqu'une seule bande est utilisée. Ce succès ouvre la porte à l'application d'une méthodologie plus élaborée permettant de réaliser un suivi des conditions et de réévaluer la carte de NSMT année après année, sans avoir à ajuster les statistiques des sites d'entraînement ou encore à ajuster les résultats de la sélection spectrale. Ces dernières démarches devraient s'effectuer à grand frais si les conditions climatiques empêchent les capteurs TM et HRV/XS d'acquérir les images à la même date que celle utilisée pour le développement du modèle.

Les combinaisons interimages ont effectivement montré, dans certains cas, des résultats de classification plus élevés. Mais lorsque l'on considère les efforts nécessaires d'intégration, leur utilisation ne nous apparaît pas toujours incontournable.

#### **4.7. Incidence de l'utilisation de la télédétection sur les résultats obtenus à partir du modèle de sensibilité**

Les résultats de classification obtenus à la section précédente nous informent sur la qualité avec laquelle la télédétection peut identifier la présence/absence des évidences requises. Les erreurs mesurées entre la réalité terrain et les résultats de classification, nous indiquent le degré de succès avec lequel la classification des images peut recréer la répartition véritable de chacune des évidences. Puisque le degrés de succès n'est pas total, ceci a nécessairement une incidence sur la qualité finale des résultats de cartographie des NSMT établis à partir du modèle de sensibilité développé. Cependant, l'incidence de ces erreurs est indirecte.

L'évaluation adéquate de l'erreur finale doit nécessairement intégrer l'analyse contextuelle multivariable qui caractérise chacun des pixels. Chacun des pixels se caractérise par une série de 39 valeurs binaires, traduisant un ensemble de conditions topographiques et géoécologiques. De plus, chacune des variables est associée à un coefficient qui exprime son poids relatif dans la fonction discriminante.

Dans le contexte de l'application de la télédétection pour les fins de régionalisation, cinq de ces variables sont établies à partir de différents types de données satellitaires. Si, parmi ces variables, l'une d'elle est erronée, l'incidence de cette erreur sur le résultat final est tributaire de son poids relatif dans la fonction. De plus, l'effet cumulatif des erreurs de classification des évidences établies par télédétection est intimement lié au contexte dans lequel l'erreur a été produite. Pour simplifier ce raisonnement, imaginons une situation extrême où les conditions topographiques

sont largement favorables à une situation de NSMT faible. Si, par erreur de classification, la variable « zones agricoles » affiche une valeur positive (présence); donc une condition adverse à la stabilité, et que cette valeur soit erronée; dans ce contexte particulier, bien que la puissance du résultat de l'équation soit diminuée, il est peu probable que la tendance du résultat final de cette équation soit complètement faussé.

La nature de l'erreur doit aussi être considérée. Puisque nous évaluons indépendamment la présence/absence des évidences, il est probable qu'une erreur de classification fera en sorte d'assigner deux conditions différentes pour un même pixel ou encore qu'un pixel soit assigné à une condition qui n'est pas la sienne. Par exemple, dans le cas où un pixel de champs de blocs est assigné à une valeur de 0 (inexistant) et que, pour ce même pixel, l'évidence de colluvions rocheuses est activée (1), l'incidence issue de cette erreur de classification sera pratiquement nulle puisque, dans les deux cas, l'interprétation du modèle va dans le même sens, c'est-à-dire une zone de NSMT fort. Ainsi, parmi les évidences cartographiées à partir de la télédétection, la présence de trois d'entre elles suggère des NSMT forts (colluvions rocheuses, champs de blocs et zones agricoles). En conséquence, si l'erreur de classification a différée de la réalité terrain en indiquant la présence d'un champs de blocs plutôt qu'une zone de colluvions rocheuses, le résultat de l'interprétation finale ne sera pas grandement affecté.

L'évaluation chiffrée de cette interprétation est obtenue en échangeant les valeurs de réalité terrain du corpus d'échantillon « validation » par les valeurs obtenues à partir de la télédétection. La différence de précision que le modèle génère, selon les deux ensembles de données, permet d'estimer l'erreur induite par l'utilisation de la télédétection et donc de l'erreur attendue lors de la régionalisation de la cartographie des NSMT. La compilation de ces résultats est présentée à la figure 4.6. Elle permet d'abord d'identifier l'incertitude associée à l'utilisation de chacun des capteurs et ensuite de déterminer le capteur le plus performant dans le cadre d'une étude de

cartographie des NSMT pour un contexte géoécologique comparable à celui de la Taquiña.

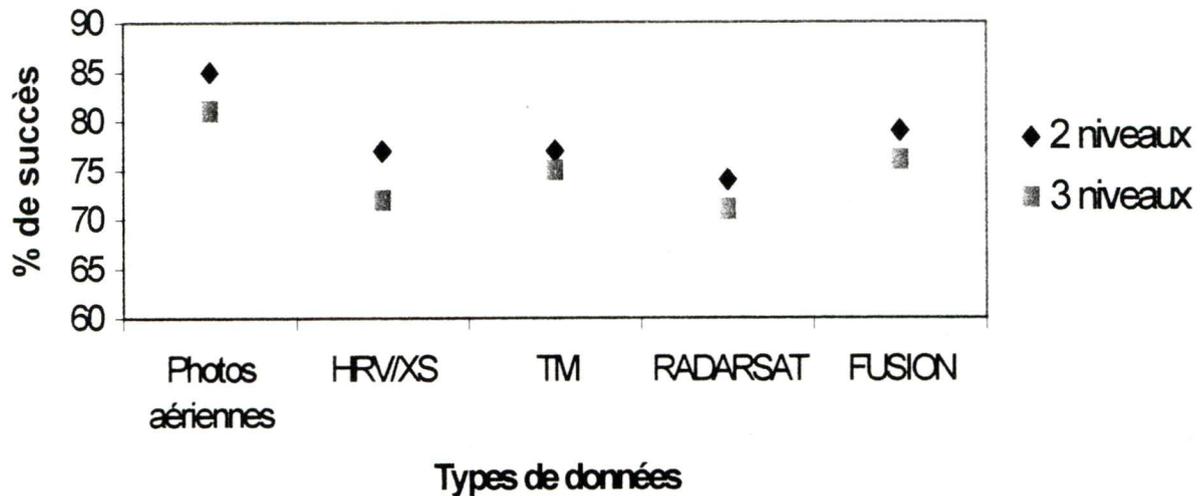


Figure 4.6. Évaluation de l'incertitude du modèle selon le ou les capteurs utilisés

Les résultats de cette évaluation démontrent une baisse moyenne de l'exactitude d'environ 10 % lorsque la télédétection est utilisée en remplacement de l'interprétation des photographies aériennes ou encore des campagnes de terrain. Ceci s'explique, en partie, par la très faible qualité des résultats obtenus pour établir la répartition de l'évidence « till », qui constitue un élément important dans l'établissement du NSMT moyen.

Il faut aussi apprécier la performance presque égale de chacun des capteurs, étant donné leur fort potentiel à distinguer les colluvions rocheuses et les champs de blocs. Le capteur TM offre toutefois une performance légèrement supérieure puisque les arénites, qui caractérisent les NSMT faibles, sont plus clairement cartographiées

#### 4.8. Synthèse

Ce chapitre nous a permis d'évaluer le potentiel de trois différents capteurs pour établir la répartition de certaines conditions géoécologiques importantes à l'établissement des NSMT dans le contexte d'une phase finale de régionalisation de l'étude.

Le potentiel des images utilisées a été mis en valeur par le développement d'une stratégie originale de classification, permettant d'identifier la présence/absence d'une évidence quelconque. Contrairement aux méthodologies traditionnelles de classification, avec lesquelles on établit simultanément la répartition de toutes les classes d'un thème particulier (ex : toutes les classes lithologiques de la carte géologique), nous avons plutôt développé une stratégie visant à établir l'emplacement d'une seule évidence à la fois, en identifiant les contextes spectral et spatial (classification hiérarchique) les plus performants pour déterminer l'emplacement de chacune d'elle.

Les efforts investis ont été rentables puisque le succès de classification obtenu est très élevé. Nous avons pu, durant l'élaboration de cette stratégie, identifier le capteur TM comme étant le plus performant pour distinguer les cinq évidences géoécologiques requises par le modèle. Nous avons aussi identifié que les résultats issus de la fusion des trois types d'image satellitaires entre elles ne justifient pas l'excédent de traitements que cette technique requiert.

Compte tenu des succès obtenus lors de la classification des évidences à l'aide de la télédétection, il est désormais possible de régionaliser la cartographie des NSMT à l'ensemble des bassins versants voisins, lesquels sont caractérisés uniquement par des données topographiques. Nous avons évalué que l'incertitude induite par l'intégration des données satellitaires à la base de connaissances globales est inférieure à 10 %.

## 5

# DÉVELOPPEMENT DU SYSTÈME EXPERT EXPERIM

### 5.1. Introduction

Les résultats présentés et discutés aux chapitres précédents nous permettent de franchir une étape importante, celle de rendre disponibles les connaissances requises pour régionaliser la cartographie des NSMT à l'ensemble des bassins versants qui entourent la ville de Cochabamba. Cette étape se nomme l'acquisition des connaissances (Raju *et al.*, 1990). Ces connaissances identifient la nature des facteurs impliqués et leur importance relative dans le modèle de sensibilité développé. Elles nous informent aussi sur le contenu de la base de données et sur les manipulations techniques requises pour en tirer le maximum d'informations, particulièrement dans le contexte où les données satellitaires sont utilisées. En d'autres termes, nous avons identifié les faits et les règles qui contrôlent chacun des trois NSMT pour les conditions géoécologiques qui caractérisent la région de Cochabamba et de toute autre région dont le contexte géoécologique est semblable.

Ces connaissances étant maintenant disponibles, l'application du modèle de sensibilité peut se faire sans solliciter les connaissances de l'utilisateur. Le modèle de sensibilité développé représente donc, d'une façon imagée, une recette à suivre. Cependant, pour réussir cette recette, il est indispensable d'y inclure les ingrédients

requis, de bien les doser et, bien entendu, de les intégrer en temps opportun. Pour y arriver correctement, il est pratiquement indispensable d'utiliser des outils tels les systèmes de traitement d'images (TI) et les SIG. À ce moment-ci, nous prétendons que l'utilisateur sait maîtriser confortablement ces outils. Cependant, ces compétences techniques constituent un prérequis exigeant, compte tenu de la complexité de certains traitements et de l'utilisation générale de ces systèmes.

Les logiciels actuellement sur le marché offrent une gamme de plus en plus étendue de fonctions et d'algorithmes, dans le but de séduire un nombre plus élevé d'utilisateurs potentiels. Cette tendance fait en sorte que le même logiciel peut être utilisé autant par les forestiers, les agronomes, que par ceux intéressés à la caractérisation des glaciers marines ou encore à l'identification des NSMT. Bien que cela puisse sembler avantageux pour certains, nous y trouvons un inconvénient majeur : celui d'imposer une lourdeur inutile et une courbe d'apprentissage très abrupte. Il faut s'en remettre à l'évidence qu'un utilisateur moyen utilisera ces logiciels pour étudier un seul aspect d'une problématique bien précise. En conséquence, l'utilisateur sera confronté à une longue liste de fonctions inutiles dont il ne se servira peut-être jamais. L'utilisateur doit donc filtrer les fonctions requises en relation avec ses besoins précis au travers des multiples menus qui lui sont offerts.

