

Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**



Landeshydrologie und -geologie
Service hydrologique et géologique national
Servizio idrologico e geologico nazionale

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 27

**Analyse semi-automatisée
de l'imagerie aérienne
et détection des glissements de terrain:
possibilités et limites**

J. M. Jaquet, P. Schoeneich, C. Collet, M. Spicher, O. Lateltin



Landeshydrologie und -geologie
Service hydrologique et géologique national
Servizio idrologico e geologico nazionale

Geologische Berichte – Rapports géologiques – Rapporti geologici
Nr. 27

**Analyse semi-automatisée
de l'imagerie aérienne
et détection des glissements de terrain:
possibilités et limites**

J. M. Jaquet¹⁾, P. Schoeneich¹⁾, C. Collet²⁾, M. Spicher²⁾, O. Lateltin³⁾

1)
UTED
Sciences de la Terre
Université de Genève
CH-1211 Genève 4

2)
IGUF
Institut de Géographie
Université de Fribourg
CH-1700 Fribourg

3)
SHGN/OFEG
Service hydrologique
et géologique national
CH-3003 Berne

Rapp. géol. Serv. hydrol. géol. natl. **27** (2000)

Publication et distribution:
Office fédéral des eaux et de la géologie
Service hydrologique et géologique national
3003 Berne

ISBN 3-906723-40-2
ISSN 1017-1509

© 2000 Office fédéral des eaux et de la géologie, Service hydrologique et géologique national
CH-3003 Berne, Suisse

1.2001 350 860046507

PRÉFACE DE L'ÉDITEUR

Les nouvelles bases légales en matière de prévention des dangers naturels exigent que les cantons établissent des cadastres et des cartes de dangers qui serviront à une planification optimale de l'aménagement du territoire dans les secteurs sensibles aux mouvements de terrain, aux inondations et aux avalanches.

Dès 1997, le Service hydrologique et géologique national (SHGN/OFEG) s'est intéressé au développement de nouveaux outils de cartographie pour les glissements de terrain, en particulier l'utilisation des images satellitaires et aériennes. Les recherches et le développement méthodologique ont été réalisés sur deux régions-test (Adelboden et Lac-Noir), en collaboration avec l'Unité de Télédétection et de SIG (UTED-S) de l'Université de Genève et l'Institut de Géographie de l'Université de Fribourg. Au cours de cette étude, les aspects de la méthode qui nécessitent encore un développement ont été définis. Les travaux de mise en forme de l'information analogique prennent largement le pas sur l'analyse proprement dite de cette information. La résolution spatiale actuelle des images satellitaires ne permet pas encore de détecter des glissements de terrain peu actifs et d'extension limitée. Par contre, l'analyse diachronique d'images aériennes numérisées constitue déjà un outil applicable aux glissements de terrains actifs en zone de faible couverture forestière.

Actuellement la méthode traditionnelle de cartographie reste l'outil le plus performant pour l'identification et la détection des terrains instables dans l'environnement alpin. À l'avenir, l'analyse de l'imagerie aérienne ou satellitaire appliquée aux glissements de terrain apportera un complément indispensable aux techniques traditionnelles pour la détection et la surveillance des zones sensibles.

Il convient de remercier ici les auteurs de cette étude pour leur compétence et leur engagement.

Les auteurs sont seuls responsables du contenu du texte et des illustrations.

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Die neuen gesetzlichen Bestimmungen über die Prävention vor Naturgefahren verpflichten die Kantone, Gefahrenkarten zu erstellen und Kataster zu führen. Diese sollen bei raumwirksamen Tätigkeiten die Gefahren Massenbewegungen, Hochwasser und Lawinen berücksichtigen.

Seit 1997 befasst sich die Landeshydrologie und -geologie (LHG/BWG) mit der Entwicklung neuer Methoden zur Kartierung von Rutschungen. Dabei werden besonders die Möglichkeiten von Satelliten- und Luftbildern geprüft. Mit der Unité de Télédétection (UTED-S) der Universität Genf und dem Geographischen Institut der Universität Fribourg wurden die neuen Methoden in den Testgebieten Adelboden und Schwarzsee entwickelt. Die Auswertung analoger Bilder ist noch sehr zeitaufwändig, die Auflösung von Satellitenbildern ist für langsame oder kleine Rutsche noch ungenügend und die Bewaldung bleibt ein Problem. Hingegen kann eine zeitliche Abfolge von Luftbildern in Rutschgebieten mit hohen Verschiebungen nützliche Resultate liefern.

Im jetzigen Zeitpunkt bleibt die traditionelle Kartierung von Hanginstabilitäten die effizienteste Methode im Alpenraum. Zukünftig werden Satelliten- und Luftbildanalysen aber

einen bedeutenden Beitrag bei der Ausscheidung und der Überwachung von Rutschungen leisten können.

Den Autoren dieser Studie sei für die Kompetenz und das Engagement gedankt.

Für den Inhalt des Textes und der Illustrationen sind die Autoren allein verantwortlich.

PREFAZIONE DELL'EDITORE

Le nuove basi legali in materia di prevenzione dai pericoli naturali esigono che i cantoni stabiliscano dei catasti e delle carte dei pericoli che servano ad una migliore pianificazione della sistemazione del territorio nei settori sensibili ai movimenti di terreno, alle inondazioni e alle slavine.

Dal 1997, il Servizio idrologico e geologico nazionale (SIGN/UFAEG) si è interessato allo sviluppo di nuovi strumenti cartografici per gli smottamenti di terreno, in particolare l'utilizzazione delle immagini aeree e da satellite. Le ricerche e la messa a punto delle metodologie sono state realizzate su due regioni test (Adelboden e Lago Nero) in collaborazione con l'Unità di Telerilevamento e del SIG (UTED-S) dell'Università di Ginevra e con l'Istituto di Geografia dell'Università di Friburgo. Durante questo studio, sono stati definiti gli aspetti del metodo che necessitano d'un ulteriore sviluppo. I lavori di preparazione dell'informazione analogica prevalgono sull'analisi propriamente detta dell'informazione. L'attuale risoluzione spaziale delle immagini da satelliti non permettono, per il momento, di rilevare gli smottamenti di terreno poco attivi e con limitate estensioni. Invece, l'analisi diacronica dell'immagine aerea digitalizzata costituisce già uno strumento applicabile agli smottamenti di terreno attivi in zone con debole copertura forestale.

Attualmente il metodo cartografico tradizionale resta lo strumento più efficace per l'identificazione ed il rilevamento dei terreni instabili in ambiente alpino. In futuro, l'analisi delle immagini aeree o da satellite applicata agli smottamenti di terreno rappresenterà un complemento indispensabile alle tecniche tradizionali di rilevamento e di sorveglianza delle zone sensibili.

Si ringraziano gli autori di questo studio per la loro competenza ed il loro impegno.

Soltanto gli autori sono responsabili del contenuto del testo e delle illustrazioni.

Office fédéral des eaux et de la géologie
Service hydrologique et géologique national
Le chef



Prof. Dr M. Spreafico

RÉSUMÉ

Les zones instables affectées de mouvements de terrain occupent 6 à 8% du territoire national suisse, principalement dans les Alpes et les Préalpes. La prise en compte de ces aléas passe par l'établissement de cartes de phénomènes, puis de dangers.

Dans ce contexte, le SHGN a participé à l'élaboration de recommandations fédérales et a mandaté plusieurs études sur l'utilisation de l'imagerie satellitaire et aérienne numérique et des SIG pour ces démarches cartographiques.

Ces études ont démontré que, actuellement, l'imagerie satellitaire visible, proche-infrarouge (PIR) ou radar n'apporte pas d'informations appropriées à l'identification des glissements de terrain en Suisse, avant tout pour des raisons de résolution spatiale. En revanche, les images aériennes numériques à haute résolution offrent un potentiel intéressant. Le présent travail en présente donc une méthodologie d'analyse semi-automatisée, qui s'inscrit dans le cadre des SIG: elle exploite à la fois le riche corpus des stéréophotos aériennes et les données auxiliaires topographiques et géologiques.

Lors d'une première approche unitemporelle, l'imagerie aérienne panchromatique ou PIR, après scannage et orthorectification, est soumise à une série d'opérations de filtres. Celles-ci, à la fois, éliminent les zones où la méthode n'est pas applicable (forêts) et mettent en évidence les signatures de luminance et de texture. Ces dernières se présentent sous la forme de linéaments sub-parallèles aux courbes de niveau, figurant des niches d'arrachement, crevasses ou bourrelets. Ces linéaments sont vectorisés, leurs caractéristiques géométriques calculées par des scripts ArcView, et résumées sous forme de cartes de densité de linéaments par unité de surface.

Dans l'approche multitemporelle, les orthophotos font l'objet d'une analyse diachronique en modes raster et vecteur. Celle-ci débouche également sur des cartes figurant les déplacements d'objets-repères qui permettent ainsi l'identification de zones instables.

Au sein de la procédure générale d'identification de zones instables, les cartes ainsi produites peuvent servir soit à un «screening» préliminaire au travail de terrain, soit à l'établissement de couches thématiques s'ajoutant à la cartographie traditionnelle.

Sous sa forme actuelle, la méthodologie n'est pas encore applicable à un travail de production, les opérations d'acquisition et de manipulation de l'information prenant trop de temps par rapport à l'analyse. Celle-ci est également limitée pour le moment à un type particulier de linéament. En revanche, dans le contexte du développement prévu des Systèmes d'Information du Territoire et d'une disponibilité accrue de l'information sous forme numérique (orthophotos, plans d'ensemble et modèle numérique d'altitude à haute résolution), une amélioration des outils d'analyse permettra une meilleure intégration de cette méthodologie dans la cartographie et le suivi des mouvements de terrain.

ZUSAMMENFASSUNG

6–8% der Fläche der Schweiz sind von Hanginstabilitäten betroffen, wobei die Häufigkeit in den Alpen und den Voralpen am grössten ist. Diese Massenbewegungen werden in der Planung mittels Phänomen- und Gefahrenkarten berücksichtigt. Die LHG erarbeitete mit verschiedenen Partnern die eidgenössischen Empfehlungen dazu. Zudem erteilte sie Studienaufträge im Bereich numerische Anwendungsmethoden von Satelliten- und Luftbildern in GIS-Anwendungen.

Die Studien zeigen, dass satellitengestützte Bild-, Infrarot- und Radaraufnahmen heute ungenügende Informationen zur Ausscheidung von Rutschungen liefern, weil die Auflösung ungenügend ist. Hingegen liegt in den hochauflösenden, numerischen Luftbildern ein interessantes Potenzial. Die vorliegende Studie zeigt GIS-Anwendungen mit halb-automatischen Analysen. Dabei werden stereografische Luftbilder genutzt, diese werden mit topografischen und geologischen Daten ergänzt.

In einem ersten Schritt werden Momentanaufnahmen von Luftbildern analysiert («approche unitemporelle»). Dabei werden Farb- oder Infrarotluftbilder gescannt, entzerrt und gefiltert. Dieses Verfahren eliminiert Waldflächen, in denen die Methode nicht anwendbar ist. Die Filter heben Geländeformen in punkto Helligkeit und Struktur hervor. Dadurch werden Anrissnischen, Bodenrisse oder Stauchwülste durch Lineamente, die subparallel zu den Höhenkurven verlaufen, ausgeschieden. Anschliessend werden Vektoren generiert und geometrische Eigenschaften mit ArcView-Scripts berechnet. Das Resultat sind Karten der Dichte von Lineamenten.

Die zeitliche Analyse einer Abfolge von Orthofotos («approche multitemporelle») ergibt die Verschiebung von Referenzobjekten, die sich in instabilen Zonen befinden (Raster- und Vektormodus).

Im Rahmen der traditionellen Kartografie dienen die numerischen Karten als vorläufiges «screening» oder als ergänzende thematische Information. Beim heutigen Entwicklungsstand ist die digitale Erstellung von Massenbewegungskarten mit Luft- und Satellitenbildern nicht umsetzbar. Dabei beanspruchen die Aufbereitung und die Manipulation der Daten zuviel Zeit, zudem werden nur bestimmte Linienformen erkannt. Mit der Entwicklung in den Bereichen Fernerkundung, GIS, Orthofotos und digitale Höhenmodelle werden die numerischen Analysemöglichkeiten laufend verbessert. Davon werden die Kartierung und die Überwachung von Massenbewegungen profitieren.

RIASSUNTO

Le zone instabili interessate da movimenti di terreno occupano dal 6 all'8% del territorio Svizzero, principalmente nelle Alpi e nelle Prealpi. Il computo di questi rischi necessita dell'allestimento delle carte dei fenomeni e poi di quelle dei pericoli.

In questo contesto, il SIGN ha partecipato all'elaborazione delle raccomandazioni federali ed ha fatto eseguire differenti studi concernenti l'utilizzazione dell'immagine digitalizzata aerea o da satellite e dei SIG (Sistemi d'Informazione Geografica) per l'allestimento di queste carte.

Questi studi hanno dimostrato che le immagini da satellite nello spettro del visibile, del vicino infrarosso (VIR), e del radar, non forniscono informazioni sufficienti all'identificazione degli smottamenti di terreno in Svizzera, principalmente per ragioni di risoluzione spaziale. Al contrario, le immagini aeree digitalizzate ad alta risoluzione offrono un interessante potenziale. Questo lavoro presenta un metodo d'analisi semiautomatica, che s'iscrive nel quadro dei SIG: questo metodo sfrutta contemporaneamente il ricco corpo delle foto aeree stereografiche oltre ai dati ausiliari topografici e geologici.

In un primo approccio «unitemporale», l'immagine aerea pancromatica o nel campo del vicino infrarosso, dopo scansione e rettificazione ortografica, viene sottoposta ad una serie d'operazioni di filtraggio. Queste operazioni eliminano le zone dove il metodo non è applicabile (foreste) mettendo in evidenza le tracce di brillantezza e di tessitura. Queste tracce si presentano sotto forma di lineamenti subparalleli alle curve di livello, raffiguranti le nicchie di distacco, le fessure oppure i bordi degli smottamenti. Questi lineamenti vengono convertiti in vettori, le loro caratteristiche geometriche vengono calcolate dagli «scripts ArcView», e riassunti sotto forma di carte di densità dei lineamenti per unità di superficie.

In un approccio «multitemporale» o diacronico, le ortofoto sono l'oggetto d'una analisi diacronica in modo raster ed in modo vettore. Questa impostazione consente la realizzazione di carte che evidenziano lo spostamento dei capisaldi (oggetti sul terreno), permettendo così l'identificazione delle zone instabili.

In seno alla procedura generale d'identificazione delle zone instabili, le carte così prodotte possono servire sia per uno «screening» preliminare al lavoro di terreno, sia alla definizione dei livelli tematici utili alla cartografia tradizionale.

Nella sua forma attuale, la metodologia non è ancora applicabile ad un lavoro di produzione, le operazioni di acquisizione e di manipolazione dell'informazione prendono troppo tempo in rapporto all'analisi. Questa è anche limitata per il momento ad un tipo particolare di lineamento. Al contrario, in un contesto di sviluppo previsto del Sistema d'Informazione del Territorio e d'una disponibilità accresciuta dell'informazione sotto forma digitale (ortofoto, piano d'insieme e modello digitale altimetrico – MDA – ad alta risoluzione), un progresso degli strumenti d'analisi permetterà una migliore integrazione di questa metodologia nella cartografia e nel controllo dei movimenti di terreno.

ABSTRACT

Unstable areas affected by landslides occupy 6 to 8 % of the Swiss territory, mostly in the Alps and Prealps. The management of this type of natural hazard implies the availability of a set of maps describing the occurrence of phenomena as well as a zoning of dangers.

In this context, the Swiss Hydrological and Geological Survey took an active part in the elaboration of a set of federal recommendations on landslide mapping, and commissioned studies on the use of aerial imagery and GIS technology in this type of mapping.

These studies have clearly shown that satellite visible, NIR and radar imagery does not bring information suitable for the identification of mass movements in Switzerland, chiefly because of inadequate spatial and temporal resolution, whereas high-resolution digital aerial photographs are much more promising. This work presents a GIS-based, semi-supervised methodology based on the rich corpus of aerial stereo-photographs and ancillary data (topography and geology).

Through a first, unitemporal approach, the aerial imagery is digitized and georeferenced. It then undergoes a series of filtering operations, which eliminate areas where the methodology is not applicable (forests) and enhance the reflectance and textural signatures. These show as lineaments, sub-parallel to topographic contours, expressing landslide scars, cracks and surficial folds. Lineaments are vectorised, then their geometric characteristics are computed by ArcView scripts and summarised as maps of lineament density.

In the multi-temporal approach, the ortho-photographs are analysed diachronically in both raster and vector modes, producing maps of reference objects displacements and thus delineating zones of instability.

Within the overall procedure of landslide identification, these maps may be used either in a screening phase, prior to field work, or as thematic layers additional to traditional cartography.

Under its present form, our methodology is not yet applicable in routine map production, data acquisition and manipulation taking too much time compared to analysis. The signature extraction procedure is still limited to extension, short-wave lineaments, and will have to be completed to include compressional features. In a context of increased availability of numerical information (orthophotos, high-resolution DTM, geological maps) stored and manipulated in GIS, this methodology is likely to find its place in landslide mapping and monitoring.

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE DE L'ÉDITEUR – VORWORT DES HERAUSGEBERS	3
PREFAZIONE DELL'EDITORE	4
RÉSUMÉ	5
ZUSAMMENFASSUNG	6
RIASSUNTO	7
ABSTRACT	8
LISTE DES FIGURES	11
LISTE DES TABLEAUX	14
PARTIE 1 – CONTEXTE ET OBJECTIFS	15
1. INTRODUCTION	17
1.1 Contexte institutionnel	17
1.2 Objectifs	17
2. CADRE MÉTHODOLOGIQUE GÉNÉRAL	18
2.1 La cartographie des mouvements de terrain	18
2.2 Place de l'analyse d'images dans la cartographie conventionnelle	19
2.3 L'approche numérique	21
3. MOUVEMENTS DE TERRAIN ET SIGNATURES	22
3.1 Typologie	22
3.2 Signatures	23
4. L'IMAGERIE AÉRIENNE	31
4.1 Contenu informationnel et signatures	31
4.2 Photos aériennes analogiques	33
4.3 L'imagerie aérienne numérique	33
4.4 Critères de choix	35
4.5 Le cadre des SIRS	35
5. LE PROJET TÉLÉDÉTECTION DU SHGN	37
5.1 Résultats de l'étude-pilote «Adelboden»	37
5.2 Résultats de l'étude-pilote «Hohberg»	40
PARTIE 2 – PROCÉDURE D'EXPLOITATION DES ORTHOPHOTOS NUMÉRIQUES	41
6. RECTIFICATION DES STÉRÉOPHOTOS OFT	43
6.1 Éléments	43
6.2 Variante «légère» avec configuration bureautique	45
6.3 Variante «élaborée» avec équipement spécialisé	48
6.4 Comparaison des résultats	49

7. ANALYSE TEXTURALE DIRIGÉE (UNITEMPORELLE)	52
7.1 Méthode	52
7.2 Discussion	66
7.3 Comparaison avec la cartographie de terrain	70
7.4 Test de variantes de la méthode pour la mise en évidence de bourelets et de niches	74
7.5 Bilan général de l'analyse texturale dirigée	80
8. ANALYSE DIACHRONIQUE	81
8.1 Approches	81
8.2 Méthodes d'interprétation des images diachroniques	83
8.3 Résultats	83
8.4 Bilan général de l'analyse diachronique	86
9. MISE EN ŒUVRE PRATIQUE	87
9.1 Equipement et logiciels	87
9.2 Documents	87
9.3 Facteur temps	87
PARTIE 3 – CONCLUSIONS	89
10. APPORTS DE LA MÉTHODOLOGIE	91
10.1 Mise en contexte	91
10.2 Conditions d'utilisation	92
10.3 Comparaison avec l'approche analogique traditionnelle	93
10.4 Comparaison avec la photogrammétrie	93
10.5 Orthorectification et MNA	94
11. DÉVELOPPEMENTS FUTURS	96
11.1 Extraction de l'information	96
11.2 Validation de la méthodologie	96
11.3 Programmation informatique	96
11.4 Harmonisation numérique/analogique	96
BIBLIOGRAPHIE	97
«RAPPORTS GÉOLOGIQUES DU SHGN» DÉJÀ PARUS	100
ANNEXE 1 – MARCHE À SUIVRE DE L'ANALYSE TEXTURALE DIRIGÉE	103
ANNEXE 2 – SCRIPTS <i>AVENUE</i>	115
ANNEXE 3 – DONNÉES SUR CD-ROM	127
ANNEXE 4 – PROJETS <i>ArcView</i>	129

LISTE DES FIGURES

Fig. 2.1:	Organigramme méthodologique général.	20
Fig. 3.1:	Signatures morphologiques et topographiques des mouvements de terrain. Cas général.	24
Fig. 3.2:	Signatures spécifiques des glissements rocheux.	25
Fig. 3.3:	Signatures spécifiques des glissements de flysch.	26
Fig. 3.4:	Signatures morphologiques et topographiques de premier ordre des glissements de terrain.	28
Fig. 3.5:	Signatures topographiques de deuxième ordre des glissements de terrain.	28
Fig. 3.6:	Signatures spécifiques des glissements rocheux.	29
Fig. 3.7:	Signatures topographiques de troisième ordre.	29
Fig. 3.8:	Signatures pédologiques et végétales.	30
Fig. 3.9:	Signatures sur les infrastructures.	30
Fig. 5.1:	Images radar ERS-1 GTC du 2.8.1991, région d'Adelboden.	39
Fig. 5.2:	Résultats de l'analyse multitemporelle différentielle drapée sur la carte des phénomènes, zone de Hirzboden.	39
Fig. 6.1:	Photo aérienne de 1969 orthorectifiée, avec la zone d'intérêt encadrée.	50
Fig. 6.2:	Photo aérienne de 1981 orthorectifiée, avec la zone d'intérêt encadrée.	50
Fig. 6.3:	Photo aérienne de 1997 orthorectifiée, avec la zone d'intérêt encadrée.	51
Fig. 6.4:	Plan d'ensemble de la région du Lac-Noir, avec la zone d'intérêt encadrée.	51
Fig. 7.1:	Organigramme de l'analyse texturale dirigée.	53
Fig. 7.2:	Orthoimage PIR no Fr961083 – Région du Hohberg.	54

Fig. 7.3: Masque des pentes superposé sur le MNA (ensemble de la zone).	56
Fig. 7.4: Masque des orientations (ensemble de la zone).	56
Fig. 7.5: Masque des forêts (zone supérieure du glissement).	56
Fig. 7.6: Zones à haute luminance.	57
Fig. 7.7: Zones à haute luminance (village).	58
Fig. 7.8: Masque final (<i>masktot8</i>).	58
Fig. 7.9: Estampage directionnel. Image en niveaux de gris. Sous-zone de Guglera.	59
Fig. 7.10: Estampage directionnel. Image débruitée, inversée et binarisée. Sous-zone de Guglera.	60
Fig. 7.11: Linéaments bruts. Sous-zone de Guglera.	61
Fig. 7.12: Linéaments bruts masqués par le masque total. Sous-zone de Guglera.	63
Fig. 7.13: Linéaments de longueur supérieure à 1,5 m et linéaments raster avant vectorisation. Sous-zone de Guglera.	63
Fig. 7.14: Relation entre les deux descripteurs de densité de linéaments NL_m et SL_m .	64
Fig. 7.15: Carte finale de la densité des linéaments par unité de surface dans la région du Hohberg, exprimée par SL_m .	65
Fig. 7.16: Carte finale de la densité des linéaments par unité de surface dans la région du Hohberg, exprimée par NL_m .	65
Fig. 7.17: Correspondance entre les zones à haute vitesse de glissement et les forêts de vernes entre Guglera et Udrischli.	67
Fig. 7.18: Zones à haute luminance (1969, 1981, 1996 et 1997) entre Udrischli et Lengmoos, superposées à la carte des vitesses de glissement.	67
Fig. 7.19: Carte des zones d'iso-vitesses du glissement de Hohberg.	70
Fig. 7.20: Linéaments dans le carré no 18.	71

Fig. 7.21: Linéaments dans le carré no 16.	72
Fig. 7.22: Linéaments dans le carré no 58.	73
Fig. 7.23: Exemple 1 – Convexité frontale.	76
Fig. 7.24: Exemple 2 – Niche d'arrachement.	77
Fig. 7.25: Exemple 3 – Bourrelets.	78
Fig. 7.26: Exemple 4 – Rides longitudinales.	79
Fig. 8.1: Organigramme de l'analyse diachronique.	82
Fig. 8.2: Carte de différences entre les images 1997 et 1981.	84
Fig. 8.3: Carte de différences entre les images contrastées 1997 et 1981.	84
Fig. 8.4: Mouvements relatifs d'une route et de fossés de drainage entre 1981 et 1997.	85
Fig. 8.5: Mouvements relatifs de la route Udrischli–Lengmoos entre 1981 et 1997.	86

LISTE DES TABLEAUX

Tabl. 4.1: Caractéristiques des données géoréférencées sur le territoire disponibles en Suisse.	34
Tabl. 6.1: Caractéristiques des éléments du processus d'orthorectification mis en œuvre dans les deux démarches.	44
Tabl. 7.1: Matrice de co-occurrence des linéaments et des zones en mouvement.	70

PARTIE 1 – CONTEXTE ET OBJECTIFS

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte institutionnel

Les zones instables affectées de mouvements de terrain occupent en Suisse 6 à 8% du territoire national. Les régions les plus touchées se trouvent dans les cantons alpins, les Préalpes entre le Léman et le lac de Constance, ainsi que certaines parties du Jura plissé. Des événements récents comme les éboulements de Randa (1991) ou le glissement de Falli-Höllli (1994) ont clairement montré que les mouvements de terrain ne peuvent souvent pas être maîtrisés uniquement par des mesures de protection constructive. La prise en compte des dangers naturels nécessite une démarche progressive qui passe d'une phase d'identification (établissement de cartes de phénomènes et de cadastres des événements), à une phase d'évaluation des dangers (simulation et élaboration de cartes de dangers) pour aboutir finalement à la planification des mesures (aménagement du territoire, mesures de protection, plan d'urgence).

Selon les nouvelles lois fédérales sur l'aménagement des cours d'eau et sur les forêts (1991), les cantons ont l'obligation d'établir des cartes de dangers et d'en tenir compte dans les activités de l'aménagement du territoire. Dans ce cadre, la Confédération a proposé aux cantons une légende modulable unifiée pour l'établissement des cartes de phénomènes (KIENHOLZ & KRUMMENACHER 1995) et de nouvelles recommandations pour les cartes de dangers (LOAT & PETRASCHECK 1997; LATELTIN 1997) pour la prise en compte des crues et des mouvements de terrain dans l'aménagement du territoire.

1.2 Objectifs

Le Service hydrologique et géologique national (SHGN) est actif dans la détection et la cartographie des terrains instables, en ayant participé notamment à l'élaboration des recommandations fédérales (TRIPET et al. 1993, BOLLINGER & NOVERRAZ 1996, SCHINDLER et al. 1996). A l'avenir, les cartes de phénomènes et les cartes de dangers pourront être établies à l'aide de nouvelles technologies et le SHGN cherche à explorer le potentiel d'application de ces méthodes pour les proposer ensuite aux cantons et aux bureaux privés. C'est dans ce cadre que l'utilisation de la cartographie par imagerie aérienne et satellitaire des zones instables a été testée à Adelboden (SUTER et al. 1997) et dans la région du Lac-Noir (JAQUET et al. 1998). Ces études poursuivent les objectifs suivants:

- Evaluer les possibilités d'utilisation et le pouvoir de résolution de l'imagerie aérienne et satellitaire pour l'identification, la classification et le suivi des mouvements de terrain en Suisse.
- Présenter une méthodologie d'analyse semi-automatisée des images numériques comme complément à l'analyse stéréophotographique et à la méthodologie classique d'établissement des cartes de phénomènes et de dangers proposée par la Confédération.
- Proposer une intégration de cette méthodologie dans les Systèmes d'Information du Territoire (SIT), graduellement mis en place en Suisse.

2. CADRE MÉTHODOLOGIQUE GÉNÉRAL

2.1 La cartographie des mouvements de terrain

Sur le plan de la cartographie des mouvements de terrain, on distingue plusieurs niveaux d'analyse (VARNES 1984, BRABB 1984):

- Les cartes d'inventaire de glissements (*landslide inventory maps*) recensent tous les mouvements de terrain existants, et se basent donc essentiellement sur une identification des glissements par leurs caractéristiques topographiques, géomorphologiques, géologiques ou les données historiques d'événements. En Suisse, les cartes d'inventaires de glissements constituent les *cartes de phénomènes* (KIENHOLZ & KRUMMENACHER 1995) qui sont établies par des travaux de cartographie sur le terrain et par la compilation de différents documents d'archives (cadastres des événements).
- Les cartes de susceptibilité aux glissements (*landslide susceptibility maps*) indiquent toutes les zones potentiellement instables (souvent classées en plusieurs degrés de susceptibilité), et doivent donc intégrer non seulement les glissements connus, mais aussi les zones actuellement stables présentant un danger de déstabilisation. Ce type d'approche implique l'identification des facteurs favorisant l'instabilité, puis une analyse basée sur la cartographie de ces facteurs. Les cartes de susceptibilité aux glissements sont peu pratiquées en Suisse: comme l'indiquent BOLLINGER & NOVERRAZ (1996), «*il n'existe en pratique que de rares potentialités que surviennent spontanément [...] des glissements de dimension importante en-dehors des zones de glissements déclarés permanents*» et «*une aggravation de phénomènes d'instabilités à grande échelle se limite en pratique à un changement de régime de glissements préexistants*». Il faut cependant signaler les travaux récents sur la détection des glissements de terrain potentiels de LIENER et al. (1996a, b) à l'aide d'un calcul simplifié de stabilité de pente (SLIDISP), couplé à un système d'information géographique.
- Les cartes de danger de glissements (*landslide hazard maps*) indiquent une probabilité d'occurrence de mouvement pour un espace déterminé et un intervalle de temps donné. Une telle approche nécessite en principe l'établissement d'une relation entre le phénomène (glissements, coulées, chutes de pierre) et les facteurs déclenchants (pluies intenses, séismes, etc.). En Suisse, ces cartes de dangers sont établies selon les recommandations fédérales en se basant sur divers documents d'appréciation (cartes de phénomènes, cadastres d'événements, mesures géodésiques), sur une estimation de l'intensité et de la probabilité d'occurrence d'une instabilité de terrain et sur d'éventuels calculs de simulation. Depuis 1991, les cantons concernés ont débuté ces travaux d'élaboration des cartes de dangers, en vertu de l'application des nouvelles bases législatives (Loi fédérale sur les forêts; Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau, 1991) et grâce à la participation financière de la Confédération.

Il faut y ajouter le suivi des mouvements de terrain (*monitoring*), qui peut se faire soit par la comparaison de relevés détaillés successifs, soit par des mesures directes des mouvements.

Ces approches peuvent être menées à différentes échelles:

- Echelle de reconnaissance (1:100'000 à 1:10'000, selon les pays): en Suisse, c'est l'échelle du plan directeur et des cartes indicatives de danger.
- Echelle de planification (1:25'000 à 1:2000): en Suisse, c'est l'échelle des plans d'affectation et des cartes de dangers.
- Echelle de projet (1:10'000 à 1:1000), qui est de la compétence du maître d'ouvrage.

2.2 Place de l'analyse d'images dans la cartographie conventionnelle

Comme indiqué par LATELTIN et al. (1997, p. 27), «*L'étude des mouvements de terrain nécessite une approche pluridisciplinaire qui fait appel à des notions de géologie, de géomorphologie, d'hydrogéologie, de géotechnique, de géophysique, de géodésie et de climatologie*». Dans leur tabl. 2, ces auteurs dressent une liste des méthodes d'analyse utilisées dans le cadre de leur projet. Nous nous en sommes inspirés pour dresser l'organigramme de la fig. 2.1.

La procédure classique comprend une première phase d'extraction d'information à partir de documents analogiques: interprétation des cartes géologiques disponibles (1), analyse géomorphologique des cartes topographiques (2) et stéréophoto-interprétation (3). Une deuxième phase de levés de terrain (4) complète cette *procédure d'identification*, qui conduit à la carte d'inventaire des glissements, appelée aussi «carte d'instabilité» (DUTI 1986), ou «carte des phénomènes» (KIENHOLZ & KRUMMENACHER 1995).