Sachant que les difficultés associées à l'utilisation de ces logiciels peuvent être une source de dissuasion, nous avons conçu EXPERIM, un système expert (SE) qui assiste l'utilisateur dans la production régionale des cartes de NSMT pour les 38 bassins versants qui entourent la ville de Cochabamba.

Dans la première partie de ce chapitre, nous décrivons la procédure complète que représente la régionalisation des cartes de NSMT. Ensuite, nous exposons quelques notions sur l'intelligence artificielle et les systèmes experts en général. Enfin, dans la deuxième partie, nous présentons une description complète des étapes de développement de EXPERIM.

## 5.2. Procédure de régionalisation de la cartographie des NSMT

La régionalisation rassemble les connaissances établies et les étapes requises pour permettre, à partir du modèle de sensibilité, de cartographier les NSMT dans les bassins versants voisins de la *Taquiña*. Selon la nature des évidences identifiées comme étant les plus performantes, nous favorisons une approche "bassin par bassin", c'est-à-dire que chaque bassin est analysé indépendamment. La délimitation des bassins peut se faire manuellement, par l'analyse de la carte topographique régionale ou encore automatiquement, à partir des fonctions SIG appliquées sur le MNA. L'approche « bassin par bassin » doit être retenue puisque plusieurs évidences performantes sont reliées aux conditions de drainage et aux conditions d'écoulement, lesquelles sont calculées en fonction des caractéristiques locales d'un bassin versant précis. La méthodologie retenue est présentée à la figure 5.1

Les étapes nécessaires à la régionalisation offrent un cadre opérationnel pour les responsables du projet, de façon à mettre en œuvre l'application du modèle de sensibilité. Ce cadre définit la hiérarchie des étapes pour établir avec une homogénéité constante la cartographie des NSMT dans chacun des 38 bassins versants. Ce cadre constitue le squelette de EXPERIM, où chacune des étapes méthodologiques correspond à une série de manipulations nécessaires permettant d'accéder à une étape subséquente.

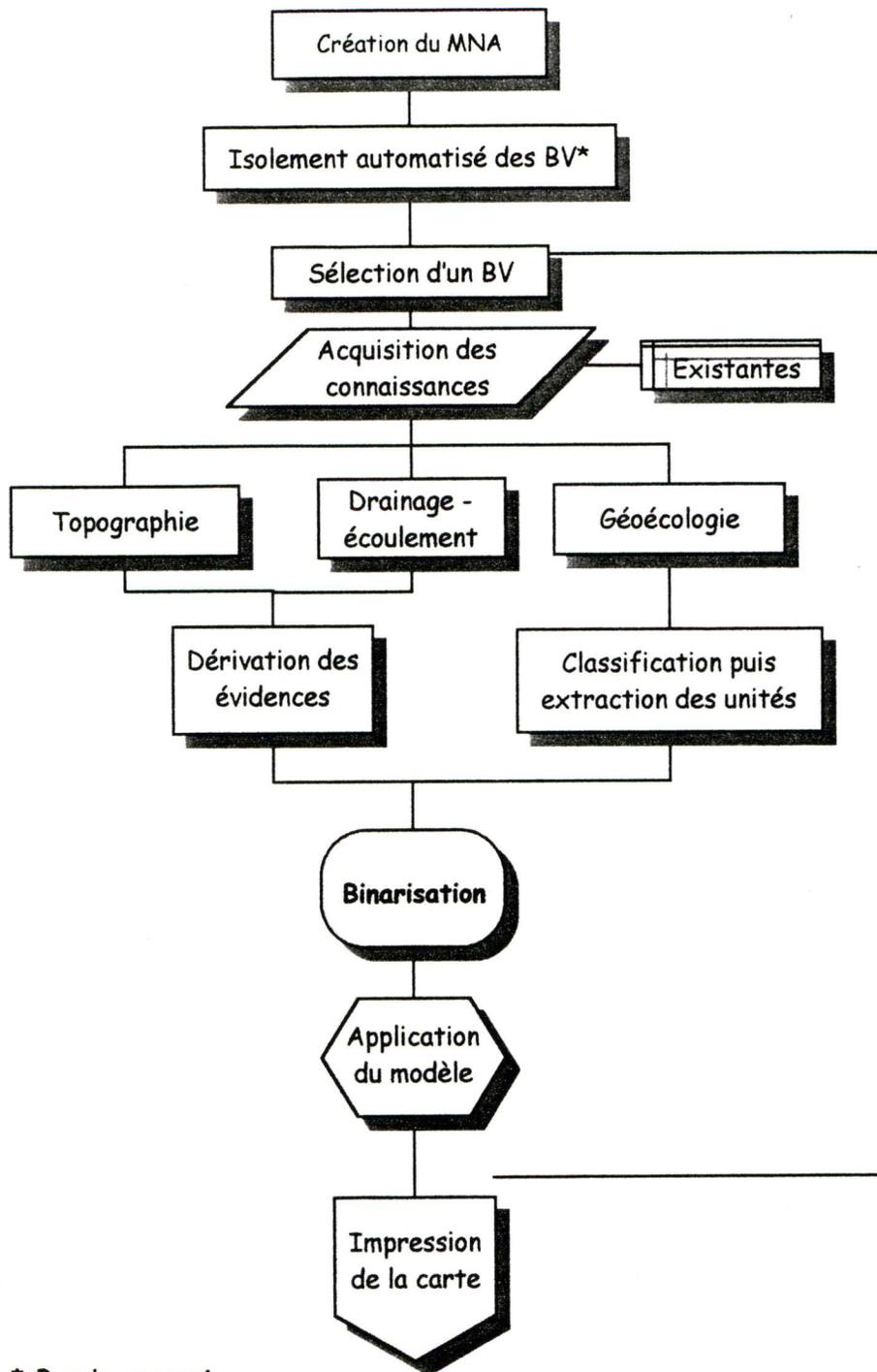


Figure 5.1. Méthode de régionalisation

### 5.3. Les systèmes experts

Les systèmes experts (SE) font partie intégrante du monde de l'intelligence artificielle (IA) qui, selon Rich et Knight (1991), se définit comme étant « *un champs d'étude visant à faire réaliser à un ordinateur, des fonctions qu'un humain réalise pour l'instant avec plus de succès* ». Dans son sens pratique, un SE est une application informatique dédiée à solutionner un problème précis. Sa structure est organisée de façon à ce que l'exécution reproduise, le plus fidèlement possible, le processus qu'un expert adopterait s'il devait solutionner ce problème lui-même, à partir de ses propres compétences (McKeown, 1987). Les SE sont donc conçus par l'encodage informatique du jugement, de l'expérience et de l'habileté d'interprétation d'un expert dans un domaine particulier. Les différences profondes entre les SE et les logiciels conventionnels sont présentées au tableau 5.1.

Tableau 5.1. Différences entre les systèmes experts et les logiciels conventionnels

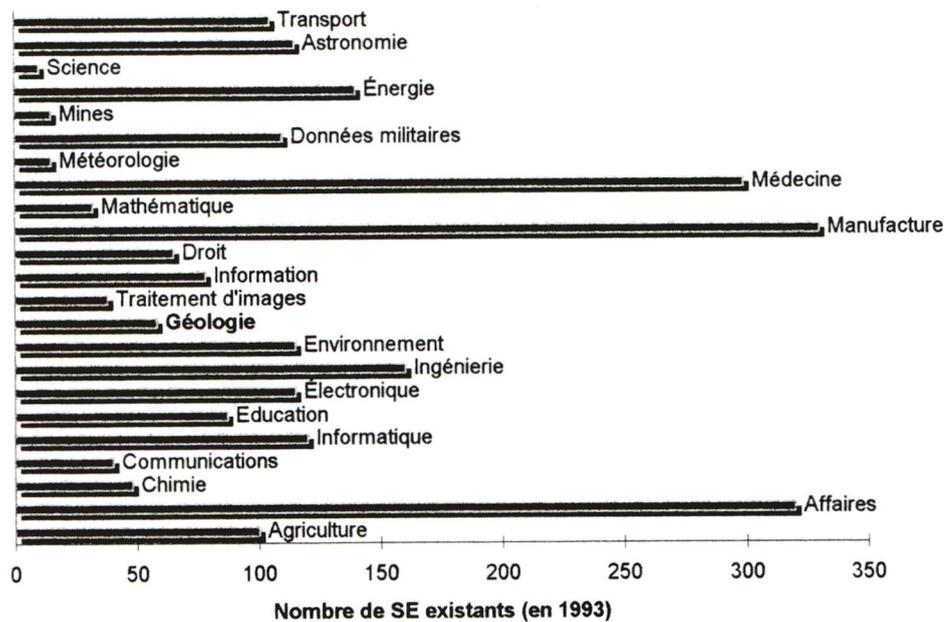
<b><i>Systemes experts</i></b>	<b><i>Logiciels conventionnels</i></b>
Heuristique	Algorithmique
Modulaire et autonome de sa base de connaissances	Connaissances intégrées dans sa structure de contrôle
Manipulations efficaces d'immenses bases de données	Manipulations efficaces d'immenses bases de données
Procédures d'inférence	Procédures répétitives
Symbolique	Numérique

Les premiers SE ont vu le jour à la fin des années 1950, mais le véritable développement s'est produit 30 ans plus tard, au milieu des années 1980. Dans un sondage réalisé par Durkin (1993), on comptait à peine 100 SE en 1985 et, trois ans plus tard, on en comptait 20 fois plus. Cette croissance phénoménale dans le développement des SE est attribuée en partie à l'équipement plus sophistiqué disponible mais aussi et surtout à une série de nouvelles applications informatiques qui rendent plus accessible la création de ces systèmes.

En général, les SE sont utilisés pour réaliser une variété de procédures complexes qui souvent ne peuvent être réalisées que par un nombre d'individus extrêmement qualifiés (Leung and Leung, 1993; Leung *et al.*, 1997b; Mering, 1988). Cet avantage qu'offre les SE a rapidement séduit le monde des affaires, celui de l'industrie manufacturière ainsi que celui de la médecine, où plus de 60 % des SE existants à ce jour sont orientés spécifiquement vers ces champs d'application (Waterman, 1986). Sur la figure 5.2, on présente les résultats de ce sondage.

Les champs d'application qui peuvent être avantagés par l'utilisation d'un SE possèdent habituellement les caractéristiques suivantes :

- les connaissances requises pour solutionner un problème décisionnel sont existantes et peuvent être isolées avec succès;
- la solution au problème requiert des connaissances qui ne sont pas seulement exactes, mais qui nécessitent aussi un certain niveau d'interprétation et de jugement;
- le problème à solutionner est suffisamment complexe et requiert une expertise spécialisée ou encore des connaissances qui proviennent de plusieurs sources différentes;
- le problème est fréquemment confronté et la mise sur pieds d'un SE justifie les coûts de son développement.



Source : Durkin, 1993

Figure 5.2. Inventaire des SE opérationnels selon le champs d'application

#### 5.4. Les systèmes experts d'information géographique

Puisque la gestion des ressources naturelles se fait de plus en plus avec l'aide des SIG, il est devenu habituel d'intégrer un niveau de connaissances supplémentaires à ce système de traitement. Pour y arriver, il suffit de joindre un SE aux SIG existant, pour en faire des systèmes plus complets que l'on nomme « systèmes experts d'information géographique (SEIG) ». Ce mariage naturel des deux systèmes procure deux avantages précieux :

- offrir aux usagers peu expérimentés un interface plus convivial (Egenhofer and Frank, 1990; Ripple and Ulshoefer, 1987; Burrough, 1992);

- permettre de réaliser des tâches d'analyse spatiale complexes qui nécessitent habituellement des connaissances très avancées dans un domaine précis d'application (Leung and Leung, 1993; Robinson and Frank, 1987).