Moyennant une troisième phase d'interprétation (5) et une modélisation géologique (6), on suit la *procédure d'évaluation* des dangers pour arriver finalement à une carte des dangers. Une quatrième phase dite de *planification des mesures à prendre* comprend entre autres une démarche de *suivi* (7) ou de surveillance des phénomènes (bas de la fig. 2.1), dont les résultats peuvent modifier la carte des dangers.

Les techniques d'analyse d'imagerie aérienne, traitées dans ce rapport (8 et 9), s'insèrent dans les étapes de photo-interprétation (3) et de suivi (7), et sont représentées en rose sur la fig. 2.1.

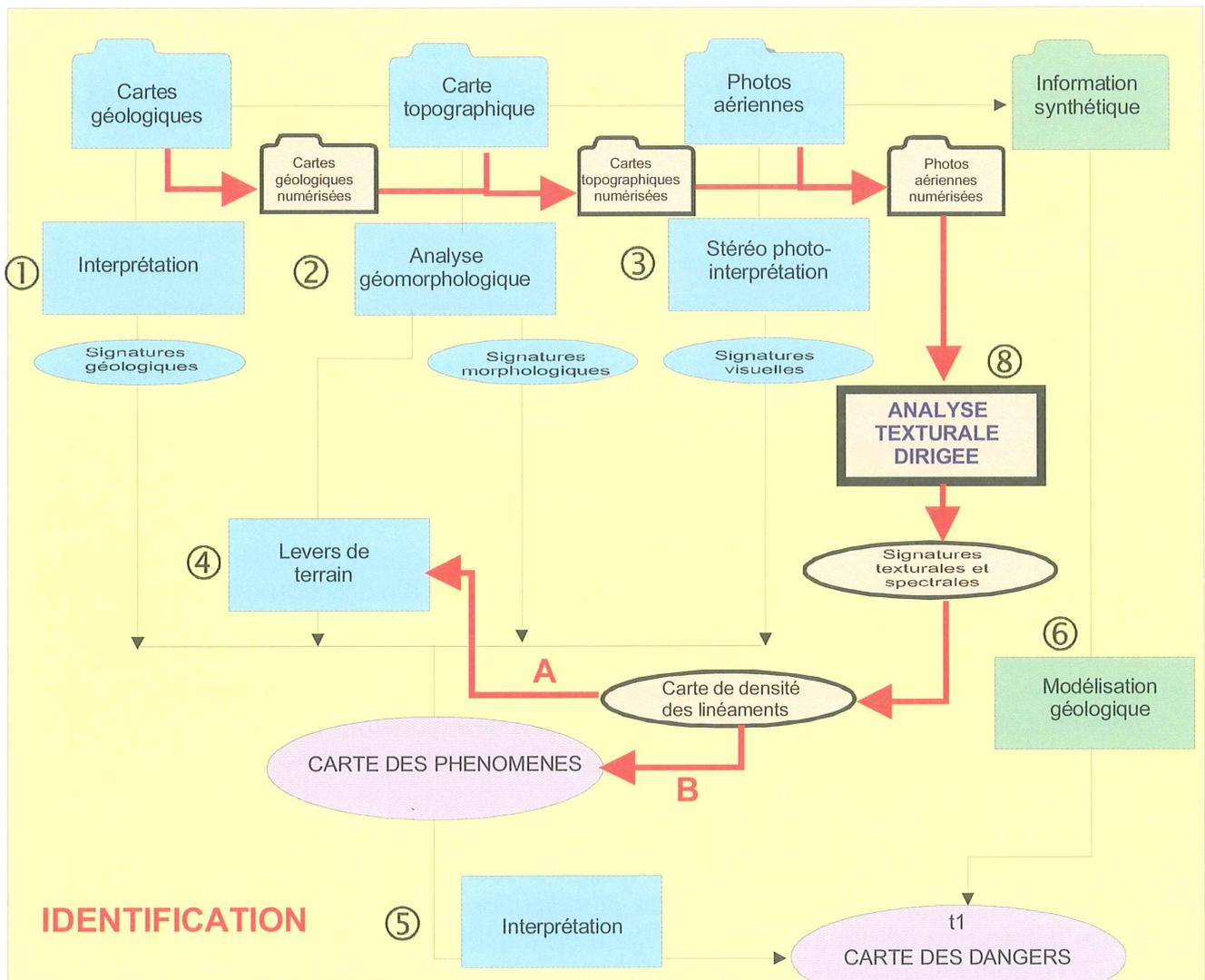


Fig. 2.1: Organigramme méthodologique général, comprenant l'approche «analogique» (en bleu), l'analyse d'images semi-automatisée ou dirigée (en rose) et la modélisation géologique (en vert). Voir le texte (2.2) pour l'explication des chiffres.

2.3 L'approche numérique

Les méthodes informatiques utilisant l'analyse numérique d'images aériennes et satellitaires et les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) ont fait depuis plusieurs années l'objet de recherches et d'applications dans les diverses étapes de la cartographie et de la gestion des mouvements de terrain. On trouvera une revue des recherches effectuées en Europe chez MANTOVANI et al. (1996) et DIKAU et al. (1996), et une revue des méthodes chez CARRARA (CARRARA 1983, CARRARA et al. 1995, 1998).

L'approche numérique telle que nous l'envisageons s'insère comme une alternative dans l'organigramme général de la fig. 2.1 (boîtes et flèches roses).

Cette approche «numérique» peut être motivée par les raisons suivantes:

- Il existe maintenant une large disponibilité de documents numériques, que ce soit de l'imagerie satellitaire (Landsat, SPOT, ERS, IRS, etc.), des orthophotos panchromatiques, couleur ou proche-infrarouge (PIR), ainsi que des cartes et modèles numériques d'altitude.
- Une partie croissante des données sur le territoire, jusqu'ici disponibles sous forme de cartes papier (analogiques), est incorporée désormais sous forme numérique dans les SIT. Hormis leur fonctionnalité de stockage, ces systèmes offrent la possibilité de superposer et de combiner les différents plans d'information. Ils sont par ailleurs ouverts dans leur principe, permettant d'extraire des sous-ensembles géographiques ou thématiques, et d'y rajouter en particulier des images aériennes. Finalement, ils sont à même de prendre en compte la dimension temporelle d'évolution du territoire et des phénomènes qui s'y déroulent. Toute méthodologie d'identification ou de suivi des mouvements de terrain devrait s'appuyer sur la technologie des SIRS, voire même s'y insérer. C'est l'approche que nous avons suivie dans ce travail.
- Classiquement, l'extraction de l'information photographique est faite par le géologue, qui recourt pour cela à son expertise et à un nombre restreint d'instruments (stéréoscope, acétate, crayons, etc.). Le recours à l'informatique (matériel, logiciel et expertise correspondante) accroît largement les moyens à disposition, pour autant bien sûr que les rôles soient correctement répartis: l'opérateur doit «déléguer» à la machine des tâches répétitives et relativement simples, gardant la maîtrise du pilotage de l'ensemble des opérations et l'interprétation des résultats.
- La mise en œuvre d'une approche informatique semi-automatisée ou dirigée (supervisée) permet d'assurer une certaine indépendance des résultats vis-à-vis de l'opérateur, tout en préservant le bon sens géologique (WLADIS 1999).

3. MOUVEMENTS DE TERRAIN ET SIGNATURES

3.1 Typologie

De nombreuses typologies de mouvements de terrain ont été proposées (revue dans FLAGEOLLET 1988). Il faut notamment distinguer:

- les classifications basées sur les mécanismes de glissement et de transport (MEUNIER 1994, COUSSOT & MEUNIER 1996): elles n'aboutissent pas à une typologie proprement dite, mais montrent la continuité existant entre les divers processus. Elles trouvent leur application en géotechnique.
- les typologies basées sur la géomorphologie et la géométrie du mouvement (HEIM 1932, HUTCHINSON 1988, VARNES 1984): elles sont basées sur des caractéristiques identifiables sur le terrain, et sont de ce fait adaptées pour la cartographie.

Nous nous référerons, dans ce rapport, à une typologie géomorphologique simplifiée, distinguant:

A) selon le degré croissant de dislocation et de déformation interne de la masse

- **glissement rocheux**: glissement par gros blocs cohérents, laissant apparaître au sein de la masse des zones rocheuses, voire des affleurements cohérents.
- **glissement de terrain**: mouvement avec forte dislocation et déformation internes, ou mouvement de terrains meubles, donnant des formes émoussées.
- **coulée**: mouvement avec forte composante de fluage, impliquant une certaine plasticité de la masse en mouvement.

B) selon la géométrie du mouvement:

- **glissement rotationnel**: mouvement selon un plan de glissement incurvé, avec un basculement vers l'arrière en tête du glissement. Souvent caractérisé par une niche d'arrachement marquée et profonde.
- **glissement translationnel**: mouvement selon un plan de glissement plan ou ondulé, plus ou moins parallèle à la surface topographique.

C) selon la taille et la profondeur:

- **glissement profond**, en général de grande taille.
- **glissement superficiel**, affectant le sol ou la couche altérée du substratum, généralement de petite taille.

Les phénomènes de chute (écroulement, éboulement, chute de bloc) et de laves torrentielles ne sont pas traités dans ce rapport.

3.2 Signatures

Les mouvements de terrain présentent des types et des formes d'une grande variété, ce dont témoignent les nombreuses typologies proposées. Il est donc difficile de définir des signatures valables pour tous les types de mouvements. Nous indiquerons ci-dessous les caractéristiques les plus couramment rencontrées, tout en précisant les limites et les exceptions.

La plupart de ces signatures sont utilisées autant pour la cartographie sur le terrain que pour la photo-interprétation classique (au stéréoscope), et elles constituent la base même de la reconnaissance des mouvements de terrain. Certaines d'entre elles peuvent également être utilisées pour l'analyse automatique du relief et pour l'analyse d'images. Nous nous efforcerons de préciser l'échelle et le domaine d'application de chacune d'elles.

Il faut relever que certains types de mouvements ne présentent que des formes très peu marquées et sont de ce fait difficilement repérables, même sur le terrain: il s'agit en particulier des glissements très superficiels (slab-slides), qui n'affectent que la couverture pédologique. Très visibles lorsqu'ils sont récents, leurs traces disparaissent vite. Ils sont pourtant d'une grande importance, à cause de leur potentiel destructeur local.

3.2.1 Signatures morphologiques et topographiques

Les signatures morphologiques et topographiques résultent directement du mouvement et de la déformation du terrain. Elles sont indépendantes de la couverture du sol et donc de l'altitude. La fig. 3.1 résume les signatures que l'on peut rencontrer sur les mouvements de type glissement de terrain, la fig. 3.2 celles plus spécifiques aux glissements rocheux, et la fig. 3.3 celles des glissements de flysch.

Signatures de premier ordre

Il s'agit de formes liées au déplacement de la masse. Le profil général du versant est le suivant:

- rupture de pente au sommet de la niche d'arrachement,
- concavité dans la partie supérieure, au niveau de la niche d'arrachement,
- convexité dans la partie inférieure, au niveau de la zone de dépôt de la masse glissée,
- éventuellement «talus» frontal avec rupture de pente basale au pied du glissement.

Cette forme générale se retrouve également en plan:

- concavité dans la niche d'arrachement,
- convexité dans la partie inférieure de la masse glissée.

Ces caractéristiques de profil sont importantes, puisqu'elles sont à l'inverse de l'évolution «normale» d'un versant par colluvionnement, qui donne un profil convexe au sommet et concave à la base. Il est inverse également du profil en auge caractéristique creusé par les glaciers dans la plupart des vallées des Alpes et des Préalpes, ce qui permet de repérer facilement de nombreux versants instables. Cette forme générale est la mieux développée sur les glissements de type rotationnel, ou à forte composante rotationnelle, mais on la trouve, de façon plus ou moins marquée, sur la grande majorité des glissements de terrain (fig. 3.4).

Signatures morphologiques et topographiques des glissements de terrain

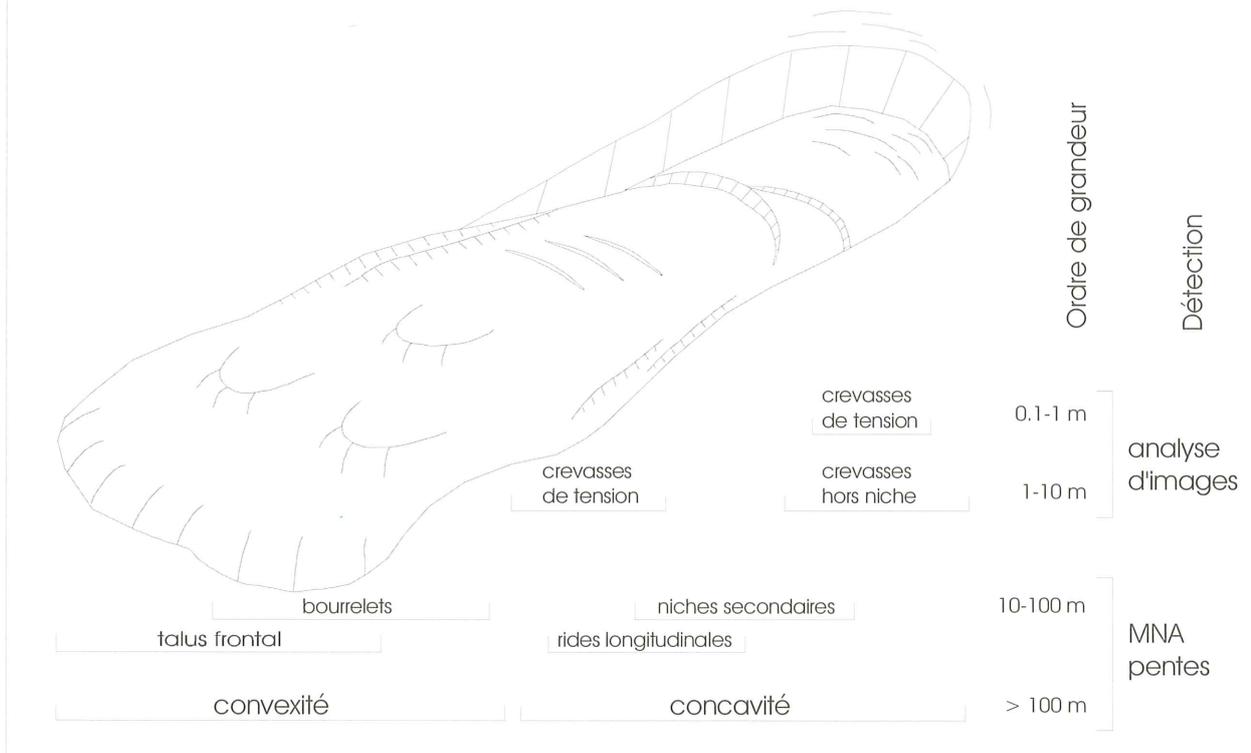


Fig. 3.1: Signatures morphologiques et topographiques des mouvements de terrain. Cas général.

Les glissements de flysch, caractérisés par une forte composante de fluage, présentent souvent une niche d'arrachement évasée et peu caractéristique, et sont repérables surtout par la convexité de leur partie inférieure (fig. 3.3).

La mise en évidence de ces signatures se fait par analyse visuelle de la carte topographique comme préalable au travail de terrain et par analyse du modèle numérique d'altitude.

Signatures de deuxième ordre

Il s'agit ici de formes causées par les mouvements différentiels, d'extension ou de compression, au sein de la masse en mouvement (fig. 3.1 et 3.5).

Formes concaves, liées à l'extension:

- niches d'arrachement secondaires
- gradins
- crêtes dédoublées

Formes convexes:

- bourrelets
- topographie bosselée
- contre-pentes

Formes longitudinales:

- rides longitudinales

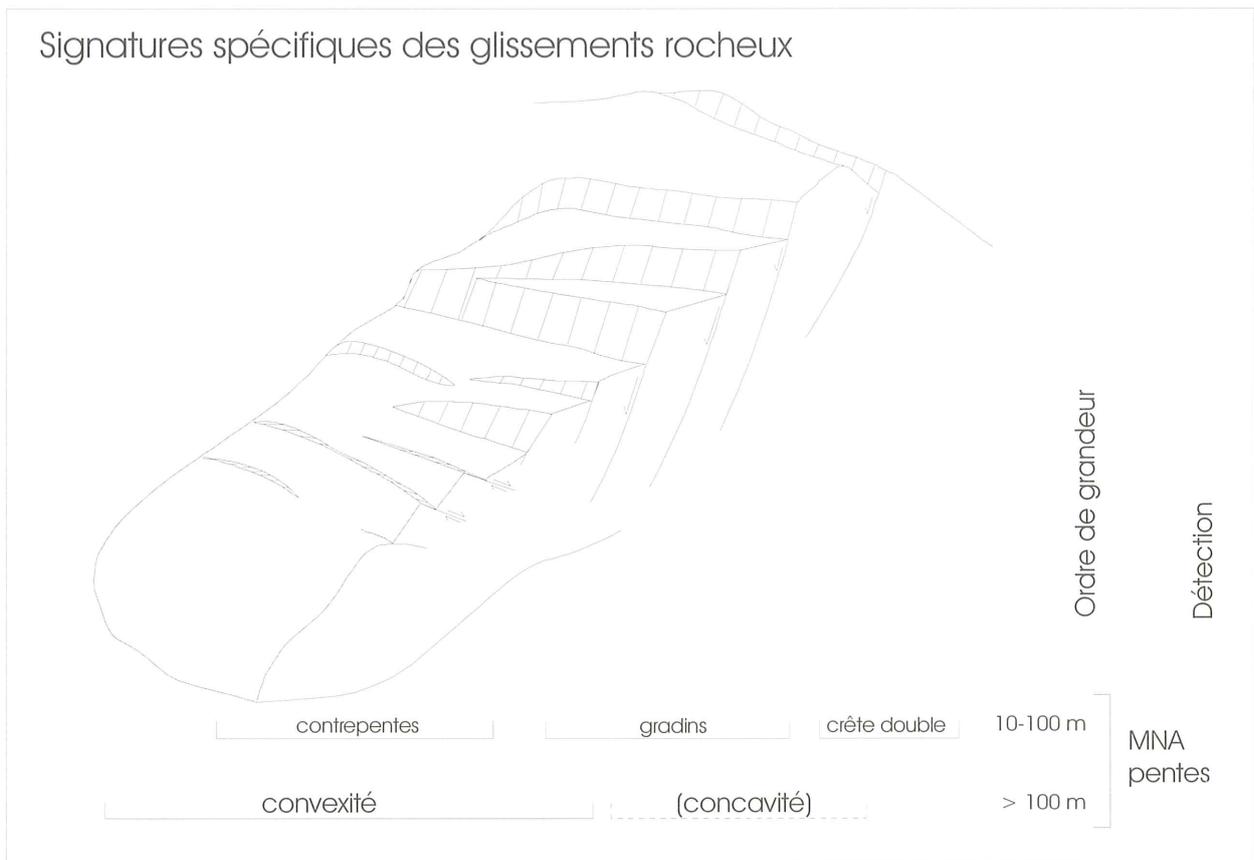


Fig. 3.2: Signatures spécifiques des glissements rocheux.

Sur les glissements de terrain, niches secondaires et bourrelets prennent des formes arquées et arrondies. Sur les glissements rocheux, ces formes prennent plutôt l'aspect de gradins et de replats étagés plus ou moins rectilignes (fig. 3.2 et 3.6)

Ces formes sont trop petites pour être visibles sur la carte au 1:25'000, mais elles sont parfois repérables à l'échelle 1:10'000. La mise en évidence peut se faire par photo-interprétation stéréoscopique, lever de terrain et analyse du modèle numérique d'altitude à haute résolution (dépendant de la base topographique utilisée).

Signatures de troisième ordre

Il s'agit de formes de petite taille, dues aux forces de tension, de compression ou de cisaillement (fig. 3.7). Elles sont directement liées au mouvement, et de ce fait ne se rencontrent que sur les glissements actifs. Elles sont très rapidement oblitérées en cas de stabilisation du mouvement. A ce titre, elles constituent un critère de différenciation entre mouvements actifs et mouvements latents.

- crevasses de tension en arrière de la niche d'arrachement (processus de recul de la niche),
- crevasses de tension au sein de la masse glissée,
- crevasses radiales en bordure de masse glissée,
- limites de cisaillement en bordure de masse glissée,
- plissement du terrain dans les zones de chevauchement et de compression.

On peut les déceler par levés de terrain et photointerprétation stéréoscopique, de préférence sur photos PIR.

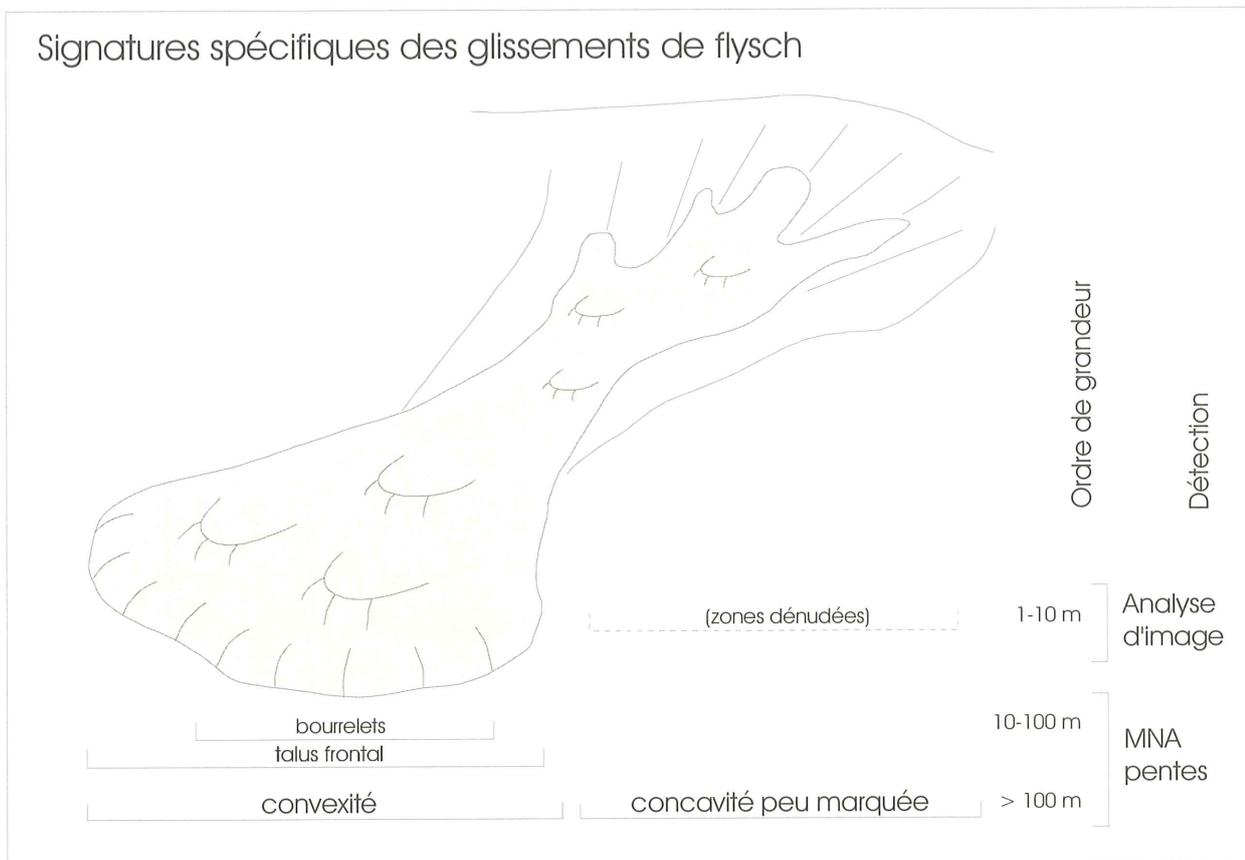


Fig. 3.3: Signatures spécifiques des glissements de flysch.

3.2.2 Signatures pédologiques et végétales

Le sol et la couverture végétale sont influencés, et souvent perturbés par les mouvements du terrain; il s'agit donc de signatures indirectes (fig. 3.8).

Couverture du sol:

- zones de sol nu dans les niches d'arrachement,
- zones de sol nu dans les zones affectées par des coulées boueuses.

Végétation:

- déchirures et discontinuités de la couverture végétale dans les zones de tension,
- arbres penchés,
- végétation buissonnante (saules et aulnes).

Etat d'humidité du sol:

- zones humides.

A noter qu'à cette échelle, d'autres phénomènes peuvent avoir des signatures semblables: en particulier les «pieds de vache» qui, bien qu'assimilables à un phénomène de fluage superficiel, ne peuvent être considérés comme un indice d'instabilité.

Ces signatures sont mises en évidence par interprétation de photos PIR et levers de terrain.

3.2.3 Signatures sur les infrastructures

Les mouvements de terrain peuvent affecter et déformer les aménagements anthropiques suivants (fig. 3.9):

Infrastructures linéaires:

- fissures dans les revêtements goudronnés,
- profil en long irrégulier, ondulé ou déprimé des routes et chemins,
- tracé sinueux,
- décalages dans les murs de soutènement.

Infrastructures ponctuelles:

- fissures dans les bâtiments,
- pylônes penchés,
- déplacement de points de triangulation.

Les levés de terrain et, dans une mesure limitée, la photo-interprétation peuvent être utilisés pour cartographier ces signatures.



Fig. 3.4: Signatures morphologiques et topographiques de premier ordre des glissements de terrain:
 A – Glissement rotationnel avec niche concave, basculement vers l'arrière de la surface topographique et convexité frontale (Communs de l'Hongrin, Ormont-Dessous VD).
 B – Convexité frontale (La Jorasse, Ormont-Dessous).



Fig. 3.5: Signatures topographiques de deuxième ordre des glissements de terrain:
 A – Glissement secondaire superposé (Rocher dessous, Ormont-Dessus).
 B – Niche d'arrachement secondaire et glissement superficiel (Rocher dessous, Ormont-Dessus).
 C – Topographie bosselée (Le Rachy-Dessous, Ormont-Dessus).



Fig. 3.6: Signatures spécifiques des glissements rocheux:

A – Replats étagés (Le Lavanchy, Ormont-Dessus).

B – Rides rocheuses parallèles avec contre-pentes (flanc N de la Chaux, Ormont-Dessus).

C – Contre-pentes sur écailles basculées vers l'avant (Pierres Pointes, Ormont-Dessus).

B – Crête double, partie glissée à gauche (La Chaux, Ormont-Dessus).

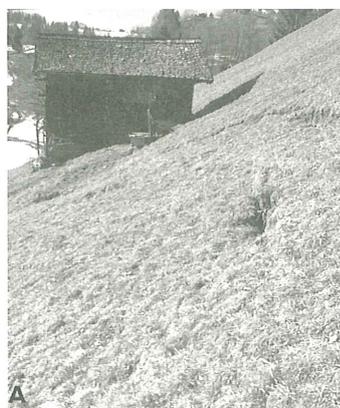


Fig. 3.7: Signatures topographiques de troisième ordre:

A – Crevasse de tension en arrière de la niche (Le Rosex, Ormont-Dessus).

B – Plissement de la couverture végétale dans la zone de cisaillement en bordure du glissement (glissement de tourbe de la Vraconnaz, Ste-Croix VD).

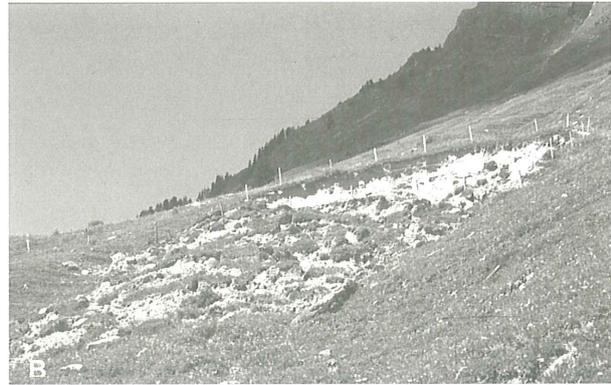
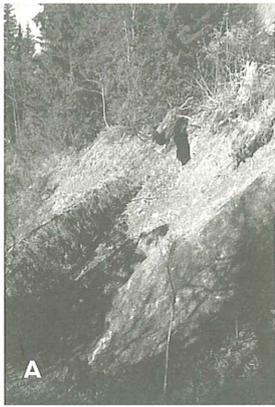


Fig. 3.8: Signatures pédologiques et végétales

A – Terrain nu dans niche d'arrachement active (Les Parchets, Ormont-Dessus).

B – Déchirure de la couverture végétale (La Repaz, Ormont-Dessus).

C – Limite de qualité de végétation entre masse glissée (à dr.) et sol sur gypse (à g.) (Les Parchets, Ormont-Dessus).

D – Végétation feuillue et buissonnante dans niche d'arrachement (Les Parchets, Ormont-Dessus).

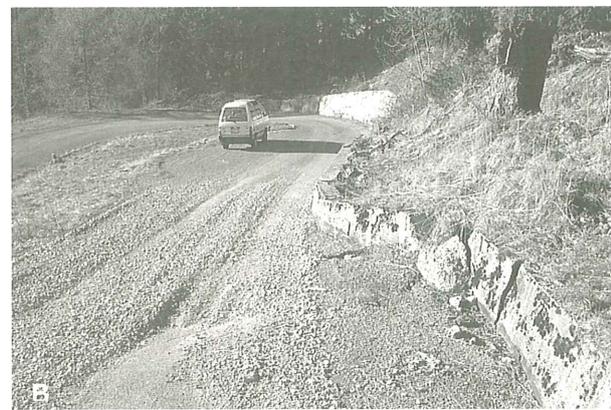


Fig. 3.9: Signatures sur les infrastructures

A – Ondulations et sinuosité de la route (La Frasse, Ormont-Dessous).

B – Déformation d'un mur de soutènement (La Badause, Ormont-Dessous).

4. L'IMAGERIE AÉRIENNE

L'imagerie aérienne est actuellement constituée par documents de sources, de nature, de contenus et de types divers; il est donc utile de préciser un certain nombre de notions permettant de les caractériser et de les structurer. L'imagerie aérienne considérée dans cette étude comprend l'ensemble des images collectées par télédétection, incluant aussi bien les photographies aéroportées que les images satellitaires. Nous distinguons particulièrement les images aériennes selon leur *nature*, leur *géométrie* et leur *contenu informatif*:

- *Nature des images*: la forme de représentation d'une image peut être *analogique* (documents papier, film) ou *numérique* (fichier informatique).
- *Géométrie de l'image*: elle est *brute* (projection originelle spécifique) ou encore *géoréférée* (orthorectification avec projection cartographique spécifiée).
- *Contenu informatif*: la richesse du contenu informatif d'une image se définit selon 3 dimensions:
 - *Résolution spatiale*: elle exprime l'échelle de représentation de l'image. Les photos aéroportées ont actuellement une résolution spatiale bien plus élevée que les images satellitaires.
 - *Résolution spectrale*: certaines images sont monospectrales (les photos aériennes panchromatiques), tandis que d'autres sont multispectrales (les photos couleurs et la plupart des images satellitaires). A cette notion s'ajoute celle des domaines spectraux mesurés (visible, proche et moyen infrarouge, micro-ondes). Elles rendent compte de propriétés spécifiques des objets au sol (photos couleur ou PIR).
 - *Résolution temporelle*: elle définit l'unicité (monotemporelle) ou la multiplicité (multitemporelle) des images saisies sur une même région. A cette notion s'ajoutent celles de la fréquence de la prise de vue et de la période de temps couverte.

On observe souvent une complémentarité de contenu informatif entre les photos aéroportées et les images satellitaires.

4.1 Contenu informationnel et signatures

L'emploi de l'imagerie aérienne implique bien sûr que le phénomène de glissement ait une *signature* dans le domaine spectral considéré (en l'occurrence le visible et le proche-infrarouge), et à une échelle n'échappant pas à la résolution des images (BONN & ROCHON 1992, TERRETTAZ 1998). Théoriquement, toute la gamme des signatures décrites plus haut est utilisable. Dans la pratique toutefois, l'éventail des formes identifiables est limité par la taille, la résolution et le type d'images utilisées. Dans l'analyse numérique en particulier, il y a une dépendance entre la résolution de l'image et la taille des signatures identifiables. En interprétation analogique, la souplesse de l'oeil et du cerveau humain permettent d'utiliser une gamme plus large. Il faut par ailleurs tenir compte des confusions possibles avec des signatures semblables d'autre origine.