Sans l'ajout d'éléments de connaissances aux SIG, le décideur responsable de la gestion des ressources naturelles devra à la fois être expert dans son champs d'application précis et également expert de l'utilisation des SIG (Robinson *et al.*, 1987). De plus, dans le but d'homogénéiser les résultats d'analyse produits à l'aide d'un SIG, il est capital qu'une démarche unique soit utilisée. En conséquence, une procédure d'intégration de connaissances permet aux usagers de moindre compétence, d'accomplir le travail avec une qualité comparable à ceux dont la compétence est plus pointue. Les éléments de la procédure peuvent facilement être intégrés dans le module de connaissances du SE.

Afin d'alléger le vocabulaire des prochains paragraphes, nous conservons le terme système expert (SE), pour désigner tous les systèmes ou combinaisons de systèmes qui intègrent des éléments de connaissance, la tendance actuelle dans le monde de l'intelligence artificielle étant de joindre des modules de connaissances à des logiciels déjà existants. Par conséquent, il deviendrait complexe d'identifier un nouveau terme à chaque fois qu'un logiciel est accompagné par un module de connaissances.

## **5.5. Composantes et architecture classique**

L'organisation et la structure d'un SE conventionnel est présentée à la figure 5.3. Les trois modules principaux qui composent cette structure sont décrits ci-dessous.

### **5.5.1. La base de connaissances**

La base de connaissances est le module qui contient toutes les informations nécessaires à l'analyse d'un problème particulier. Elle contient l'ensemble des faits, des règles et des procédures à utiliser ou à appliquer pour atteindre la solution à un

problème précis. Les faits correspondent à des éléments quantitatifs et prennent la forme suivante :

*L'eau gèle à 0°C.*

Les règles sont, quant à elles, le résultat d'une combinaison de faits qui décrivent un contexte particulier ou encore un raisonnement méthodologique quelconque. Elles ont la forme suivante :

***SI l'eau contient une concentration d'arsenic de 500 ppm,  
ALORS l'eau est contaminée.***

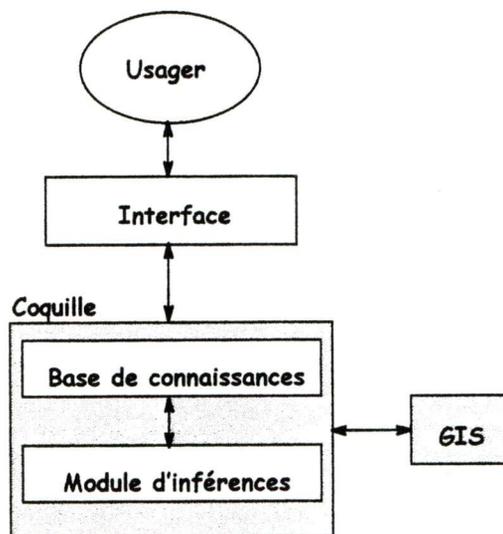


Figure 5.3. Structure classique des SE

Les connaissances proviennent de deux sources possibles :

- connaissances tacites qui sont exclusivement basées sur la recherche;
- connaissances heuristiques qui correspondent à des informations non exactes et approximatives, établies après de nombreuses années d'expériences.

Ces connaissances peuvent être représentées de trois façons possibles :

- par un réseau sémantique où les faits sont représentés selon une association organisée entre les données, les événements et le concept de base ; dans cette structure, l'information est présentée selon les opérateurs suivants : EST UN ou FAIT PARTIE DE, comme dans l'exemple suivant :

*Le till **EST UN** dépôt meuble **ET** un dépôt meuble **EST** sensible aux mouvements de terrain ; on peut conclure que le till **EST** sensible aux mouvements de terrain ;*

- sur des fiches d'information (*frames*) qui correspondent à une collection taxinomique de connaissances qui caractérisent un objet ou une situation (Minsky, 1975) ; un exemple de cette représentation est une fiche météorologique sur laquelle on retrouve les conditions rencontrées durant la journée (température, direction du vent, pression barométrique);
- par des règles de production intégrées au cœur de la programmation du système (Harmon and King, 1985) ; cette représentation des connaissances est la plus populaire ; les données à traiter sont emmagasinées dans la mémoire vive du système et les règles d'avancement de la procédure, supervisées par le module d'inférence, sont appliquées en temps opportun, les connaissances intégrées correspondent aussi bien à la procédure nécessaire pour contrôler les opérations du système que pour concrétiser le modèle.

### 5.5.2. Le module d'inférence

Le module d'inférence gouverne tous les aspects opérationnels du système. Il intervient dans la logique du fonctionnement et traduit certaines demandes de l'utilisateur en opérations concrètes. Le module d'inférence contrôle entièrement l'ordre dans lequel les étapes s'enchaînent et le déroulement logique de la procédure. Selon le cas, il instruit l'utilisateur sur les étapes à accomplir et vérifie la qualité des informations intégrées au système. Finalement, il est responsable de l'exécution du raisonnement par l'utilisation d'information incluse dans la base de connaissances.

### 5.5.3. L'interface

L'interface est une limite commune entre deux systèmes pour permettre des échanges interactifs et bilatéraux. Dans un SE, l'un des systèmes est l'utilisateur. La structure finale de ce module est variable et est organisée selon le degré d'automatisation que le concepteur veut bien fournir à l'utilisateur, donc de la nature et de la fréquence des échanges que l'on veut établir entre les deux systèmes impliqués.

Dans certains SE, les principales interactions proviennent d'échanges dynamiques, qui se traduisent par une série de questions auxquelles l'utilisateur doit répondre (ex. PROSPECTOR de Duda *et al.*, 1977). D'autres concepteurs favorisent une interface plus complète et utilisée pour guider et instruire l'utilisateur tout au long de la procédure. L'allure de ces systèmes s'apparente à la catégorie des systèmes d'aide à la décision (Huang and Jensen, 1997; Fedra and Reitsma, 1990)

Une des caractéristiques communes aux SE est de connaître précisément les motivations du cheminement fait vers la solution identifiée. L'interface est donc aussi utilisée pour communiquer cette information.

## **5.6. Exemples de SE opérationnels**

Sur le tableau 5.2, nous présentons les plus illustres exemples de SE opérationnels utilisés dans les sciences de la Terre, en foresterie, en télédétection, dans les SIG ou dans d'autres sphères d'activités reliées de près ou de loin à la gestion des ressources naturelles. Il faut remarquer une tendance intéressante dans le développement de ces systèmes où l'intégration des données satellitaires y prend une place de plus en plus importante. Autrefois, les SE développés pour la télédétection étaient davantage orientés sur la reconnaissance automatisée de formes ou d'éléments concrets identifiables sur les images, ceci dans le but ultime de remplacer les techniques traditionnelles d'interprétation visuelle (Stadelmann and Lodwick, 1989; Schowengerdt and Wang, 1989). Présentement, la tendance est plutôt orientée vers l'intégration des données spectrales aux données spatiales afin d'offrir un niveau supplémentaire d'information (McKeown, 1987).

## **5.7. Concept de base et développement de EXPERIM**

EXPERIM est un SE global à base de connaissances relié à un système de traitements composé d'un logiciel de TI et d'un logiciel SIG. Son utilisation réduit les prérequis scientifiques et techniques pour acquérir et organiser les données de base et pour appliquer le modèle de sensibilité développé préalablement. Son utilisation permet aussi de réduire de façon significative les coûts reliés à la mise sur place d'une politique de prévention tout en offrant des résultats d'une qualité comparable à ceux qu'un expert interprète peut générer à partir de l'interprétation des photographies aériennes.

EXPERIM est structurée de façon à ce que les données de base, qui correspondent à la carte topographique numérisée (MNA), aux images satellitaires disponibles et, facultativement, aux données thématiques déjà existantes, puissent être transformées en NSMT avec un minimum d'intervention et de connaissances de la

Tableau 5.2. Exemples de SE opérationnels

<b>Nom</b>	<b>Auteurs</b>	<b>Description</b>
PROSPECTOR	Duda <i>et al.</i> (1977)	Un des premiers SE appliqué à la géologie. L'utilisateur est interrogé par le système pour établir l'environnement géologique du secteur étudié. PROSPECTOR fournit ensuite une estimation des probabilités d'y retrouver un gisement.
<i>Sans nom</i>	Skidmore (1989)	Permet de classifier les différents types de forêts d'eucalyptus à partir d'une image TM, en combinant les connaissances spatiales aux connaissances spectrales qui caractérisent chacun des types.
LOBSTER	Egenhofer and Frank (1990)	Constitue une interface intelligence entre l'utilisateur et le SIG et permet de formuler des requêtes complexes dans des termes qui se rapprochent de notre langage courant.
VEG	Kimes <i>et al.</i> (1991)	VEG accepte les données spectrales d'une cible inconnue et établit une correspondance avec une banque de courbes spectrales de végétaux, dans le but de classifier correctement les images.
XPENT	Faure <i>et al.</i> (1995)	Établit le type de glissement potentiel en se basant sur des paramètres géotechniques.
KB Crop classification	Janssen and Middelkoop (1992)	Les connaissances reliées aux différents types de cultures sont utilisées dans les étapes de classification d'images satellitaires pour améliorer les résultats de la classification.
<i>Sans nom</i>	Huang and Jenssen (1997)	Classification des zones humides à partir des images HRV/XS et une base de connaissances spatiales et spectrales.

part de l'utilisateur assigné à cette tâche. Les avantages de l'utilisation de EXPERIM sont les suivants :

- encourager les décideurs à produire ces documents;
- assurer une uniformité des résultats, même si les résultats sont produits par une équipe composée de plusieurs usagers de compétences différentes;

- réduire les coûts reliés à la mise sur pied d'un programme semblable, en ne requérant aucune campagne de terrain et aucune formation pointue du personnel en place;
- accélérer le temps habituellement requis pour générer ces documents.

Compte tenu de sa structure, EXPERIM est considéré comme un système à base de connaissances regroupant une suite de règles et de faits spécifiquement identifiés pour cartographier les NSMT dans le contexte géomorphologique à l'étude.

L'utilisation de EXPERIM se fait en quatre séquences de tâches spécifiques :

- 1) interrogation de l'utilisateur sur la disponibilité et l'identité des données de base;
- 2) transformation automatisée des informations existantes en couches d'évidences indépendantes;
- 3) combinaison des évidences selon le modèle de sensibilité;
- 4) représentation cartographique des résultats.

Pour appliquer le modèle de sensibilité développé, il est nécessaire d'utiliser un logiciel de SIG pour effectuer les fonctions d'analyse spatiales et un logiciel de TI pour extraire les informations requises des données satellitaires. Ces logiciels sont déjà disponibles sur le marché (ex. PCI, ARC INFO, PAMAP, ENVI, IDRISI) et ils offrent la gamme complète des fonctions et des algorithmes nécessaires pour atteindre les objectifs fixés. En conséquence, il est inutile de reproduire ces fonctions à l'intérieur de EXPERIM. Pour y arriver, nous avons donc mis au point une stratégie qui saura faire en sorte de les utiliser à partir de l'interface de EXPERIM et éviter ainsi à l'utilisateur d'être en contact direct avec ces systèmes de traitement.