Les images aériennes fournissent quatre types principaux d'information:

- Les *signatures spectrales*: elles résultent d'une différence de luminance soit dans l'ensemble du spectre (fort contraste), soit dans les bandes spectrales analysées (variation de couleur). Ces variations sont liées à la nature et à l'état du sol et du couvert végétal: elles sont indépendantes de l'éclairage (et donc de l'heure et de l'angle de prise de vue), mais peuvent être très dépendantes de la saison si elles sont liées à la végétation.

Exemples:

- zones d'arrachement et de dénudation, caractérisées par une luminance assez forte entourée en général de végétation plus sombre. Elles ne sont pas toujours présentes, et elles peuvent être confondues avec d'autres cibles réfléchives telles que rochers en place, ravinements, zones construites, parkings ou chantiers.
- zones humides, caractérisées par des différences de teintes surtout dans le PIR. Ces zones, bien que très fréquentes sur les glissements, se rencontrent également très largement en dehors.
- Les *signatures texturales*: elles résultent essentiellement de différences d'éclairage et d'effets d'ombrage dus au méso- et micro-relief. Ces variations de tons sont directement dépendantes de l'angle d'éclairage (et donc de l'heure et de l'angle de prise de vue), mais relativement indépendantes de la saison. Ces signatures texturales correspondent surtout aux signatures topographiques de deuxième et troisième ordre (voir 3.2.1).

Exemples:

- arcs de déchirure et crevasses de tension, marqués par des linéaments nets. Peuvent être confondus avec les «pieds de vache» ou des sentiers.
- bourrelets, talus basal, niche secondaire, marqués par une zone ombrée à contour progressif. Peuvent être confondus avec d'autres méso-reliefs tels que bord de terrasse, relief structural, etc. La forme arquée et l'orientation perpendiculaire à la pente sont alors un critère de différenciation.
- L'*information stéréoscopique tridimensionnelle*: elle permet, par l'analyse de couples stéréoscopiques, l'interprétation simultanée du couvert de surface et de la topographie. Elle est surtout adaptée à l'identification des signatures topographiques de premier et de second ordre.
- L'*information multitemporelle*: si l'on dispose d'une séquence d'au moins deux images de la même région, prises à un intervalle de temps suffisant (celui-ci dépend de la vitesse du glissement!), leur comparaison peut révéler les mouvements qui se sont produits. Cette *signature multitemporelle* ne peut être exploitée valablement que si les images ont été géoréférencées aussi parfaitement que possible. Deux approches principales sont utilisées:
 - Modifications de relief: ce sont les déplacements verticaux, abaissements/surélévations, qui sont interprétés comme indices de déplacements de masse. Cette approche implique une analyse photogrammétrique de haute précision.
 - Différences entre images successives, en particulier les déplacements horizontaux: tout repère identifiable sur les deux images peut être utilisé (maisons, chemins, limites de forêts nettes ou cours d'eau), quelles que soient sa nature

et son origine, pour autant que les modifications intervenues puissent être attribuées au mouvement de terrain à l'exclusion de tout autre processus.

4.2 Photos aériennes analogiques

La photo-interprétation analogique d'images aériennes fait partie des méthodes classiques de la cartographie des glissements et de la géomorphologie en général. C'est en général l'effet stéréoscopique obtenu par des couples de photos qui est exploité, en vue d'identifier des formes de terrain caractéristiques (voir plus haut sous «signatures topographiques»).

Les photos PIR en fausses couleurs apportent une information spectrale additionnelle, alliée en général à une échelle plus grande, et facilitent l'identification de signatures de petite taille.

Dans les procédures SIRS, la photo-interprétation reste en général une étape analogique, dont le résultat est ensuite numérisé et intégré au SIRS. Contrairement à l'imagerie satellitaire, la photo-interprétation est utilisée systématiquement pour l'élaboration de cartes d'inventaire de glissements, mais ne trouve pratiquement aucune application dans les cartes de susceptibilité au glissement.

Dans l'analyse multitemporelle par contre, la comparaison photogrammétrique de photos aériennes est une des méthodes classiques de reconstitution et de suivi des mouvements (KÖLBL & STUBY 1982, DUTI 1985, 1986, NOVERRAZ et al. 1998). Des méthodes de photogrammétrie numérique semi-automatique ont été développées, comme alternative à la photogrammétrie classique (SCANVIC 1994, ASTÉ & GIRAULT 1995, POWERS et al. 1996).

4.3 L'imagerie aérienne numérique

Nous avons reporté dans le tableau 4.1 les divers types d'images aériennes, considérées comme un sous-ensemble des documents numériques pouvant résider dans un SIRS. Celles marquées d'un astérisque (colonne «Type») ont fait l'objet d'un examen dans le cadre des études-pilotes d'Adelboden (SUTER et al. 1997) et du Hohberg (JAQUET et al. 1998), dont les résultats sont présentés plus loin.

Classiquement, on assimile l'imagerie numérique avant tout aux *données satellitaires*; en fait elle caractérise la nature des images. Nous distinguerons donc les *images numériques aéroportées*, qui sont souvent le produit du scannage de photographies analogiques, des images satellitaires qui elles sont généralement produites directement sous une forme numérique par balayage. L'imagerie satellitaire n'a été que peu utilisée dans la cartographie des mouvements de terrain, ce qui s'explique par deux raisons essentielles:

- la résolution spatiale de la plupart des images satellitaires est insuffisante pour permettre la détection valable des mouvements de terrain: selon MANTOVANI et al. (1996), la taille minimale des formes détectables par imagerie Landsat (résolution de 30 m) est de l'ordre de 300–1200 m, selon le degré de contraste, alors que pour les images SPOT (résolution de 20 m) elle est de l'ordre de 200–800 m. Cela est insuffisant au vu de la dimension habituelle des formes à identifier.

- les possibilités les plus intéressantes de l'imagerie satellitaire (Landsat et SPOT notamment) résident dans l'analyse multispectrale: or dans nos régions densément peuplées, la mosaïque de la végétation et de l'occupation du sol domine largement les éventuelles signatures spectrales des mouvements de terrain, rendant celles-ci indécélables.

L'imagerie radar, plus récente, semble a priori offrir de meilleures possibilités, grâce à sa résolution plus fine, sa sensibilité à la rugosité du terrain et à sa capacité tous-temps. Elle pose par contre de très sérieux problèmes d'interférences avec la topographie (SUTER et al. 1997).

Tabl. 4.1: Caractéristiques des données géoréférees sur le territoire disponibles en Suisse.

Catégorie	Type	Echelle	Dès: Images par année:	Analog. ou Num.	Raster ou Vecteur	Résolution (m)	Remarques
Photos aériennes	Stéréophotos N/B (OFT) *	1:20'000	1969 ¹ 1	A	R	variable	A scanner et géoréférer Couverture totale de la Suisse renouvelée tous les 6 ans depuis environ une trentaine d'année
	Orthophotos couleur SAir		1995 1	A/N	R	0,75	Couverture totale de la Suisse
	Orthophotos PIR *		1996 ¹ 1	A/N	R	0,25	Couverture zones forestières
	Photos «manuelles»	variable	— variable	A	R	variable	A scanner et géoréférer
Imagerie satellitaire	IRS Pan IRS LISS	—	1996 1-2 ²	N	R	5,8 23,5	A géoréférer
	SPOT P SPOT XS	—	1986 2-3 ²	N	R	10 20	A géoréférer
	LANDSAT TM *	—	1972 1-2 ²	N	R	30	A géoréférer
	ERS-1/2 *	—	1991 1-2 ²	N	R	10	Artéfacts topographiques
Documents topograph.	Carte-pixel	1:25'000	—	N	R	1,25	Sous-couches par couleur de la carte (noir, vert, brun, bleu)
	Plan d'ensemble*	1:5000	—	A/N	R/V	0,40	
	MNT-25	1:25'000	—	N	R	25	Artéfacts d'interpolation
Documents géologiques	Géotechnique simplifiée	1:200'000	—	A/N	V	—	Disponible par GEOSTAT (Office fédéral de la statistique)
	Atlas Géologique	1:25'000	—	N	V	—	En préparation pour les futures feuilles de l'Atlas
	Cartes géologi- ques scannées	1:25'000 1:10'000	—	A/N	R	variable	

¹ Date considérée pour la zone-test du Hohberg. La couverture aérienne stéréoscopique de la Suisse débute vers 1960.

² Nombre d'images réellement disponibles compte tenu de la fréquence nominale de passage et de la couverture nuageuse.

* Utilisé dans le projet.

De ce fait, l'imagerie satellitaire ne trouve pratiquement aucune application dans l'élaboration des cartes d'inventaire de glissements. Elle est par contre intégrée assez souvent dans les procédures SIRS d'établissement de cartes de susceptibilité au glis-

sement, où elle sert à cartographier des facteurs tels que l'occupation du sol et la végétation.

Les résultats présentés dans ce rapport confirment, d'une part, l'inadéquation de l'imagerie satellitaire multispectrale pour l'identification des mouvements de terrain et, d'autre part, les difficultés liées à l'imagerie radar.

La catégorie «photos aériennes» du tableau 4.1 représente des documents acquis originellement sur un support analogique (film noir/blanc, PIR ou couleur), subséquentement numérisés par scannage et finalement redressés. Les images ainsi obtenues ont des résolutions variant entre 0,25 et 0,75 m. A titre d'exemple, dans l'étude Hohberg, les orthophotos PIR nous ont été fournies sous forme numérique, alors que nous avons réalisé le scannage et l'orthorectification des stéréophotos noir/blanc.

Hormis les orthophotos PIR et l'imagerie radar ERS1/2 (déjà référées), toutes les autres images considérées ont dû être géoréférées sur le référentiel topographique suisse et ce, à des précisions dépendant de la résolution. Ainsi, cette opération n'a-t-elle pas présenté de difficultés majeures pour l'imagerie Landsat, alors qu'elle a été beaucoup plus délicate pour les stéréophotos utilisées en mode diachronique, à cause de l'exigence de précision élevée. On verra aussi que la géo-correction appliquée à l'imagerie radar introduit, sur certains versants, des artéfacts très dommageables pour l'interprétation.

4.4 Critères de choix

Sur la base de ce qui précède, l'utilisation des images numériques pour l'identification des glissements va dépendre des critères suivants:

- Adéquation entre la résolution des images et la signature spectro-spatiale des phénomènes: si l'échelle spatiale d'un glissement est inférieure, égale ou à peine supérieure à la résolution de l'image, celle-ci ne pourra pas être utilisée.
- Précision de la géoréférence (dans le cas d'une analyse diachronique): l'erreur de géoréférence doit être inférieure à la magnitude des mouvements de terrain ayant eu lieu entre les deux prises de vue .
- Disponibilité et coût: une image disponible et répondant aux deux premiers critères pourra plus facilement être utilisée dans un projet que celle qui devrait être acquise spécialement.

Les projets-pilotes déjà réalisés nous ont permis de tirer un certain nombre de conclusions sur le potentiel des types d'images listées dans le tableau 4.1. Elles sont résumées dans le chapitre 5.

4.5 Le cadre des SIRS

Dans le domaine de la *cartographie des mouvements de terrain*, les techniques numériques d'analyse d'image sont toujours intégrées au sein d'un SIRS, dont elles ne constituent qu'une des étapes. Dans celui des *inventaires de glissements*, les SIRS sont utilisés avant tout pour archiver, organiser et visualiser les données cartographiques obtenues par des méthodes analogiques de stéréophoto-interprétation ou de lever de terrain. Une nouvelle méthode d'interprétation du relief, basée sur l'analyse automatique des courbes de niveau vectorisées, est actuellement développée par l'EPFL, et

visée à reproduire l'analyse cartographique visuelle classique (FREITAG & NOVERRAZ 2000).

Le potentiel d'analyse spatiale des SIRS est pleinement utilisé dans le domaine de *la cartographie de susceptibilité au glissement*. On distingue plusieurs types d'approches (VAN WESTEN 1993), en particulier:

- *L'analyse qualitative*: la carte de susceptibilité est produite par la combinaison de différentes cartes de facteurs (le plus souvent: pente, orientation, végétation, occupation du sol, etc.), ceux-ci étant pondérés et classifiés en fonction de modèles et de seuils définis par l'analyste (WAGNER et al. 1988, KINGSBURY et al. 1991, WAGNER 1992, MANI & GERBER 1992). L'imagerie satellitaire est souvent utilisée pour produire la carte de végétation et celle de l'occupation du sol (KASA et al. 1991, SHU-QUIANG & UNWIN 1992, SCANVIC 1994, FUJITA et al. 1996).
- *L'analyse statistique*: la carte de susceptibilité est produite par la combinaison de différents facteurs, mais les seuils et la pondération de ceux-ci sont déterminés par analyse statistique sur un échantillon de glissements connus (CARRARA 1983, CARRARA et al. 1995, 1998, IRIGARAY et al. 1996, ATKINSON & MASSARI 1998). L'utilisation de l'imagerie satellitaire est la même que précédemment, mais ces méthodes nécessitent en outre une carte d'inventaire des glissements sur une partie du territoire, qui peut être produite par photo-interprétation.
- *L'analyse déterministe*: se base sur des lois physiques et intègre un module de calcul de stabilité de versant. Les divers niveaux d'information du SIRS servent de paramètres d'entrée au calcul: pente, classe géotechnique du sol, conditions hydrogéologiques. Le résultat est exprimé en terme de facteur de sécurité (BRAND 1988, LIENER et al. 1996a, 1996b). Dans ce type d'approche, l'analyse d'image ne joue pratiquement aucun rôle.

Dans toutes ces méthodes, le MNA (modèle numérique d'altitude) a une grande importance. Il est à la base d'informations topographiques et morphologiques dérivées telles que les pentes, leur orientation, les formes du relief, etc. Certaines approches utilisent une analyse très poussée du relief, sur la base de MNA à haute résolution et en utilisant un découpage en unités de relief (PIKE 1988, CARRARA 1983, McDERMID & FRANKLIN 1994, ROWBOTHAM & DUDYCHA 1998). La qualité du MNA est donc déterminante, et elle peut varier considérablement selon la démarche de construction de celui-ci.

5. LE PROJET TÉLÉDÉTECTION DU SHGN

Le projet a débuté en 1997 et a comporté deux phases principales. L'évaluation du potentiel informatif des images aériennes dans la problématique des glissements s'est d'abord faite selon une démarche logique au moyen des deux études-pilotes «Adelboden» et «Hohberg»:

- Partant de l'existence d'une cartographie complète des phénomènes et des dangers sur le territoire de la feuille topographique d'Adelboden (BE) au 1:25'000 (BOLLINGER & NOVERRAZ 1996), nous avons tout d'abord travaillé sur des images radar ERS1/2-GTC puis, accessoirement, sur une scène Landsat-TM. Les manipulations et analyses ont été faites au sein d'un SIRS.
- Sur la base des conclusions tirées de ce premier travail (SUTER et al. 1997), nous avons repris, cette fois dans une région plus restreinte (Hohberg, FR), une image Landsat-TM, puis sommes passés à l'exploitation des orthophotos PIR à haute résolution au moyen d'une analyse texturale. Une ébauche de méthodologie semi-automatisée a pu alors être esquissée (JAQUET et al. 1998).

Le mandat principal avait pour but de reprendre et de synthétiser ces résultats, et de présenter une procédure d'exploitation de l'imagerie numérique. Celle-ci est conçue pour s'insérer aussi bien que possible dans la méthodologie générale de cartographie et de suivi des mouvements de terrain élaborée par le SHGN. Elle comporte deux volets:

- un volet unitemporel, qui s'insère dans la procédure préliminaire d'identification des mouvements de terrain, comme un complément à l'analyse analogique des documents.
- un volet multitemporel, qui s'insère dans les procédures d'évaluation du degré d'activité et de suivi des mouvements de terrain.

5.1. Résultats de l'étude-pilote «Adelboden»

Cette étude s'était fixé comme but d'évaluer le potentiel de l'imagerie radar pour la surveillance des mouvements de terrain, sur la base d'une analyse comparative d'images ERS et de levés cartographiques dans la région-test d'Adelboden (SUTER et al. 1997).