Effectivement, ces systèmes de traitement sont structurés de telle manière que chacune des fonctions correspondent à une « mini application » indépendante de type .EXE et activée à partir de la coquille principale qui structure le logiciel. Lorsque

cette coquille est sollicitée, au début de la procédure, ces fonctions sont déclenchées immédiatement et une fenêtre d'entrée des paramètres requis est présentée. Cette approche est habituellement plus conviviale et correspond au mode d'utilisation le plus standard. Il est cependant possible de déclencher ces mêmes fonctions à partir d'un langage codé propre au système. On utilise le terme « macro-commande » ou encore *script* pour désigner ces lignes de programmation. Chaque *script* est conçu selon une syntaxe très précise, propre au système, et doit intégrer l'ensemble des paramètres requis de façon à ce que la fonction désirée puisse être activée correctement et produire les résultats intermédiaires ou finaux souhaités. Chacun des termes qui compose les *scripts* correspond à un élément nécessaire pour que la fonction puisse être appliquée correctement. À titre d'exemple, le *script* suivant : « Makesig X v SITES 3 TM1 TM2 TM3 names.id\$ » possède une syntaxe reconnue par IDRISI. Il permet de calculer les signatures spectrales des zones d'entraînement délimitées sur le fichier vectoriel à partir de 3 bandes spectrales de TM.

Il est aussi possible de créer des séquences de *scripts* qui contiennent une longue liste de tâches, selon une structure bien précise. De plus, puisque ces séquences de *scripts* peuvent être activées à partir d'un autre logiciel, nous avons donc développé la stratégie de EXPERIM en tenant compte de cet aspect particulier. Ces séquences seront ainsi lancées à partir de l'interface de EXPERIM, ce qui permettra d'accéder à la puissance algorithmique des logiciels de traitement existants sans pour autant exiger de l'utilisateur d'en connaître les détails de fonctionnement qui, malheureusement, est souvent trop complexes.

Afin d'éviter que la présentation de EXPERIM s'apparente à un simple guide d'utilisation, nous épargnons aux lecteurs toutes les lignes de programmation ainsi que les multiples fenêtres de l'interface offerts à l'utilisateur. Nous présentons plutôt une description du concept et des principes généraux.

## 5.8. Outils de développement retenus

EXPERIM a été développé à partir du logiciel auteur FILEMAKER PRO 4.0 (FMP) de la compagnie Claris Inc. Ce logiciel permet de construire des applications complètement autonomes par l'utilisation de la programmation par objets, qui constitue un niveau évolué de programmation. Les avantages principaux de FMP sont :

- la souplesse reliée à la création d'une interface graphique attrayante, interactive et conviviale;
- la création automatisée de *scripts*;
- la possibilité d'être en liaison avec d'autres logiciels à l'insu de l'utilisateur.

Ce prototype fonctionne sur WINDOWS 95/98 et requiert l'équipement informatique de base pour faire fonctionner ce système d'exploitation.

Pour les fins du développement de EXPERIM, le logiciel IDRISI est utilisé comme logiciel de traitement pour, à la fois, réaliser les fonctions de TI et les opérations d'analyse spatiale communes aux SIG. L'utilisation de IDRISI est un choix parmi d'autres et ne constitue pas un prérequis conceptuel de EXPERIM. Cependant, puisque nous voulons fournir un système complet à nos partenaires boliviens, nous avons retenu IDRISI pour l'avantage qu'il procure en intégrant les fonctionnalités des deux systèmes de traitements (TI et SIG) et aussi pour le coût d'acquisition peu élevé comparativement aux autres systèmes de traitements semblables. À cet effet, il est à noter que, parmi les causes dissuasives d'accéder à une politique préventive moderne, s'y trouvent sans doute les coûts d'acquisition de ces outils !

## 5.9. Architecture de EXPERIM

L'architecture générale de EXPERIM est présentée à la figure 5.4. Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons les différentes particularités de chacune des composantes.

### 5.9.1. Base de connaissances

La base de connaissances est le module le plus important de EXPERIM et celui qui représente le plus grand défi conceptuel et organisationnel de tout SE, particulièrement de ceux orientés à solutionner des problèmes décisionnels complexes reliés aux sciences de la Terre (Currie and Ady, 1989). Les connaissances qui y sont intégrées permettent de minimiser les interventions de l'utilisateur pour obtenir une carte valable des NSMT. Plus la quantité de connaissances intégrées est élevée, moins les connaissances et l'expérience de l'utilisateur sont sollicitées durant l'exécution de la procédure. Dans cet esprit, nous avons regroupé les connaissances en quatre entités distinctes :

- les connaissances reliées aux concepts scientifiques et identifiées aux chapitres 3 et 4 ; nous appelons ce module « CONSCIENCE » (conception scientifique) ; il est composé de deux sous-modules : PIXEL et FORME ;
- les connaissances reliées à l'automatisation des échanges entre l'utilisateur et le système de traitement utilisé ; nous appelons ce module « AUTOMAT » (automatisation de tâches) et il se compose de l'ensemble des règles de production requises pour communiquer avec les systèmes de traitements ;
- les connaissances reliées à l'assemblage des évidences selon les lois du modèle de sensibilité ; nous appelons ce module « ASSEMBLEUR » ;

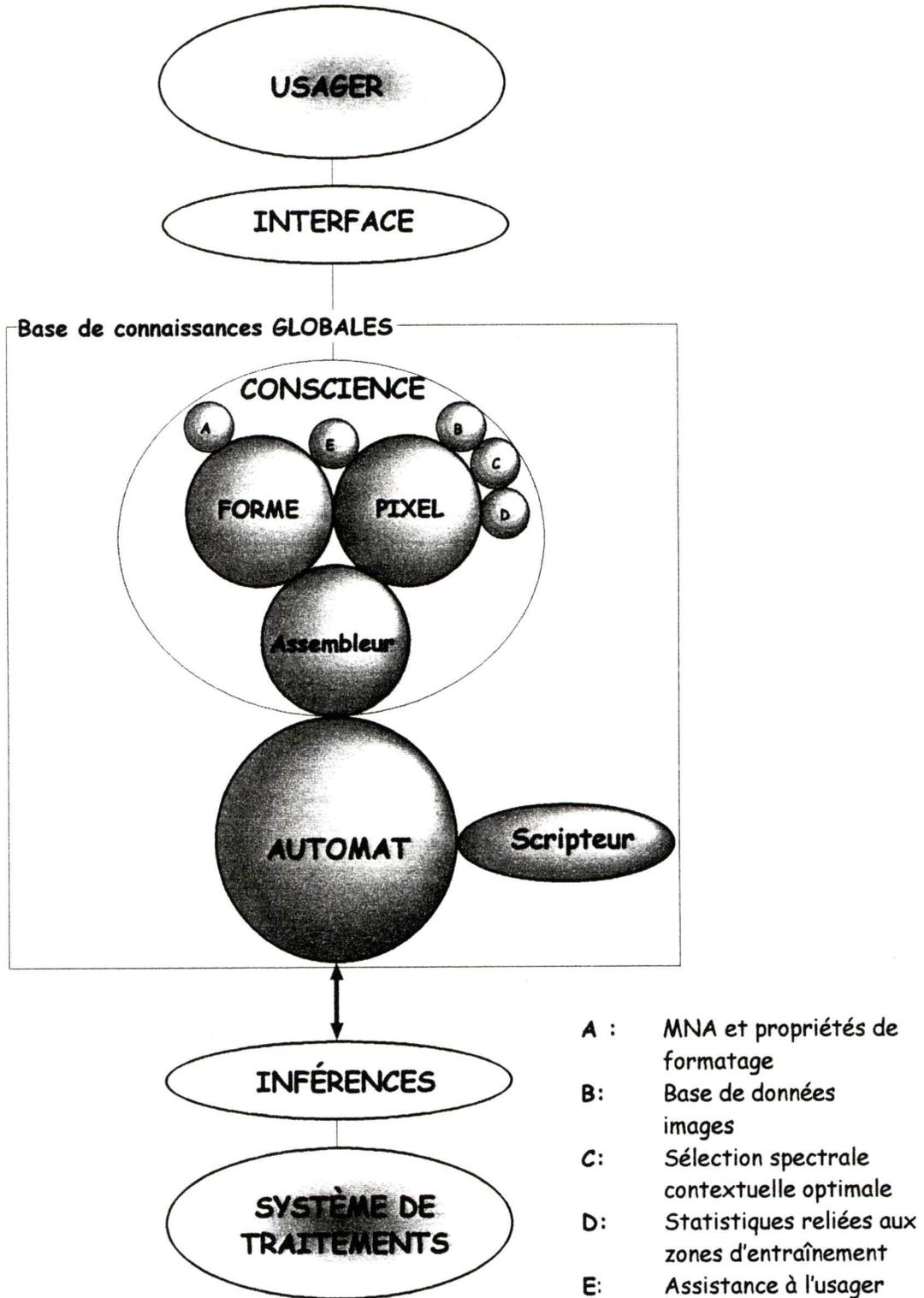


Figure 5.4. Structure organisationnelle de EXPERIM

Ces trois modules d'information constituent le squelette de la base de connaissances de EXPERIM et sont décrits ci-dessous.

#### **A- Le module « CONSCIENCE »**

Le module « CONSCIENCE » est composé d'une série de faits correspondant à l'identité des évidences requises ainsi qu'à la procédure analytique retenue pour appliquer le modèle de sensibilité. Puisque les données de bases utilisées proviennent de deux sources principales différentes soit : 1) le MNA et 2) les images satellitaires, nous avons structuré les connaissances en deux sous-modules différents.

Le premier sous-module se nomme « FORME ». Il intègre la démarche et les procédures nécessaires pour extraire les évidences topographiques requises. Les faits retenus correspondent principalement à la liste des fonctions utilisées, ainsi qu'aux paramètres particuliers retenus pour l'exécution de ces tâches. On y retrouve, à titre d'exemple, les informations reliées au nombre de classes utilisées pour chacune des évidences et l'ensemble de la procédure retenue pour transformer ces évidences en format binaire. Annexé à ce sous-module, s'y trouve le MNA lui-même et l'ensemble des propriétés de formatage.

Le sous-module « PIXEL » est plus complexe et aussi plus riche en information. Il renferme la stratégie d'identification des évidences obtenues à partir des données satellitaires. Les faits et les règles qui y sont inclus concernent l'identité de la « sélection spectrale contextuelle optimale (SSCO) » pour chacune des unités de terrain recherchées, c'est-à-dire la combinaison de bandes intra ou interimages (selon la disponibilité) la plus efficace pour déterminer la présence/absence d'une évidence. On y retrouve aussi, comme dans le sous-module « FORME », une description explicite de la procédure d'extraction, qui permet de transformer les

informations spectrales brutes en un document cartographique montrant la répartition d'une évidence. Satellitaire de ce module, s'y trouve trois regroupements secondaires qui intègrent la base de données images, les connaissances reliées au formatage, les statistiques reliées aux sites d'entraînement et les spécificités de la sélection spectrale.

### **B- Module de connaissances « AUTOMAT »**

Le module de connaissances « AUTOMAT » contient les informations pertinentes permettant à EXPERIM d'exécuter automatiquement, sans l'aide de l'utilisateur, les multiples tâches réalisées à l'aide du système de traitements. Ceci est rendu possible par la création de *scripts* dirigés vers le système de traitement retenu, en l'occurrence IDRISI.

À la base de ce module de connaissances, s'y trouve les éléments nécessaires pour composer les *scripts*, c'est-à-dire le vocabulaire (langage de code) et les prérequis syntaxiques (amalgame organisé des codes). La composition des *scripts* se fait à l'aide de l'éditeur de *script* nommée « SCRIPTEUR ». Cet éditeur compose les *scripts* requis pour chacune des fonctions retenues dans la liste du module « CONSCIENCE », selon les préférences paramétriques indiquées et selon l'ordre imposé par le modèle de régionalisation. Le résultat final correspond à une longue liste de codes, composée d'une série de fonctions exécutées par le système de traitement.