Gardant à l'esprit le cadre temporel et spatial limité de cette étude, nous avons pu tirer les *conclusions spécifiques* suivantes:

- Pour des raisons techniques (angle de vue), logistiques (relative proximité des fournisseurs) et budgétaires, ce sont les données des satellites radar *ERS1-2* qui ont été testées dans cette étude.
- En dépit des capacités «tous temps» des satellites radar, la disponibilité d'images utilisables sur les Alpes s'est révélée limitée (deux couples d'orbites en été sur six ans). En outre, les processus de commande et d'achat sont longues, et «aveugles» (un aperçu des données n'est possible qu'au moment de leur réception, les «quicklooks» ou imagettes n'étant pas disponibles pour chaque scène).
- Pour être utilisables dans un contexte montagneux, les données radar (*ERS*) doivent être corrigées géométriquement à l'aide d'un modèle numérique

d'altitude. De telles données sont fournies par Eurimage comme «*Terrain Geocoded Image*» (GTC) pour CHF 1850.–.

- La procédure de correction à l'origine des images GTC tente de rétablir la géométrie des versants affectés de «*foreshortening*». Ce faisant, elle crée sur ceux-ci de sévères artéfacts (en «spaghetti», fig. 5.1). Pour une région donnée, il faut donc, après analyse de l'orientation des pentes, combiner par masquage et segmentation deux images: une en orbite ascendante et une en orbite descendante (= CHF 3700.–).
- Avec les orbites actuelles d'ERS, les versants orientés au sud ne peuvent pas être débarrassés des artéfacts.
- Les glissements de terrain de la région d'Adelboden n'ont pas révélé de signature unitemporelle ni dans le domaine radar (texturale), ni dans le domaine visible/proche-infrarouge (spectrale, images Landsat TM).
- La composite multitemporelle en trois couleurs, combinant les images prises en 1991, 1995 et leur moyenne n'a pas permis d'identifier de manière univoque les zones de glissements.
- En revanche, l'*indice de contraste temporel directionnel* calculé entre les deux images prises en 1991 et 1995 a montré (fig. 5.2), au sein du glissement de Hirzboden, la présence de linéaments en forme de lunules. Ils pourraient, sous réserve de confirmation, représenter une signature des zones en mouvement.

En guise de *conclusion générale*, on se doit de relever que les données fournies par les radars satellitaires souffrent d'une trop grande dépendance par rapport à la topographie, ce qui non seulement rend impossible l'acquisition de données de qualité pour certains flancs de montagne, mais introduit également une grande quantité de bruit dans les images. En ce qui concerne la potentialité propre de l'imagerie radar, cette dernière offre certainement la possibilité de déceler des indices de mouvements de terrain, mais il est clair qu'elle ne peut constituer un outil cartographique, étant limitée par l'occupation du sol (pas ou peu de pénétration dans la végétation) et sensible à de nombreux paramètres interférant entre eux (humidité, rugosité, etc.). Il est donc imaginable que la télédétection radar puisse constituer un moyen de surveillance complémentaire à d'autres avec, comme condition, de pouvoir surmonter évidemment les problèmes de sensibilité à la topographie.

Quant à nos *recommandations* en vue soit d'étayer ou de compléter ces résultats préliminaires, soit de préparer un concept de surveillance des aléas de glissement, elles étaient les suivantes:

- Vérifier sur le terrain l'expression géomorphologique des linéaments en lunules.
- Appliquer la méthodologie présentée ici à d'autres types de glissements, en particulier à ceux qui provoqueraient une transformation de la couverture du sol (dénuudation) et à d'autres conditions topographiques (sur le Plateau molassique, par exemple).

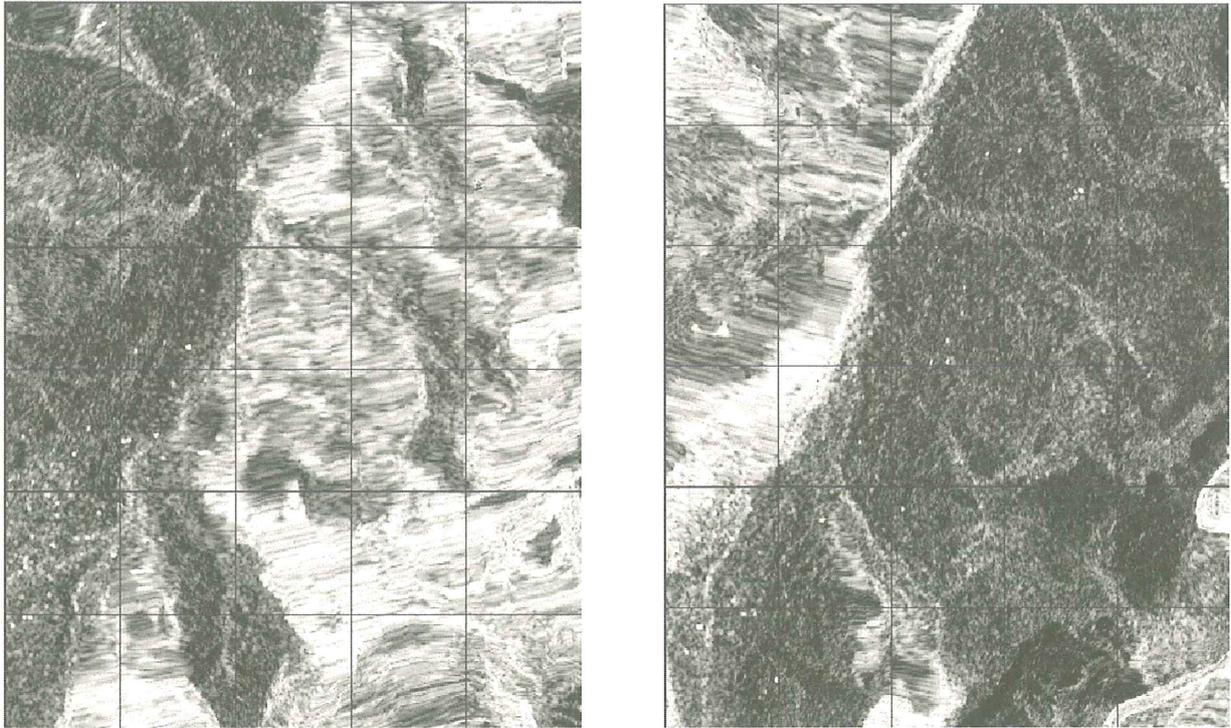


Fig. 5.1: Images radar ERS-1 GTC du 2. 8. 1991, région d'Adelboden. A: orbite ascendante. B: orbite descendante (SUTER et al. 1997).

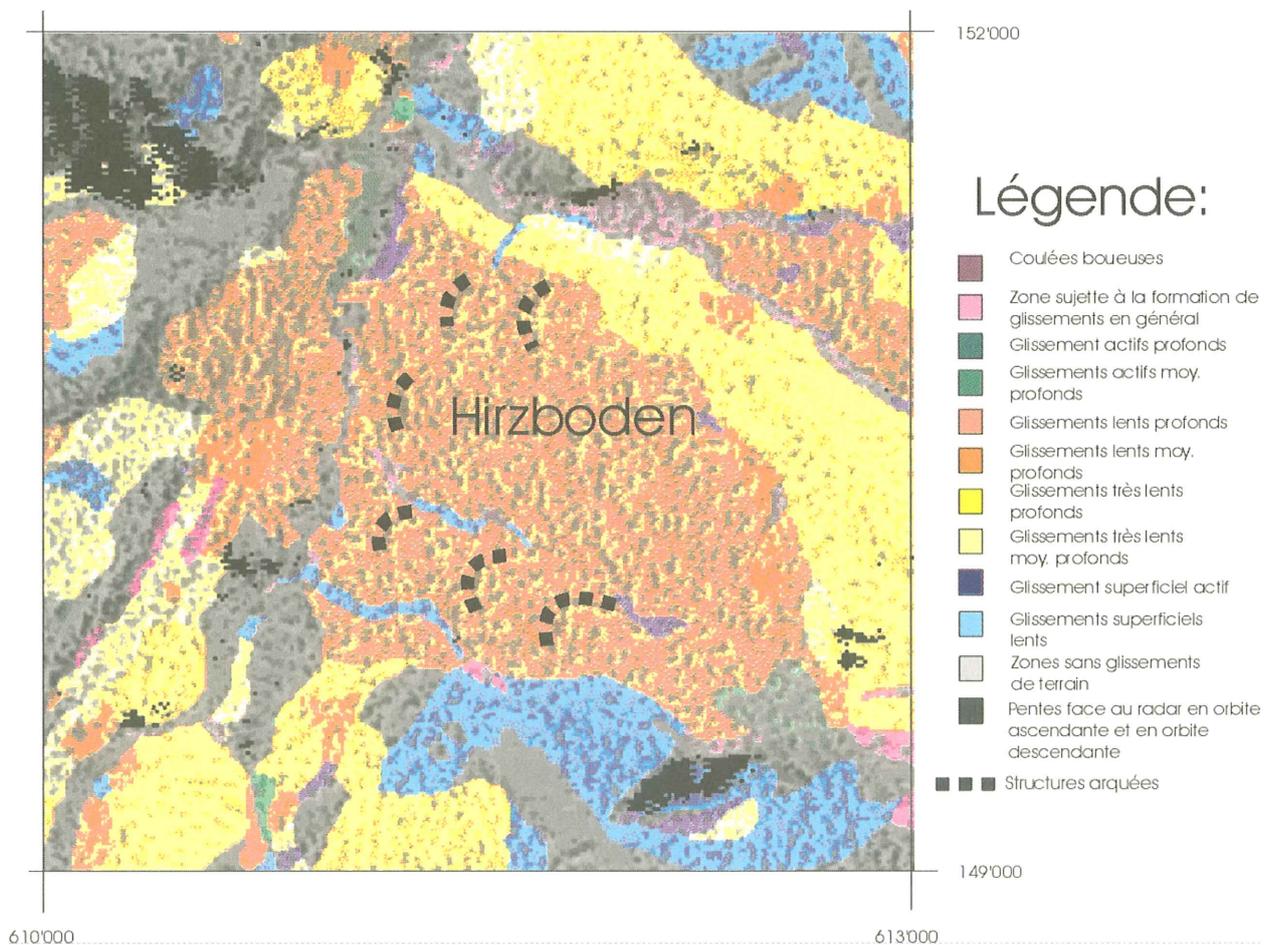


Fig. 5.2: Résultats de l'analyse multitemporelle différentielle drapée sur la carte des phénomènes, zone de Hirzboden (Fig. 10, SUTER et al. 1997).

- Explorer les possibilités du radar aéroporté. Ces systèmes, à résolution spatiale nettement meilleure que celle des radars satellitaires, pourraient fournir un moyen de minimiser les artéfacts topographiques, puisqu'il est possible d'en contrôler les angles d'incidence, la longueur d'onde et la trajectoire.
- L'imagerie visible/PIR, mise à l'écart dans un premier temps à cause de sa dépendance par rapport aux conditions météorologiques (opacité des nuages), constitue également une possibilité d'observation multitemporelle non négligeable, qu'elle soit aéroportée (orthophotos) ou satellitaire (*Landsat*, *SPOT*, *IRS*, *Priroda-MOMS*), car il lui reste l'avantage important d'être un système multi-bandes. Ce type d'acquisition de données bénéficie de sa plus grande ancienneté, ce qui lui confère certains avantages (logiciels développés, simplicité relative des principes, nombreux spécialistes).
- A l'heure actuelle et dans le contexte alpin ou préalpin de la majorité des glissements de terrain, les images radar ne sont pas exploitables pour la détection et la cartographie des terrains instables. Il ne faut pas mettre de côté la perspective à moyen terme de l'exploitation des radars satellitaires dans les buts que s'étaient fixés cette étude. Ces systèmes connaissent une évolution rapide et ils souffrent encore de leur immaturité, en particulier dans le domaine des applications en zone de fort relief. Des projets de satellites radars multi-bandes existent déjà et ils fourniront certainement un moyen d'analyse dont la puissance sera nettement supérieure aux systèmes actuels. De plus, on peut s'attendre à l'amélioration et l'adaptation des outils de correction et traitement des données, opérations incontournables dans le domaine du radar. Finalement, il conviendrait d'explorer les possibilités d'application aux glissements des techniques, plus sophistiquées, d'interférométrie radar.

5.2. Résultats de l'étude-pilote «Hohberg»

Parmi les conclusions et recommandations de la première étude-pilote, nous avons retenu le recours à *l'imagerie visible haute résolution* (photos aériennes panchromatiques et PIR) que nous avons ensuite testée sur la zone du Hohberg (FR), toujours dans le cadre désormais accepté d'un SIRS (Jaquet et al. 1998).

Au terme de ces deux travaux, nous avons ainsi exploré le potentiel d'un large échantillon de l'imagerie aérienne disponible. Il en ressort que *les données satellitaires de Landsat, SPOT et ERS ne sont actuellement pas une source adéquate d'information sur les mouvements de terrain dans le contexte helvétique* pour des raisons d'échelle des phénomènes et d'absence de signatures spectrales claires, ou encore d'artéfacts topographiques.

En revanche, les photographies aériennes panchromatiques ou PIR se sont révélées mieux adaptées à l'extraction d'informations pertinentes sur les mouvements de terrain. Nous nous sommes donc focalisés sur cette source d'information, dont nous présentons une procédure d'exploitation détaillée. Celle-ci reprend et amplifie celle que nous avons esquissée dans l'étude-pilote Hohberg.

PARTIE 2 – PROCÉDURE D'EXPLOITATION DES ORTHOPHOTOS NUMÉRIQUES

La démarche que nous avons expérimentée se subdivise en trois phases:

- Transformation de l'imagerie aérienne analogique (stéréophotos) en orthophotos numériques.
- Extraction de l'information diagnostique des mouvements de terrain par interprétation des signatures texturales fournies par les orthophotos.
- Analyse diachronique des mouvements par comparaison d'orthophotos prises à des dates différentes (signatures multi-temporelles).

Nous présenterons enfin quelques considérations sur la mise en oeuvre pratique de la méthodologie.

6. RECTIFICATION DES STÉRÉOPHOTOS OFT

Parmi les documents utilisés, les photos PIR ont été livrées sous formes d'orthophotos numériques par l'ICF (Inspection Cantonale des Forêts FR), ce qui n'a pas rendu nécessaires les étapes de numérisation et de rectification.

Les stéréophotos panchromatiques de l'OFT, par contre, ne sont pas utilisables directement, car elles sont disponibles à l'origine sous forme analogique et non géoréférée. Leur transformation en orthophotos a été réalisée selon la procédure présentée ci-après (voir aussi fig. 7.1, étape 1).

6.1 Eléments

Les éléments intervenant dans le processus de réalisation d'une orthophoto sont les suivants:

- Le logiciel de création d'orthophoto: c'est le module *OrthoEngine* de PCI version 6.3 qui a été utilisé pour ces expérimentations.
- Les documents photographiques: ce sont les tirages sur film des photographies aériennes panchromatiques disponibles auprès de l'OFT. Il a été décidé de produire des documents relatifs à trois dates différentes; nous disposons donc des copies film de photos aériennes de la région datant de 1969, de 1981 et de 1997. Le choix de copies sur film plutôt que de tirages sur papier se justifie par le fait qu'elles offrent une qualité de numérisation supérieure.
- Les paramètres d'orientation interne: ils définissent les caractéristiques de la prise de vue photographique et sont habituellement indiqués dans le certificat de calibration de la caméra de prise de vue. Ce certificat n'étant pas disponible pour la photo de 1969, des valeurs standards ont été assignées à ces paramètres.
- Les paramètres d'orientation externe: ils définissent la relation entre la position des objets sur le plan de la photo et celle sur le terrain. Ces paramètres sont déterminés sur la base d'un certain nombre de points de calage (amers) dont on connaît la localisation sur le terrain (coordonnées x, y et z) et que l'on peut repérer et localiser sur le document photographique.
- Le modèle numérique d'altitude (MNA): il intervient lors du processus de construction (rééchantillonnage) de l'orthophoto numérique en fournissant l'informa-

tion altitudinale de chacun des pixels de l'image à constituer. C'est le modèle numérique d'altitude MNT25 de l'OFT qui a été choisi pour cette évaluation, car c'est celui disponible pour l'ensemble du territoire suisse à une résolution de 25 mètres.

Dans le cadre de cette étude, deux variantes de la démarche d'orthorectification ont été établies et évaluées: l'une «légère» utilisant un équipement informatique bureautique et l'autre «élaborée» faisant appel à un équipement plus spécialisé. La variante «légère» est basée sur l'emploi de points de contrôle (amers) extraits du plan d'ensemble (1:5000) et fait appel à un scanner de bureau pour la numérisation des photos. La variante «élaborée» requiert la mesure des amers sur le terrain par une instrumentation GPS, ainsi qu'une numérisation plus fine des photos à l'aide d'un scanner à haute résolution. La comparaison des résultats de ces deux démarches permettra ainsi de choisir la variante optimale, adaptée au type d'exploitation souhaité.