### **C- Module de connaissances « ASSEMBLEUR »**

Le module de connaissances « ASSEMBLEUR » a pour fonction de rassembler les informations obtenues durant les étapes précédentes et de créer le résultat cartographique final selon le modèle de sensibilité développé. La première étape correspond à l'assemblage des évidences en multipliant chaque évidence par son

coefficient respectif, puis de les additionner spatialement pour en produire un résultat cartographique intermédiaire de la distribution des valeurs discriminantes pour le bassin versant à l'étude. La seconde étape est le regroupement des valeurs discriminantes en classe de NSMT. Tel que discuté préalablement, quelques techniques différentes peuvent être retenues. Pour les fins de ce prototype, nous avons favorisé la classification automatisée non-dirigée, pour la qualité des résultats qu'elle procure, ainsi que pour la facilité d'automatisation qu'elle offre. Les connaissances intégrées à ce module correspondent à une série de règles, traduites en *scripts*, permettant de croiser les évidences entre elles.

De plus, puisque le résultat final est atteint à cette étape, nous y avons ajouté l'ensemble des règles requises pour imprimer le document final, selon les caractéristiques souhaitées par l'utilisateur.

### **5.9.2. Module d'inférence**

Le module d'inférence ou le module de raisonnement, contrôle toutes les fonctionnalités, allant de la saisie des données de base jusqu'à l'impression finale des cartes de NSMT. Bien qu'invisible à l'utilisateur, son importance est capitale. Il dirige les procédures au fur et à mesure que les résultats des règles appliquées sont connus (Argialas and Harlow, 1990). La première fonction du module d'inférence est l'initialisation des modules et la vérification de l'intégrité du système. La deuxième étape est le contact avec l'utilisateur et le déclenchement de la phase d'acquisition des informations de base. Les tâches subséquentes correspondent aux liens requis avec la base de connaissances pour l'application des règles et des liens avec le système de traitement pour l'exécution des *scripts* et la récupération des résultats produits.

Le mécanisme de raisonnement retenu par EXPERIM est de type descendant ou *forward chaining*, ce qui correspond à une démarche logique qui vise à atteindre les résultats finaux en progressant de gauche à droite, c'est-à-dire à partir des données

vers les résultats, ceci par opposition à la stratégie ascendante ou *backward chaining*, utilisée lorsque l'on désire défendre qu'une hypothèse (résultat) existe en vérifiant si les données vont dans le même sens que cette hypothèse (Mering, 1988). Concrètement, cela signifie que les NSMT sont établis individuellement pour chacun des pixels, une fois que l'ensemble des caractéristiques rattachées à ce pixel ont été évaluées.

### **5.9.3. Interface de EXPERIM**

L'interface de EXPERIM est dynamique et conçue de telle manière que les échanges système/usager puissent s'apparenter aux échanges qui existent entre deux individus (Mutch *et al.*, 1993). Pour y arriver, nous avons conçu 26 écrans différents à partir desquels l'utilisateur reçoit l'information du module d'inférence. Ces informations concernent d'abord les démarches à suivre pour introduire les données de base et ensuite les éléments d'information quant à l'avancement de la procédure en cours. Une fois la démarche complétée, l'utilisateur est informé de la qualité des résultats obtenus et il est interrogé sur ses préférences concernant la présentation cartographique finale des résultats. En tout temps le module assistant est disponible pour instruire l'utilisateur, ou bien sur les étapes en cours d'opération ou bien sur des principes généraux liés à l'étude des mouvements de terrain en général.

### **5.10. Synthèse**

EXPERIM est un SE à base de connaissances pouvant être considéré comme une interface intelligente permettant de cartographier les NSMT dans chacun des bassins versants entourant la ville de Cochabamba. Sa force tient dans la possibilité d'accomplir des tâches décisionnelles complexes qui nécessitent l'utilisation des TI et des SIG sans que l'utilisateur soit à la fois expert de ces systèmes de traitements et expert des phénomènes responsables des risques naturels liés aux mouvements de terrain. Le bénéfice ultime de EXPERIM tient dans la possibilité de régionaliser

l'étude cartographique des NSMT à partir d'un modèle de sensibilité développé à partir des compétences d'un expert et à partir de l'utilisation d'images satellitaires.

Afin d'éviter la reproduction des algorithmes d'analyse spatiale et de traitements d'images dans le cœur de la programmation de EXPERIM, nous avons structuré EXPERIM de manière à ce qu'il soit en liaison constante avec un logiciel existant sur le marché offrant ces fonctions, à l'insu de l'utilisateur.

Ce prototype est complètement opérationnel et sera utilisé par le groupe PROMIC pour les fins de régionalisation. Nous envisageons que son utilisation permettra des économies substantielles et fera en sorte d'accélérer les travaux déjà en cours au sein des activités de ce groupe de travail.

## 6

# CONCLUSIONS GÉNÉRALES ET RECOMMANDATIONS

### 6.1. Conclusions

L'objectif principal et les objectifs spécifiques de ce projet de recherche ont été atteints avec succès. Selon les résultats obtenus, nous sommes maintenant assuré que le système expert EXPERIM permet de cartographier les NSMT dans les 38 bassins versants qui entourent la ville de Cochabamba avec une qualité comparable à ce qu'un expert interprète peut fournir à partir de l'interprétation de photographies aériennes. Ce système peut être utilisé par PROMIC ou encore par des usagers peu expérimentés dans l'accomplissement des tâches complexes qu'impliquent l'analyse des phénomènes liés aux conditions de stabilité des versants, et ce par l'utilisation des données de télédétection et des SIG.

Globalement, les bénéfices reliés à la mise au point de EXPERIM sont nombreux et inciteront les pays à risque à accéder plus facilement à une politique préventive visant à mieux protéger les populations locales.

Parmi les éléments clés responsables du succès de la mise sur pied de ce système, s'y trouve la stratégie élaborée pour acquérir et concrétiser les connaissances implicites ayant permis à l'expert de cartographier les NSMT dans la zone témoin *Taquiña*.

Pour y arriver, nous avons extrait 41 évidences issues de variables ayant potentiellement influencé le jugement de l'expert, à partir de la carte des NSMT mise au point par ce dernier. Par l'application des statistiques multivariées aux évidences retenues et à la carte de réalité terrain, nous avons pu construire un modèle de sensibilité permettant de recréer la carte de l'expert avec un taux de succès de 78 %. Nous avons donc réussi à reproduire son travail presque en totalité, sachant que la carte qu'il a conçue contient elle-même une part d'incertitude. La qualité des résultats que procure le modèle de sensibilité implique, cependant, que la répartition de certaines conditions géoécologiques soit connue : 1) arénites, 2) zones agricoles, 3) champs de blocs, 4) colluvions rocheuses et 5) till. Dans le cas où ces informations seraient inexistantes, pour un bassin versant où l'étude doit être réalisée, nous avons calculé trois autres modèles de sensibilité supplémentaires établis à partir de scénarios qui intègrent les informations potentiellement disponibles pour la zone. Cette analyse a permis d'évaluer les relations de quatre sources d'informations (carte topographique, carte géologique, carte géomorphologique et carte de végétation) en regard aux conditions de stabilité. Par cette analyse, nous avons aussi pu évaluer l'incertitude liée à la carte des NSMT produite à partir d'informations partielles. Les résultats démontrent que les conditions topographiques permettent de distinguer les NSMT extrêmes (faibles et forts) avec un taux de succès de près de 80 %. Par contre, un taux de succès de seulement 59 % est obtenu lorsque trois classes de NSMT sont requises. Néanmoins, lorsque les évidences reliées aux conditions géologiques et géomorphologiques sont intégrées à la base de connaissances, le taux de succès augmente de près de 30 %. L'intégration des évidences reliées aux conditions de végétation relève de très peu la qualité de la

cartographie, témoignant ainsi de l'indépendance de ces informations face aux conditions de stabilité des versants.

Nous avons ensuite démontré qu'il est aussi possible de régionaliser le modèle de sensibilité aux bassins versants qui entourent la zone témoin, par l'utilisation des données satellitaires en remplacement des campagnes de terrain ou encore de l'interprétation des photographies aériennes. Durant l'élaboration de cette étape, nous avons évalué le taux de classification que procure l'utilisation de trois types de capteurs différents (TM, HRV/XS et RADARSAT), ainsi que de la fusion de ces données entre elles, pour établir la présence/absence des cinq évidences géoécologiques essentielles à l'application du modèle de sensibilité développé.

Afin d'augmenter le taux de classification recherché, nous avons intégré l'ensemble des données satellitaires à la base de connaissances spatiales, de façon à pouvoir profiter de la méthode de pré-classification hiérarchique. De plus, pour chacune des évidences recherchées, nous avons établi la combinaison spectrale intra-image et interimage la plus performante.

Les résultats obtenus révèlent des performances similaires pour les trois capteurs, avec un léger avantage pour le capteur TM. L'évidence « till » obtient le taux de classification le plus faible avec une valeur de seulement 52 %. Cependant, les champs de blocs et les colluvions rocheuses peuvent être cartographiés avec un taux de classification supérieure à 90 %, grâce à leur fort contraste dans l'environnement où ils se retrouvent. Les efforts déployés pour fusionner les données satellitaires entre elles n'ont pas été justifiés par une augmentation significative du taux de classification.

Afin d'évaluer l'impact de l'utilisation de la télédétection sur la qualité que le modèle de sensibilité procure, nous avons intégré les résultats cartographiques de la répartition de chaque évidence à partir de la télédétection, à la base de

connaissances globales. Les résultats démontrent qu'il est possible d'établir la cartographie des NSMT dans les bassins versants voisins, où seules les données topographiques sont disponibles, avec une incertitude augmentée de seulement 10 % en comparaison à ce que l'on obtiendrait si les évidences géoécologiques étaient établies à partir de méthodes conventionnelles.

Fort des connaissances acquises concernant les conditions qui contrôlent les classes de NSMT, nous avons élaboré EXPERIM afin que ces connaissances puissent être fixées et être utilisées opérationnellement. Pour y arriver nous avons conçu un système à base de connaissances en liaison avec un logiciel de traitement disponible sur le marché et procurant l'ensemble des fonctions de traitement d'image et les fonctions d'analyse spatiale appropriées pour nos besoins spécifiques; ceci dans le but d'éviter de reproduire des algorithmes déjà existants. EXPERIM constitue ainsi une interface conviviale et intelligente aux logiciels de traitements disponibles, souvent caractérisés par une complexité élevée d'utilisation. Avec EXPERIM, l'utilisateur est donc constamment dirigé dans les étapes de la procédure développée. Lorsque des traitements sont requis au cours de la démarche, un module de la base de connaissances est activé pour concevoir automatiquement la séquence de *scripts* nécessaire et pour ensuite la diriger vers le logiciel de traitement; ceci de façon transparente pour l'utilisateur.

## 6.2. Recommandations

Les techniques d'extraction de connaissances utilisées ont permis d'établir trois classes de NSMT générales qui n'offrent cependant aucun détail sur le type de mouvement de terrain pouvant être impliqué. Cet élément d'information supplémentaire pourrait s'avérer, dans certains cas, très utile. En conséquence, nous croyons qu'il serait avantageux que l'extraction des connaissances puissent se faire en considérant les conditions de terrain particulières à chacun des types de mouvements potentiels et ainsi évaluer le niveau de susceptibilité associé à chacun.

Nous avons aussi souligné l'intérêt que représente les images RADARSAT en permettant de conserver des sites d'entraînement fixes, sachant que ce capteur constitue une source d'information opérationnelle et permet l'acquisition de données à des dates précises, sans que les conditions climatiques n'interviennent. Cependant, puisque les résultats de classification obtenus à partir de ce capteur ne sont pas aussi élevés que l'on espérait, nous croyons qu'il serait profitable d'évaluer d'autres types d'images RADARSAT, acquises avec différents paramètres de prise de vue et aussi de considérer d'autres méthodes de classification, telle l'analyse de texture, afin d'augmenter la qualité des résultats. À ce jour, il faut reconnaître que le potentiel de l'imagerie radar reste encore à découvrir pour les applications géoscientifiques reliées à la caractérisation des formations meubles.

Enfin, le système EXPERIM constitue un pas en avant pour permettre la gestion des ressources naturelles fondées sur l'utilisation automatisée des connaissances. Il est souhaitable que l'intégration des techniques rattachées à l'intelligence artificielle puisse prendre de plus en plus d'ampleur au sein des organismes gouvernementaux. Pour en faire grandir la popularité, il serait avantageux que la communauté scientifique adopte le réflexe de concrétiser les connaissances durement acquises, de sorte que le fruit de leurs recherches puisse être mis rapidement au profit des usagers moins avertis scientifiquement.

## Références

Agterberg, F.P. (1989) Estimating the probability of occurrence of mineral deposits from multiple map patterns. In *The use of Microcomputers in Geology*, Merriam, D.F. and Kurzl, H. (Editors), Plenum Press, New York, p. 73-92.

An, P., Moon, W.M. and Bonham-Carter, G.F. (1992) On knowledge-based approach of intergrating remote sensing, geophysical and geological information. *Proceedings IGARSS'92*, Houston, Texas, March 23 - 27, p. 34-38.

Antoine, P. et Giraud, A. (1995) Typologie des mouvements de versants dans un contexte opérationnel. *Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, no 51, p. 57-62.

Argialas, D.P. (1990) Knowledge-based image interpretation: techniques and applications. *ACSM-ASPRS Annual Convention*, Denver, CO, March 18-23, Technical Paper, vol. 4, p. 33-43.

Argialas, D.P. and Harlow, C.A. (1990) Computational image interpretation models: An overview and a perspective. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, no 6, p. 871-886.

Aronoff, S. (1989) *Geographical information systems: a management perspective*. WDL Publication, Ottawa, 234 p.

Aschbacher, J. and Lichtenegger, J. (1990) Complementary nature of SAR and optical data: a case study in the tropics. *Earth Observation Quarterly*, vol. 31, p. 4-8.

Asté, J. P. and Girault, F. (1992) GIS-SPOT DEM and morphology of large landslides. *Proceedings of the 6th International Symposium*, Christchurch, New Zealand, vol. 1, February 10-14 1991, p. 1539-1545.

Baeza, C. and J. Corominas (1996) Assessment of shallow landslide susceptibility by means of statistical techniques. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides*, Trondheim, Norway, June 17-21, vol. 1, p. 147-152.

Bannari, A. (1996) *La télédétection et les indices de végétation pour la détection de la végétation éparse et moyennement dense: cas de l'environnement urbain*. Thèse de doctorat, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 229 p.

Bégin, D., Boucher, Y., Brodeur, J., Girard, C., Lapierre, D., Lemieux, J.P. et Gautier, J.R.R. (1988) Précision géométrique des données SPOT. *Actes du symposium internationale sur les applications topographiques des données SPOT*, 13-14 Octobre, Sherbrooke, Québec, Canada, p. 169-180.

Bertolo, F., Folving, S., Megier, J., Paracchini, M.L. and Toccolini, A. (1993) Application of remotely sensed data and GIS for environmental management in an Alpine valley - a case study from Val Malenco, Italy. In Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Tokyo, Japan, p. 2065-2067.

Bocco, G. and Valenzuela, C. R. (1988) Integration of GIS and image processing in soil erosion studies using ILWIS. ITC Journal, vol. 4, p. 309-319.

Bolivar, S.L., Freeman, S.B. and Weaver, T.A. (1982) Evaluation of integrated data sets - four examples. Computers and Geosciences, vol. 19, no 1, p. 7-15.

Bonham-Carter, G.F. (1994) Geographic information systems for geoscientist: Modelling with GIS. Pergamon / Elsevier Science Publication, New York, 397 p.

Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P. and Wright, D. F. (1988) Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 54, no 11, p. 1585-1592.

Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection. Principes et Méthodes, vol. 1, Presses de l'Université du Québec, Québec, 479 p.

Brabb, E.E. (1984) Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. Proceedings of the 4th International Symposium Landslides, Toronto, vol. 1, p. 307-324.

Brabb, E.E., Pampeyan E.H. and Bonilla M.G. (1972) Landslide susceptibility in San Mateo County, California. US Geological Survey, Miscellaneous Field Studies Map, MF360, scale 1: 62 500.

Brass, A., Wadge, G. and Reading, A.J. (1989) Designing a geographical information system for the prediction of landsliding potential in the West Indies. Proceedings Economic Geology and Geotechnics of Active Tectonics Regions, University College, London, April 3-7, 13 p.

Briggs, R.P. (1974) Map of overdip slopes that can affect landsliding in Allegheny County, Pennsylvania. US Geological Survey, Misc. Field Studies Map, MF-543, 1:125 000.

Brown, J.F., Loveland, T.R., Merchant, J.W., Reed, B.C., and Ohlen, D.O. (1993) Using multisource data in global land cover characterization - concepts, requirements and methods. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no 6, p. 977-987.

Bruce, J.P. (1993) Natural disasters and global change. IDNR Newsletter no 15, Observatorio Vesuviano, p. 3.

- Bryant, N.A., Mcleod, R.G., Zobrist, A.L. and Johnson, H.B. (1979) California desert resource inventory using multispectral classification of digitally mosaicked Landsat frames. Proceedings of 1979 Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, p. 69-79.
- Burrough, P.A. (1992) Development of intelligent geographical information systems. International Geographical Information Systems, vol. 6, no 1, p. 1-11.
- Carlotto, M.J. (1986) Extracting surface features in multispectral imagery. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Zurich, Switzerland, p. 283-288.
- Carrara, A. (1983) Multivariate models for landslide hazard evaluation. Mathematical Geology, vol. 15, no 3, p. 403-427.
- Carrara, A. (1988) Landslide hazard mapping by statistical methods. A "black box" approach. Workshop on Natural Disasters in European Mediterranean Countries, Perugia, Italy, p. 205-224.
- Carrara, A., Cardinali, M. and Guzzetti, F. (1992) Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Journal, no 2, p. 172-183.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti R., Guzzetti F., Pasqui, V. and Reinchenbach P. (1991) GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard. Earth Surface Processes and Landforms, vol. 16, no 5, p. 427-445.
- Carrara, A., Pugliese Carratelli, E. and Merenda L. (1977) Computer-based data bank and statistical analysis of slope instability phenomena. Zeitschrift Für Geomorphologie N. F., vol. 21, no 2, p. 187-222.
- Chavez Jr, P. S., Sides, S. C., Anderson, J. A.. (1991) Comparaison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 57, no 3, p. 295-303.
- Chorowicz, J., Kim, J., Manoussis, S., Rudant, J.-P., Foin, P. and Veillet, I. (1989) A new technique for recognition of geological and geomorphological patterns in digital terrain models. Remote Sensing of the Environment, vol. 29, p. 229-239.
- Cibula, W.G. and Nyquist, M.O. (1987) Use of topographical and climatological models in a geographical data base to improve Landsat MSS classification of Olympic National Park. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 53, no 1, p. 67-75.
- Clapperton, C.M. (1983) The glaciation of the Andes. Quaternary Science Review, vol. 2, p. 83-155.

- Claire, B. L. (1993a) Informe geomorfologico de la Cuenca Taquiña. PROMIC, Cochabamba, Document interne, 17 p.
- Claire, B. L. (1993b) Informe geologico regionale de la Cuenca Taquiña. PROMIC, Cochabamba, Document interne, 13 p.
- Claire, B., Maldonado, J., Vargas, O. and Valenzuela, C. R. (1994) A conceptual approach to evaluate watershed hazards: the Tunari watershed, Cochabamba, Bolivia. ITC Journal, no 3, p. 283-291.
- Close, U. and McCormick, E. (1922) Where the mountain walked. National Geographic, no 41, p. 445-464.
- Clouâtre, É. (1994) Délimitation des zones à risques de glissement de terrain par intégration de données multisources dans un SIG: région de Hull-Gatineau Mémoire de maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 75 p.
- Cotecchia, V. (1978) Systematic reconnaissance mapping and registration of slope movements. Bulletin International Association of Engineering Geologists, no 17, p.5-37.
- Craig, R.F. (1987) Soil mechanics. Van Nostrand Reinhold (UK), London, 410 p.
- Crozier M.J. (1986) Landslides: causes, consequences and environment. Croom Helm, London, England, 245 p.
- Cruden, D.M. and Varnes D.J. (1995) Landslide types and processes. In Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 247, Washington D.C., p. 76-90.
- Currie, A. and Ady B. (1989) GEOGIS project: knowledge representation and data structures for geoscience data. In Statistical applications in the earth sciences, ed. F.P. Agterberg and G.F. Bonham-Carter; Geological Survey of Canada, Paper 89-9, p. 111-116.
- Del Barrio Escribano, G. (1992) Topografica del paisaje en alta montaña: Pireneos centrales. Thèse de doctorat, Universidad Autonoma de Madrid, 234 p.
- Dikau, R., Cavallin, A. and Jäger S. (1996) Databases and GIS for landslide research in Europe. Geomorphology, vol. 15, p. 227-239.
- Dougherty, E.R. and Giardina, C.R. (1987) Matrix structured image processing. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 200 p.
- Doyle, F.J. (1981) Satellite systems for cartography. ITC Journal, vol. 2, no 1, p. 153-171.
- Drury, S.A. (1990) A guide to remote sensing. Oxford Science Publications, London, 199 p.

Duda, R.O, Hart, P.E., Nilsson, N.J., Reboh, R., Slocum, J. and Sutherland, G.L. (1977) Development of a computer-based consultant for mineral exploration. SRI International, Artificial Intelligence Center, Annual Report for SRI Projects 5821 and 6415, Menlo Park, California, 202 p.

Durkin, J. (1993) Expert systems: catalog of applications. University of Akron, Intelligent Computer Systems Inc., 399 p.

Egenhofer, M.J. and Frank, A.U. (1990) LOBSTER: Combining AI database techniques for GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, no 6, p. 919-926.

Ehlers, M., Edwards, G. and Bédard, Y. (1989) Integration of remote sensing with geographical information systems: a necessary evolution. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, no 11, p. 1619-1627.

Einstein, H.H. (1988) Special lecture: Landslide risk assessment procedure. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, Switzerland, 1988, vol. 2, p. 1075-1090.

Enzmann, R.D. (1966) Introduction to the section signatures. In *Planetology and Space Mission Planning*, Annual New York Academy of Sciences, vol. 140, Article 2, p. 154-156.

Estes, J.E. (1985) The need for improved information systems. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 11, no 4, p. 124-131.

Evans, I.S. (1980) An integrated system of terrain analysis and slope mapping. *Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., Suppl.-Bd.*, no 36, p. 274-295.

Evans, S.G. and Clague, J.J. (1994) Recent climatic change and catastrophic geomorphic processes in mountain environments *Geomorphology*, vol. 10, p. 107-128.