Tabl. 6.1: Caractéristiques des éléments du processus d'orthorectification mis en œuvre dans les deux démarches

Eléments mis en oeuvre	Variante «légère»	Variante «élaborée»
<i>Logiciel</i>	OrthoEngine de PCI version 6.3	OrthoEngine de PCI version 6.3
<i>Photos aériennes</i>	Panchro de l'OFT: – 05 7734: 14.7.1969, 13h03 – 17 8167: 29.7.1981, 10h35 – 168 2797(+98): 16.7.1997, 9h57	Panchro de l'OFT: – 05 7734: 14.7.1969, 13h03 – 17 8167: 29.7.1981, 10h35 – 17 8167: 29.7.1981, 10h35
<i>Paramètres d'orientation interne</i>	Certificat de calibration: 81, 97 Valeurs standards: 69	Certificat de calibration: 81, 97 Valeurs standards: 69
<i>Amers</i>	Sites localisés sur le plan d'ensemble numérique au 1:5000 (résolution du scannage 300 dpi, 0,423 m)	Mesures GPS de sites identifiables sur les photos
<i>MNA</i>	MNT25 de l'OFT: MM0626 (maille 25 m) Assemblage de portions des feuilles 1206 (Guggisberg) et 1226 (Boltigen)	MNT25 de l'OFT: MM0626 (maille 25 m) Assemblage de portions des feuilles 1206 (Guggisberg) et 1226 (Boltigen)
<i>Numérisation des photos aériennes</i>	Scanner A3 de bureau Epson 1200GT Résolution 800 dpi (32 µm)	Scanner de précision HELAVA DSW200 Résolution 1280 dpi (20 µm)
<i>Identification et localisation des amers</i>	Plan d'ensemble numérique (1:5000): – 1969: 16 amers – 1981: 19 amers – 1997: 26 amers	Mesures GPS de terrain: – 1969: 8 amers – 1981: 11 amers – 1997: 27 amers
<i>Construction des orthophotos numériques</i>	Précision du modèle d'orthorestitution: – 1969: 1,19 m en X et 1,29 m en Y – 1981: 1,28 m en X et 1,10 m en Y – 1997: 1,26 m en X et 1,19 m en Y Précision globale de l'orthophoto: – 1969: 1,93 m – 1981: 2,10 m – 1997: 2,12 m	Précision du modèle d'orthorestitution: – 1969: 0,34 m en X et 0,22 m en Y – 1981: 0,36 m en X et 0,30 m en Y – 1997: 0,20 m en X et 0,29 m en Y Précision globale de l'orthophoto: – 1969: 1,79 m – 1981: 1,60 m – 1997: 1,50 m

Les étapes de réalisation d'une orthophoto par ces deux démarches sont semblables et les éléments mis en œuvre sont résumés dans le tableau 6.1. Ces étapes sont les suivantes:

- Choix des documents de base: photos aériennes, paramètres internes, amers, MNA.
- Numérisation des photos aériennes.
- Identification et localisation des amers.
- Orthorectification (construction des orthophotos numériques).

Dans les sections suivantes nous présentons les éléments d'évaluation de la qualité des documents et des procédures de ces deux démarches d'orthorectification.

6.2 Variante «légère» avec configuration bureautique

6.2.1 Documents de base

- *Photos aériennes (tirage film)*: Aux trois dates choisies, 1969, 1981 et 1997, ces photos n'ont pas été réalisées à des hauteurs de vol, ni avec des chambres photographiques semblables. Il en résulte des différences d'échelle, bien que toutes couvrent largement notre zone d'intérêt située à l'aval d'une ligne entre l'Aettenberg et le Hohmattli. L'échelle de la photo de 1969 est d'environ 1:23'200, celle de la photo de 1981 est d'environ 1:23'450 et celle de la paire de photos de 1997 est d'environ 1:27'600. Pour cette dernière date, nous avons choisi une paire stéréoscopique. L'ensemble des photos retenues a été collecté durant le mois de juillet (cf. tabl. 6.1), ce qui permet de réduire l'influence des effets saisonniers dans l'analyse diachronique. Il faut cependant relever des différences d'ombrage importantes liées à l'heure et à la date de prise de vue; la photo de 1981 notamment contient des effets d'ombre portée beaucoup plus marqués que dans les autres photos. Finalement, relevons que le contraste du tirage film de la photo de 1969 est beaucoup plus faible que celui relatif aux autres dates; ceci affectera quelque peu la mise en évidence de variations locales aussi bien que l'analyse diachronique de cette photo avec celle des autres clichés.
- *Paramètres internes des photos*: Seules les photos datant de 1981 et 1997 étaient accompagnées de leur certificat de calibration dans lequel figurent les valeurs de ces paramètres de prise de vue. Pour la photo aérienne de 1969, il a fallu assigner des valeurs par défaut sur la base de celles des photos postérieures.
- *Plan d'ensemble numérique (1:5000)*: Ce plan d'ensemble numérique a été obtenu auprès du Service cantonal du cadastre sous la forme d'un fichier au format TIFF compressé (1,7 Mb). Il a été numérisé à une résolution de 300 dpi, produisant des pixels de 0,423 m de côté. Un contrôle de la précision géométrique de ce document au niveau des points de triangulation fournit une erreur moyenne quadratique (EMQ) de 2,1 mètres.
- *Modèle numérique d'altitude (MNA)*: Le MNA à une résolution de 25 mètres (MNT25-MM0626) acquis auprès de l'OFT est un assemblage de deux portions de fichiers correspondant aux feuilles topographiques 1206 (Guggisberg) et 1226

(Boltigen). La valeur de l'EMQ fournie par l'OFT pour l'ensemble de chacune des feuilles est respectivement de 3,91 m et 7,27 m; cet écart s'explique par une équidistance différente pour les deux feuilles. Une évaluation réalisée par nos soins sur la base de 17 mesures GPS localisées dans la zone d'étude nous fournit une EMQ de 2,3 m en altitude. Il faut relever que notre zone d'étude ne se situe pas dans les régions les plus élevées et les plus accidentées de cet assemblage; de plus, la plus grande partie de cette zone est incluse dans la feuille 1206 qui possède l'EMQ la plus faible.

6.2.2 Numérisation des photos aériennes

- La numérisation des tirages film a été réalisée à l'aide d'un scanner de bureau Epson 1200 GT à la résolution de 800 dpi; ce qui correspond à la résolution optique maximale de ce scanner. Ainsi, la taille des pixels au sol est-elle de 0,876 m pour les clichés de 1997, de 0,751 m pour celui de 1981 et de 0,743 m pour le cliché de 1969. Une attention particulière a été portée à la distribution de fréquence des valeurs spectrales (contrôle à l'aide de l'histogramme). Il s'agit d'obtenir un étalonnage des valeurs sans saturation des valeurs extrêmes et avec un maximum de nuances (c.à.d. avec un étalement optimal des valeurs); cela donne parfois l'impression d'une image trop faiblement contrastée, mais garantit une reproduction optimale des nuances de luminance. Les images ainsi produites au format TIFF sont relativement volumineuses; la taille des fichiers est supérieure à 52 Mb. Les images comptent environ 7300 colonnes par 7300 lignes.

6.2.3 Identification et localisation des amers

- Au vu de la haute résolution de la numérisation du plan d'ensemble disponible et de sa qualité géométrique estimée à 2,1 m, il a été décidé de procéder préalablement à une correction géométrique de ce document afin de localiser plus précisément les amers. La procédure de correction appliquée est une transformation globale du deuxième degré dont les paramètres ont été estimés sur la base des points de triangulation. L'évaluation de la précision géométrique de ce plan d'ensemble corrigé a été réalisée à l'aide des points d'intersection du quadrillage kilométrique présents sur ce plan; elle produit une valeur EMQ de 1,35 m.
- Le choix des amers nécessaires à l'orthorectification s'est porté sur les angles des bâtiments qui sont les seuls éléments repérables de façon claire et précise à la fois sur le plan d'ensemble et sur les photos numérisées. Selon l'extension du bâti aux trois dates considérées, le nombre d'amers varie: 16 pour 1969, 19 pour 1981 et 26 pour 1997.
- La détermination de l'altitude (z) de chaque amer est opérée par interpolation visuelle à partir des informations altitudinales du plan d'ensemble (courbes de niveau et points cotés). Une valeur fixe de 2 m a été ajoutée à chacune des valeurs estimées pour rendre compte de l'altitude des bâtiments à la hauteur de l'angle inférieur du toit.
- La précision de localisation en x, y et z de ces amers ayant un impact important au sein du processus d'orthorectification, nous avons jugé nécessaire d'évaluer cette précision à l'aide des mesures GPS effectuées dans le cadre de la seconde

démarche. Ce contrôle a été réalisé sur un ensemble de 15 sites distribués spatialement à l'intérieur de la zone d'étude; il fournit les valeurs EMQ suivantes: 2,61 m en x, 1,91 m en y (soit une EMQ planimétrique de 3,24 m) et 2,18 m en z.

6.2.4 Construction des orthophotos numériques

Cette démarche consiste à construire, pixel par pixel, l'orthophoto sur la base du modèle de correction interne (défini par les paramètres d'orientation interne), des amers localisés, du MNA et en fonction de la fenêtre à extraire ainsi que de la résolution souhaitée.

La fenêtre des orthophotos constituées couvre une zone d'environ 4x3 km avec les coordonnées extrêmes suivantes: 588.000/168.000 à 591.999,2/170.899,2. Elle comprend 3624 lignes par 4999 colonnes dont les pixels ont une taille de 0,8 m, proche de celle des documents scannés.

L'évaluation de la qualité géométrique des images réalisées par la démarche d'orthorectification s'opère à deux niveaux: l'un relatif au modèle d'orthorestitution et l'autre sur le produit final, l'orthophoto numérique.

- *L'évaluation du modèle d'orthorestitution* vérifie l'ajustement des paramètres internes et des amers introduits dans le modèle et calés sur les photos. Elle ne rend compte que de la précision de positionnement des amers et des points de contrôle. Les erreurs de positionnement en X et en Y estimées par les valeurs EMQ sont les suivantes, au niveau des amers et des points de contrôle:
 - 1969: 1,11 m en X, 0,97 m en Y sur les points de calage et 1,19 m en X, 1,29 m en Y sur les points de contrôle.
 - 1981: 1,18 m en X, 0,96 m en Y sur les points de calage et 1,28 m en X, 1,10 m en Y sur les points de contrôle.
 - 1997: 1,09 m en X, 0,92 m en Y sur les points de calage et 1,26 m en X, 1,19 m en Y sur les points de contrôle.
- *L'évaluation de l'orthophoto produite* permet de décrire la précision de positionnement moyenne dans l'image à exploiter, sur la base d'un certain nombre de points de contrôle. Cette dernière estimation prend en compte la qualité du MNA ayant servi à l'orthorectification et produit donc généralement des valeurs d'erreur supérieures à celles de l'évaluation précédente. Dans le cas de cette démarche «légère», nous avons utilisé 9 des mesures GPS effectuées dans le cadre de la seconde démarche comme points de contrôle. Les erreurs de positionnement global estimées par les valeurs EMQ sont les suivantes:
 - 1969: 1,93 m
 - 1981: 2,10 m
 - 1997: 2,12 m

6.3 Variante «élaborée» avec équipement spécialisé

Dans cette section nous ne présentons que les étapes et éléments spécifiques à cette seconde variante.

6.3.1 Numérisation des photos aériennes

La numérisation des tirages film a été effectuée à l'aide d'un scanner de précision HE-LAVA DSW200 à une résolution optique de 1280 dpi (20 μ m). Elle a été réalisée par le personnel de l'Institut de Photogrammétrie de l'EPF-L. La taille du fichier contenant chacune des photos numérisées est d'environ 130 Mb (soit 11400 x 11600 pixels).

6.3.2 Identification et localisation des amers

- Une campagne de mesures GPS a été mise sur pied pour relever la position sur le terrain des amers nécessaires à l'orthorectification. L'appareillage relativement important utilisé est du type de celui utilisé par les géomètres, avec deux antennes, l'une fixe (la base) et l'autre mobile. La précision planimétrique atteinte lors des mesures est inférieure au centimètre, pour autant que la constellation des satellites soit suffisamment bonne.
- L'altimétrie des points est également déterminée lors de la mesure par GPS; la précision est légèrement inférieure à celle de la planimétrie, mais reste de l'ordre du centimètre, ce qui est amplement suffisant pour nos objectifs.
- 29 points ont été mesurés, tous situés aux angles des toits des bâtiments (de façon à les repérer aisément sur les photos numérisées). Cependant tous ces points n'ont pu être utilisés en tant qu'amers pour les photos de 1981 et 1969, ceci en raison de l'évolution du bâti. Ainsi nous avons 8 amers pour 1969, 11 pour 1981 et 27 pour 1997.

6.3.3 Construction des orthophotos numériques

- *L'évaluation du modèle d'orthorestitution* est ici aussi exprimée par les valeurs EMQ en X et en Y. Au niveau des amers et des points de contrôle, elles sont les suivantes:
 - 1969: 0,24 m en X, 0,30 m en Y sur les points de calage et 0,34 m en X, 0,22 m en Y sur les points de contrôle.
 - 1981: 0,21 m en X, 0,24 m en Y sur les points de calage et 0,36 m en X, 0,30 m en Y sur les points de contrôle.
 - 1997: 0,20 m en X, 0,29 m en Y sur les points de calage et 0,20 m en X, 0,29 m en Y sur les points de contrôle.

- *L'évaluation de la précision globale des orthophotos* produites par cette démarche «élaborée» a été réalisée sur la base des mêmes 9 mesures GPS utilisées comme points de contrôle pour la démarche précédente. Les erreurs de positionnement global estimées par les valeurs EMQ sont les suivantes:
 - 1969: 1,79 m
 - 1981: 1,60 m
 - 1997: 1,50 m

6.4 Comparaison des résultats

Si la variante «élaborée» produit des erreurs de positionnement significativement moindres au niveau du modèle d'orthorectification (prise en compte des paramètres internes et externes), cette différence de précision entre les deux variantes est nettement atténuée au niveau des orthophotos produites (cf. résultats des évaluations). La cause de cette imprécision commune de l'ordre de *2 mètres* est à attribuer au modèle numérique d'altitude. Il semble que l'imprécision du MNA utilisé pour ces deux variantes neutralise la meilleure précision du modèle d'orthorectification réalisée par la variante «élaborée».

Au vu de ces résultats, nous pouvons tirer les trois conclusions suivantes:

- L'erreur de positionnement des orthophotos produites est de l'ordre de 2 mètres. Cette incertitude agira comme facteur limitatif dans l'interprétation des signatures diachroniques. Il ne sera en effet guère raisonnable d'interpréter des décalages observés inférieurs à 4 mètres entre deux dates en tant que mouvements horizontaux significatifs.
- Le supplément de ressources déployé pour la mise en œuvre de la variante «élaborée» (campagne GPS et numérisation de précision) ne se justifie pas au regard de l'amélioration de positionnement des orthophotos produites. Il ne peut être valorisé qu'avec l'utilisation conjointe d'un MNA plus précis. La démarche d'orthorectification «légère» apparaît donc comme la variante optimale. Toutefois, dans le cadre de cette étude, c'est la variante «élaborée», parce que disponible, qui sera soumise à l'interprétation multi-temporelle.
- Remarquons finalement que l'utilité des orthophotos va au-delà de la seule comparaison diachronique. Elles constituent une excellente référence à la réalité du terrain que l'on peut en tout temps mettre en relation, par superposition, avec les données cartographiques auxiliaires (MNA – cartes pixels de l'OFT – plans d'ensembles numérisés – etc.). Cette superposition, notamment à l'écran, offre à l'interprète un contexte d'analyse non seulement diachronique, mais aussi multi-thématique dont certains aspects sont illustrés au chapitre 7. La démarche d'orthorectification, particulièrement la variante «légère», constitue dans ce sens une étape fondamentale dans l'optique d'une intégration de la méthode dans un contexte de SIRS.