Eyles, G.O. (1983) The distribution and severity of present soil erosion in New Zealand. *New Zealand Geographer*, vol. 39, no 1, p. 12-28.

Faure, R. M., Mascarelli, D., Vaunat, J., Leroueil, S., Tavenas, F. (1995) Present state of development of XPENT, expert system for slope stability problems. Proceedings of the 6th International Symposium, Christchurch, New Zealand, February 10-14, Bell, D. H. (eds), Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 1671-1678.

Fedra, K. and Reitsma, R. F. (1990) Decision support and geographical information systems. In H. J. Scholten and J. C. H. Stillwell, eds., *Geographical Information System for Urban and regional Planning*, Kluwer, Boston, p. 177-188.

Ferrer Gijon, M. (1988) Metodología del mapa de movimientos del terreno de España a escala 1: 1 000 000. II Simposio sobre taludes y laderas inestables, Andorra le Vella, 9-11 de marzo, p. 627-642.

Ficher, R.A. (1936) The use of multiple measurements in taxonomic problems. *Annals of Eugenics*, no 7, 179-188.

Flageollet, J. C. (1989) *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Librairie Masson, Collection Géographie, Paris, 224 p.

Florinsky, I.V. (1998) Quantitative topographic method of fault morphology recognition. *Geomorphology*, vol. 16, p. 103-119.

Florinsky, I.V. and G.A. Kuryakova (1996) Influence of topography on some vegetation cover properties. *Catena*, vol. 27, p. 123-141.

Frank, A. (1988) Requirement for a database management system for a GIS. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 54, no 11, p. 1557-1564.

Franklin, S.E and Gillespie, R.T. (1989) Methods and applications of image analysis using integrated data sets. In *Statistical applications in the earth sciences*, ed. F.P. Agterberg and G.F. Bonham-Carter; Geological Survey of Canada, Paper 89-9, p. 69-78.

Franklin, S.E., and Wilson, B.A. (1992) A three-stage classification for remote sensing of mountain environments. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, no 40, p. 449-454.

Franklin, S.E., Lodwick, G.D. and Wheate, R.D. (1990) Research related to digital remote sensing of mountain area at the University of Calgary. 13th Canadian Symposium on Remote Sensing, June 13-17, p. 156-165.

Garbrecht, J. and Martz, L.W. (1993) Network and subwatershed parameters extracted from digital elevation models: the Bill Creek experience. *Water Resources Bulletin*, American Water Resources Association, vol. 29, no 6, p. 909-916

Gares, P., Douglas, J.S. and Nordstrom, K.F. (1994) Geomorphology and natural hazards. *Geomorphology*, vol. 10, p. 1-18.

Gerrard, J. (1990) *Mountain environments: An examination of the physical geography of mountains*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 317 p.

Gonzalez, A.J. (1992) Avalanche risk evaluation at Utica. *Proceedings 1er Simposio Internacional Sobre Sensores Remotos y Sistemas de Informacion Geografica (SIG) para el Estudio de Riesgos Naturales*, Bogota, Colombia, vol. 2, p. 356-378.

Greenbaum, D., McDonald, A.J.W. and Marsh, S. H. (1996) Rapid method of landslide hazard mapping. 11th Thematic Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing, Las Vegas, Nevada, February 27-29, p. I-287-I-295.

Guillande, R., Gelugne, P., Bardintzeff, J.-M., Brousse, R., Chorowicz, J., Deffontaines, B. and Parrott, J.-F. (1995) Automated mapping of the landslide hazard on the island of Tahiti based on digital satellite data. *Mapping Sciences and Remote Sensing*, vol. 32, p. 59-70.

Gupta, R.P. and Joshi, B.C. (1990) Landslide hazard zoning using GIS approach - A case study from Ramganga catchment, *Himalayas Engineering Geology*, vol. 28, p. 119-131.

Haboudane, D. (1998) Intégration des données spectrales et géomorphométriques pour l'identification des zones à risque de dégradation en milieu semi-aride. *Activité pédagogique TEL 913*, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, 15 p.

Hansen, A. (1984) Landslide hazard analysis. In *Slope Instability*, eds. D. Brunsen and D. B. Prior, John Wiley & Sons, New-York, p. 523-602.

Harmon, P. and King, D. (1985) Expert systems. *Artificial Intelligence in Business*, John Wiley and Sons, New York, 435 p.

Harris, J.R., Bowie, C., Rencz, A.N. and Graham, D.F. (1994) Computer enhancement techniques for the integration of remotely sensed geologic and thematic data for the geosciences. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 20, no 3, p. 210-221.

Hastings, D.A. and Di, L. (1994) Modelling of global change phenomena with GIS using the global change data base I: Modelling with GIS. *Remote Sensing of Environment*, vol. 49, p. 1-12.

Hewitt K. and Burton, I. (1971) The hazardousness of a place: A regional ecology of damaging events. *Department of Geography, Res. Paper no 6*, University Toronto Press, Toronto, 154 p.

Hinton, J.C. (1996) GIS and remote sensing integration for environmental applications. *International Journal of Geographical Information Systems*, vol. 10, no 7, p. 877-890.

Hively, W. (1988) Global change. *American Scientist*, vol. 76, no 2, p. 127-130.

Huang, S. L. and Chen, B. K. (1991) Integration of Landsat and terrain information for landslide study. *8 th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*, Denver, Colorado, USA, April, 29 - May, 2, p. 743-754.

Huang, X. and Jensen, J.R. (1997) A machine learning approach to automated knowledge-base building for remote sensing image analysis with GIS data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 63, no 10, p. 1185-1194.

Hutchinson, C.F. (1982) Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, no 48, p. 123-130.

- Ioannou, D. (1984) The economic value of exploration as a risk reduction strategy in underground construction. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 432 p.
- Janssen, L., Jaarma, M. and Van Der Linden, E. (1990) Integrating topographic data with remote sensing for land cover classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, p. 1503-1506.
- Janssen, L.L.F. and Middlekoop, H. (1992) Knowledge-based crop classification of Landsat Thematic Mapper image. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 13, no 15 p. 2827-2837.
- Jones, A.R., Settle, J.J., Wyatt, B.K. (1988) Use of digital terrain data in the interpretation of SPOT-1-HRV multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 9, no 4, p. 669-682
- Kasa, H., Kurodai, M., Kojima, H. and Obayashi, S. (1991) Study on landslide prediction model using satellite remote sensing data and geographical information. *Proceedings of the 6th International Symposium, Christchurch, New Zealand, February 10-14*, Bell, D. H. (eds), Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 983-988.
- Keaton, J.R. and DeGraff, J.V. (1995) Surface observation and geologic mapping. In *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 247, Washington D.C., p. 178-229.
- Kienholtz, H. (1978) Maps of Geomorphology and natural hazards of Grindelwald, Switzerland: Scale 1:10 000. *Arctic and Alpine Research*, vol. 10, no 2, p. 169-184.
- Kienholtz, H. (1992) Risk assessment in mountains. *Proceedings 1er Simposio Internacional Sobre Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica. (SIG) para el Estudio de Riesgos Naturales, Bogotá, Colombia*, vol. 2., 20 p.
- Kimes, D.S., Harrison, P.R., and Ratcliffe, P. (1991) A knowledge-based expert system for inferring vegetation characteristics. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 12, no 10, p. 1987-2020
- Klecka, W.R. (1975) Discriminant Analysis. In *Statistical Package for the Social Sciences*, Chapter 23, Ed. McGraw - Hill, New York, p. 434-467
- Knipp, K.- H. (1993) Speckle reduction applied to ERS-1 images. *International Mapping from Space, Proceedings ISPRS Working Group IV/2 Workshop and conference, September 27 - October 1, Hanover, Germany*, no 15, p. 177-190.
- Kowalick, W.S. and Glenn, W.E. (1987) Image processing of aeromagnetic data and integration with Landsat images for improved structural interpretation. *Geophysics*, vol. 52, no 7, p. 875-884.

Landry, J. (1979) Cartes ZERMOS. Zones exposées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol. Région de Lons-le-Saunier à Pauligny (Jura). Bureau de Recherche Géologique et Minière, 14 p., 1 carte au 1: 25 000.

Leckie, D.G. (1990) Synergism of SAR and visible/infrared data for forest type discrimination. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, p.1237-1246.

Leir, M.C., Singhroy, V.H. and Savigny, S.V. (1996) Landslide and lineament mapping with airborne SAR. 11th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Las Vegas, February 27-29, vol. 2, p. 405-414.

Leroi, E. (1996) Landslide hazard - risk maps at different scales: Objectives, tools and developments. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides*, Trondheim, Norway, June 17-21, vol. 1, p. 35-51.

Leroi, E., Rouzeau, O., Scanvic, J. Y., Chorowicz, J. and Vargas, G. (1992) Remote sensing landslide hazard mapping using GIS technology in Colombian Andes. *ISY International Conference*, Munich, Germany, March 30- April 4, p. 14.

Leroueil S., Locat, J., Vaunat, J., Picarelli, L., Lee, H. and Faure R. (1996) Geotechnical characterization of slope movements. *Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides*, Trondheim, Norway, June 17-21, vol. 1, p. 53-74.

Leung, Y. and Leung, K.S. (1993) An intelligent expert system shell for knowledge-based geographical information systems: 2. Some applications. *International Journal of Geographical System*, vol. 7, no 3, p. 201-213.

Leung, Y., Leung K.S. and Lau, C.K. (1997 b) A development shell for intelligent spatial decision support system: 1. Concepts and tools. *Geographical System*, vol. 4, p. 19-37.

Leung, Y., Leung, K.S., Zhao, Z. and Lau, C.K. (1997 a) A development shell for intelligent spatial decision support system: 2. An application in flood simulation and damage assessment. *Geographical System*, vol. 4, p. 39-57.

Lillesand, T.M. and Kiefer, R.W. (1987) *Remote sensing and image interpretation*. 2nd Edition, John Wiley and Sons Inc., New York, 721 p.

Lopez, H. J. and Zinck, J. A. (1991) GIS-assisted modelling of soil-induced mass movement hazards: A case study of the upper Coello river basin, Tolima, Colombia. *ITC Journal*, no 4, p. 202-220.

Luzi, L. and Pergalani, F. (1996) Applications of statistical and GIS techniques to slope instability zonation (1:50 000 Fabriano geological map sheet). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 15, p. 83-94.

Mantovani, F., Soeters, R. and Van Westen, C.J. (1996) Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, vol. 15, p. 231-225.

Maselli, F., Conese, C., De Filippis, T. and Romani, M. (1995) Integration of ancillary data into a maximum-likelihood classifier with nonparametric priors. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. 50, no 2, p. 2-11.

McKeown, D. (1987) The role of artificial intelligence in the integration of remotely sensed data with geographic information systems. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25, no 3, p. 330-349.

Mejia-Navarro, M., Wohl, E.E. and Oaks, S.D. (1994) Geological hazards, vulnerability, and risk assessment using GIS: model for Glenwood Springs, Colorado. *Geomorphology*, vol. 10, p. 331-354.

Mering C. (1988) Développement de systèmes experts pour la cartographie par télédétection. *Images satellites et milieux terrestre en régions arides et tropicales*, Bondy, France, 14-17 nov., p. 301-320.

Minsky, M. (1975) A framework for representing knowledge. In *The Psychology of Computer Vision*, P. Wilson (ed.), McGraw-Hill, New-York, 438 p.

Mulder, F. (1991) Assessment of landslide hazard. *Nederlandse Geografische Studies* 124. Ph. D. thesis, University of Utrecht, Departement of Geology, 150 p.

Murphy, W. and Vita-Finzi, C. (1991) Landslides and seismicity: An application of remote sensing. 11th Thematic Conference on Geological Remote Sensing, Denver, Colorado April 2-7, vol. 2, p. 771-784.

Mutch, J.P., Crowe, A.S. and Resler, O. (1993) EXPRES: An expert system for assessing the fate of pesticides in the subsurface: users' manual. National Water Research Institute, Canada, Scientific Series no 201, 138 p.

Neuland, H. (1976) A predictive model of landslip. *Catena*, vol. 3, p. 215-230.

Nielsen, T.H., Wright, R.H., Vlastic, T.C., and Spangle, W. (1979) Relative slope stability and land-use planning in the San Francisco Bay region. US Geological Survey, Professional Paper 944, 96 p.

Novak, K. (1992) Rectification of digital imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 58, no 3, p. 339-334.

Obermeier, S.F. (1979) Slope stability map of Fairfax county, Virginia. US Geological Survey, Misc. Field Studies Map, MF-1072, 1:48 000.

Okimura, T. and Kawatani, T. (1986) Mapping of the potential surface-failure sites on granite mountain slopes. In *International geomorphology*, Gardiner (ed.), Part I, John Wiley & Sons, New York, p. 121-138.

Palm, R.I. and Hodgson, M.E. (1993) Natural hazards in Puerto Rico. *Geographical Review*, no 83, p. 280-289.

Péloquin, S., Gwyn Q. H. J., Claire, B., Vargas, O. y Crespo, W. (1995) Reconocimiento de los depósitos geológicos con la ayuda de sus rasgos espectrales - Andes de Bolivia. *Spectel '95, LaSerrena* Febrero 8-13, Chili, p. 239-243.

Penquet, D.J. and Marble, D.F. (1990) *Introductory readings in GIS*. Taylor and Francis, London, 371 p.

Pike, R.J. (1988) The geometric signature: quantifying landslide susceptible terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology*, vol. 20, p. 491-511.

Pohl, C. (1996) Geometric aspects of multisensors image fusion for topographic map updating in humid tropics. ITC publication, no 39, 21 p.

Pohl, C. and Van Gerderen, J.L. (1993) Geometric integration of multi-image information. *Space at the Service of Environment, Proceedings of the second ERS-1 Symposium*, October 11-14, Hamburg, Germany, ESA SP-361, p. 1255-1260.

Pohl, C. and Van Gerderen, J.L. (1998) Multisensors image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, vol.19, no 5, p. 823-854.

Price, C.V., Birnie, R.W., Logan, T.L., Rock, B.N. and Parrish, J. (1985) Discrimination of lithologic units on the basis of botanical association and Landsat TM spectral data in the ridge and valley province, Pennsylvania. *4th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology*, San Fransico, California, April 1-4. p. 531-538.

Radbruch-Hall, D.H., Colton, R.B. Davies, W.E., Skipp, B.A., Lucietta, I. and Varnes, D.J. (1976) Preliminary landslide overview map of conterminous United States. U.S Geological Survey, Misc. Field Studies Map, MF-771.

Raju, P., Krishan, R. and George, A.M.. (1990) A rule-based expert system for the identification and classification of landforms using satellite data. *Asia-Pacific Remote Sensing journal*, vol. 3, no 1, p. 73-80.

Read, J.R.L. and Harr M.E. (1988) Slope stability analysis using the principle of maximum entropy. *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland, 1988, vol. 2, p. 749-755.

Reger, J.P. (1979) Discriminant analysis as a possible tool in landslide analysis investigations. *Earth Surface Processes*, vol. 4, p. 267-273.

Rib, H.T. and Liang T. (1978) Recognition and identification. In *Landslides: Analysis and control*. Edited by R. L. Schuster and R.J. Krizek, National Research Council, Special Report 176, p. 34-80.

Rich, E. and Knight, K. (1991) *Artificial Intelligence*. Second Edition, McGraw Hill, New York, 323 p.

Ripple, W.J. and Ulshoefer, V.S. (1987) Expert systems and spatial data models for efficient geographic data handling. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 53, no 10.

Rivard, L. A. (1994) *Interprétation géomorphologique de la Cuenca Taquiña à l'aide de photographies aériennes*. Rapport interne, Université de Sherbrooke, Département de géographie et télédétection, CARTEL, 4 p.

Robinson, V.B. and Frank, A.U. (1987) Expert systems for geographical information systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, no 10, p. 1435-1442.

Robinson, V.B., Frank, A.U. and Karimi, H. (1987) Expert system for geographic information system in resource management. *Artificial Intelligence in Natural Resource Management*, vol. 1, no 1, p. 47-57.

Rolston, D.W. (1988) *Principles of artificial intelligence and expert systems development*. Shreve, T.R. and Galen, H.F. (ed.), McGraw Hill, New York, 257 p.

Rosenfeld, C.L. (1994) The geomorphological dimensions of natural disasters. *Geomorphology*, vol. 10, p. 27-36.

Runqui, H. and Yuango, L. (1992) Logical message model of slope stability prediction in the Three Gorges reservoir area, China. *Proceedings of the 6th International Symposium, Christchurch, New Zealand*, vol. 1, February 10-14, p. 977-981.

Sabto, M. (1991) Probabilistic modelling applied to landslides in central Colombia using GIS procedures. M. Sc. thesis, ITC Enschede, Netherlands, 26 p.

Salinas, R. (1995) Capacidad de uso mayor de la tierra y su relación con el uso actual en la Cuenca Taquiña. PROMIC, Cochabamba, Document interne, 19 p.

Scanvic, J.Y., Rouzeau, O. et Leroi, E. (1992) La télédétection spatiale stéréoscopique, un outil de géomorphologie qualitative et quantitative: exemple d'utilisation en région andine pour la cartographie des zones de susceptibilité aux mouvements de terrain. *Société Française de Photogrammétrie et Télédétection*, Bulletin no 125, p. 26-40.

Schistad-Solberg, A.H., Jain, A.K. and Taxt, T. (1994) Multisource classification of remotely sensed data: fusion of Landsat TM and SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 32, p. 768-778.

Schowengerdt, R.A. and Wang, H.-L. (1989) A general purpose expert system for image processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, no 55, p. 1277-1284.

Schuster, R.L. (1996) Socioeconomic significance of landslides. In *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 247, Washington D.C., p. 12-34.

Skidmore, A.K. (1989) An expert system classifies eucalypt forest types using thematic mapper data and a digital terrain model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 55, no 10, p. 1449-1464.

Soeters, R. and Van Westen, C.J. (1995) Slope instability recognition, analysis and zonation. In *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 247, Washington D.C., p. 129-175.

Soeters, R., Van Westen, C.J. and Rengers, N. (1993) Mountain hazard mapping making use of remote sensing and geographic information systems. 25th International Symposium of Remote Sensing and Global Environmental Change, Graz, Austria, April 4-8 , p. 54-65.

Stadelmann, M. and Lodwick, G.D. (1990) A knowledge-based system for digital image processing for earth resources applications. 7th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary, Canada, October 2-6, vol. 1, p. 219-230.

Stevenson, P.C. (1977) An empirical method for the evaluation of relative landslide risks. *Bulletin of International Association of Engineering Geologist*, vol. 16, p. 69-72.

Strahler, A.H. (1980) The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, vol. 10, no 1, p. 135-163.

Strahler, A.H., Logan, T.L., and Bryant, N.A. (1978) Improving forest classification accuracy from Landsat by incorporating topographic information. In *Proceeding of the 12th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan, USA, p. 927-942.

Strobl, D., Raggam, J. and Buchroithner, M.F. (1990) Terrain correction geocoding of a multi-sensor image data set. *Proceedings 10th EARSeL Symposium*, Toulouse, France, p. 98-107.

Sugden D.E. and John B.S. (1985) *Glaciers and landscape: a geomorphological approach*. Edward Arnold (ed.), London, 376 p.

Swanson, F.J. and Dyerneess, C.T. (1975) Impact of clearcutting and road construction on soil erosion by landslides in western Cascade range, Oregon. *Geology*, no 3, p. 494-496.

Takagi, M., Murai, S. and Akiyama, T. (1992) Generation of land disaster risk map from Landsat TM and DTM data. *ISPRS Congress Proceedings, 17th, vol. 29, Part B6, Commission VII*, p. 754-759.

Takei, A. (1982) Limitation methods of hazard zones in Japan. In Takei and Aulitzky, eds., *The report of Japanese - Austrian Joint Research, forecast of disaster zone in mountainous regions, 1980-81: Kyoto University Laboratory of Erosion Control research, Bulletin no 1*, p. 26-34.

Tazieff, H. (1983) Rapport du Président de la République. *Journal de la République Française*, 58 p.

Terzaghi, K. (1950) Mecanism of landslides. In *Application of Geology to Engineering Practice*, S. Paige (ed.), Geological Survey of America, vol. 5, p. 83-123.

Terzhaghi, K. and Peck, R.B. (1967) *Soil mecanics in engineering practice*. John Wiley & Sons, New-York. 729 p.

Tom,C.H. and Miller, L.D. (1984) An automated land-use mapping comparaison of the Bayesian maximum likelihood and linear discriminant analysis algorithms. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 50, no 2, p. 1245-1249.

Toutin,T. (1995) Intégration de données multisources: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 16, no 15, p. 2795-2811.

Toutin,T. (1996) La correction géométrique rigoureuse: un mal nécessaire pour la santé de vos résultats. *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no 2, p.184-189.

Trenhaile, A.S. (1990) *The geomorphology of Canada: An Introduction*. Oxford University Press, Toronto, 239 p.

Valenzuela, C.R. and Baumgardner, M.F. (1990) Selection of appropriate cell sizes for thematic maps. *ITC Journal*, vol. 3, p. 219-224.

Van Westen, C. J. (1993) Application of geographic information systems to landslide hazard zonation. *ITC , Publication no 15*, 245 p.

Varnes, D.J. (1978) Slope movement type and processes. In *Landslides: Analysis and control*. Edited by R. L. Schuster and R.J. Krizek. National Research Council, Special Report 176, p. 11-33.

Varnes, D.J. and Commission on Landslides and other Mass-Movements - IAEG (1984) Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. The UNESCO Press, 63 p.

Verstappen, S.T. (1983) Applied Geomorphology. Elsevier, Amsterdam. 437 p.

Ward, T.J., Ruh-Ming, L. and Simons D.B. (1982) Mapping landslide hazard in forest watershed. Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 108, no GT2, p. 319-324.

Waterman, D.A. (1986) A guide to expert system. Addison-Wesley, 419 p.

Wu, T.H. (1995) Soil strenght and stability analysis. In Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Academy of Sciences, Special Report 247, Washington D.C., p. 319-332.

Zevenbergen, L.W. and Thorne, C.R. (1987) Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surface Processes, vol. 12, p. 47-56.

Zhuang, X., Engel, B. A., Xiong, X. and Johannsen, C.J. (1995) Analysis of classification results of remotely sensed data and evaluation of classification algorithms. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 61, no 4, p. 427-433.

## Annexe 1. Document de travail de l'expert antécédent à la cartographie des NSMT



### LÉGENDE

- R1 lithologies sédimentaires compétentes
- R2 lithologies sédimentaires incompétentes
- ↙ C colluvions impliqués dans un mouvement de terrain
  - C colluvions indifférenciés
- G dépôts glaciaires indifférenciés
- F dépôts fluvioglaciaires indifférenciés
- X ravinnements de surface
- ↘ linéaments régionaux - possiblement reliés à une faille majeure
- ↗ linéaments de fractures locales

**Annexe 2. Emplacement des sites de vérification terrain**