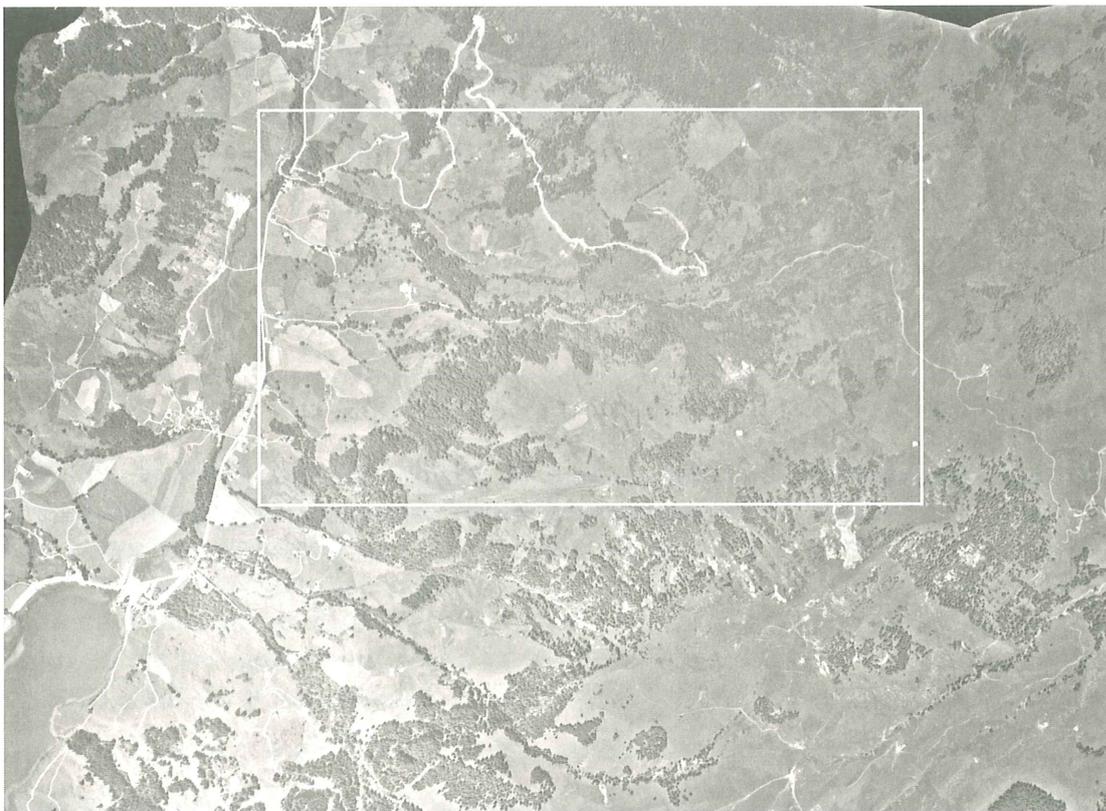


Fig. 6.1: Photo aérienne de 1969 orthorectifiée, avec la zone d'intérêt encadrée. Reproduit avec l'autorisation de l'Office Fédéral de Topographie du 18.4.2000



Fig. 6.2: Photo aérienne de 1981 orthorectifiée, avec la zone d'intérêt encadrée. Reproduit avec l'autorisation de l'Office Fédéral de Topographie du 18.4.2000



Fig. 6.3: Photo aérienne de 1997 orthorectifiée, avec la zone d'intérêt encadrée. Reproduit avec l'autorisation de l'Office Fédéral de Topographie du 18.4.2000



Fig. 6.4: Plan d'ensemble de la région du Lac-Noir, avec la zone d'intérêt encadrée. Reproduit avec l'autorisation du Service Cantonal du Cadastre et de la Géomatique du 27.3.2000

7. ANALYSE TEXTURALE DIRIGÉE (UNITEMPORELLE)

Partant des orthophotos numérisées et de données ancillaires, cette procédure vise à extraire et à vectoriser semi-automatiquement les signatures mentionnées plus haut, avant tout les linéaments d'extension et les concavités/convexités de second ordre. Ceux-ci sont soumis ensuite à une analyse statistique d'orientation, qui permet finalement d'en cartographier la densité par unité de surface. Cette dernière information, comme indiqué dans l'organigramme de la figure 2.1, pourra alors être utilisée avant tout dans le choix des zones à examiner en priorité sur le terrain (flèche marquée «A»), mais aussi comme élément de la carte des phénomènes (flèche «B»).

7.1 Méthode

La procédure suit, dans sa forme expérimentale actuelle, les étapes résumées par l'organigramme de la figure 7.1. Les opérations informatiques, présentées en détail dans l'Annexe 1, ont été conduites au moyen du logiciel *ArcView*, avec recours à *Corel PHOTO-PAINT* et *OCR-TRACE*, version 7, pour l'étape 5.

La méthodologie ayant été mise au point sur le glissement du Hohberg, chaque étape sera illustrée par des résultats obtenus dans ce cas particulier. La procédure d'analyse texturale a été conduite principalement sur la base de l'orthophoto PIR de 1996. Occasionnellement, nous ferons état de résultats obtenus sur les orthophotos panchromatiques de 1969, 1981 et 1997.

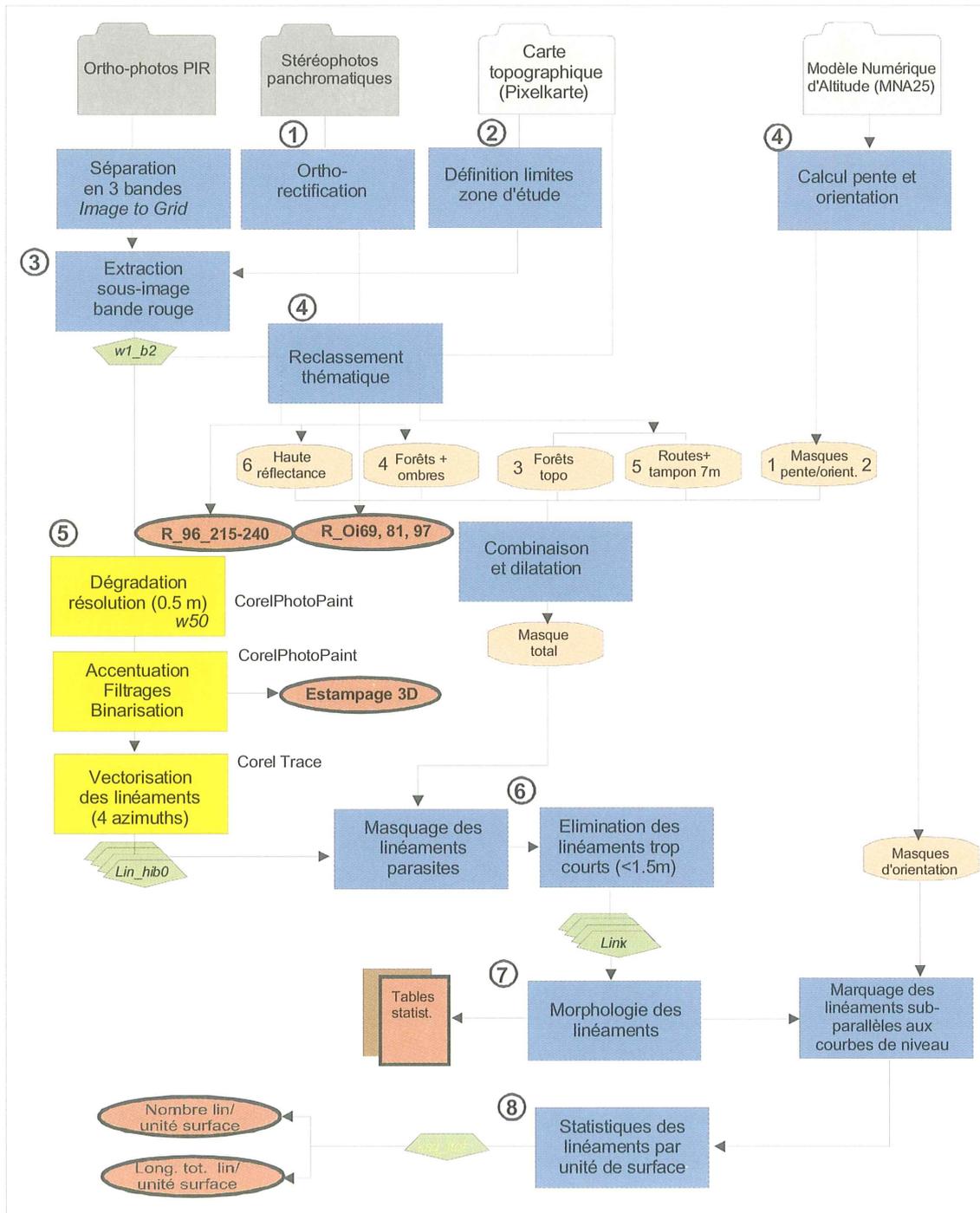
7.1.1 Délimitation de la zone d'étude

La zone de glissement du Hohberg s'inscrit dans un cadre arbitraire de 2443 x 1697 m, situé sur l'orthophoto PIR no Fr961083 de l'Inspection cantonale des forêts, canton de Fribourg (fig. 7.2). Cette image au format *TIFF 24 bits* géoréférée occupe environ 568 Mb, ce qui représente actuellement la limite pratique de capacité de traitement des logiciels imageurs ou de SIRS.

7.1.2 Extraction / séparation de l'image PIR

Dans *ArcView*, la composition colorée de l'image l'image PIR d'origine est transformée en format *grid*, produisant une décomposition en trois «couches» rouge, vert et bleu. Après inspection visuelle, c'est la composante verte (bande spectrale du rouge) qui a été choisie pour ses qualités de contraste. En travaillant sur une image monochrome, nous avons donc renoncé à exploiter l'information spectrale pour nous concentrer sur l'information contextuelle.

Un sous-ensemble correspondant à l'aire d'étude (fig. 7.2, cadre) est extrait de l'image totale, puis copié dans une autre image (0,25 m de résolution). Cette dernière est finalement dégradée à 0,5 m. Ce sont ces deux dernières qui serviront de base à toutes les manipulations ultérieures.



LEGENDE

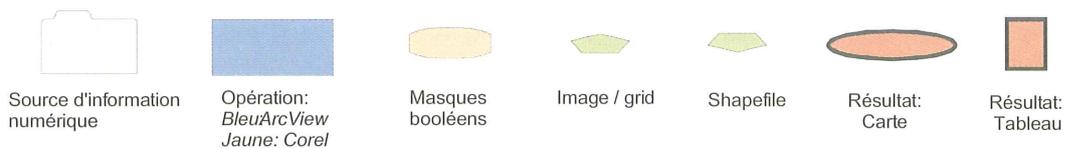


Fig. 7.1: Organigramme de l'analyse texturale dirigée.

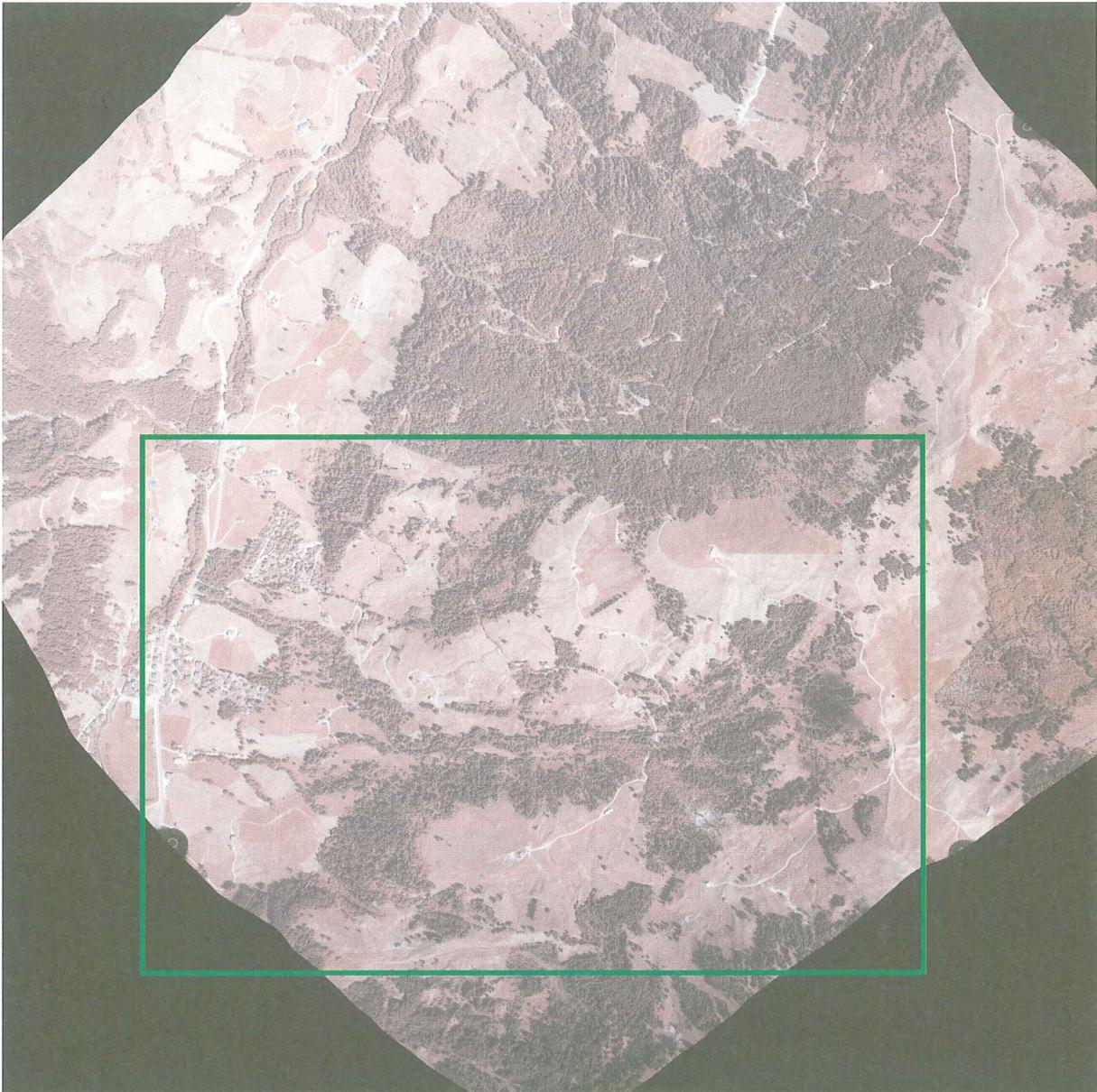


Fig. 7.2: Orthoimage PIR no Fr961083 – Région du Hohberg. Résolution: 0,25 m. Format: *.tif géoréférencé. Taille d'origine: 567'958'334 Bytes. Le cadre représente la zone-pilote (2443 x 1697 m). Reproduit avec l'autorisation du Service des Forêts de l'Etat de Fribourg du 21.3.2000.

7.1.3 Reclassement thématique (masques)

Les opération de masquage obéissent à trois objectifs:

- Elimination, sur la base du MNA, (**a**) des zones de pentes inférieures à un seuil (ici, 9 degrés).
- Elimination (**b**) des parties de l'image non susceptibles de montrer des signatures de mouvements (sensu fig. 3.1) raisonnablement univoques (par exemple les forêts denses) et (**c**) des parties affectées de linéaments anthropiques, donc sans signification géologique (routes). Il s'agit là d'un masquage *négatif*.
- Mise en évidence des zones à haute luminance (tons gris clair et blanc), pouvant être attribuées soit (**d**) aux niches d'arrachement (masquage *positif*), soit (**e**) aux zones construites ou aux routes. Dans ce dernier cas, il s'agira d'un masquage *négatif* s'ajoutant à celui décrit précédemment.

Il est important de mentionner ici que l'élimination de parties de l'image par les masquages **b**, **c** et **e** ne signifie *pas* que celles-ci soient dépourvues de mouvements. Il s'agit seulement, pour des raisons d'efficacité, d'écarter d'emblée les zones *inappropriées* à l'analyse linéamentaire choisie. Quant au masquage par les pentes (**a**), il suit la logique de la modélisation géologique (CARRARA et al. 1998), voire celle du bon sens.

Les masques sont élaborés non seulement à partir de l'orthophoto elle-même, mais aussi des données ancillaires (carte-pixel, carte-vecteur et modèle numérique d'altitude). Ces dernières sont donc indispensables à l'existence-même de notre méthodologie (fig. 2.1). Pour l'étude de cas Hohberg, nous disposons de la carte pixel de l'OFT, ainsi que du MNT25 de l'OFT.

a) Masques de pente et orientation

Bien que le MNT25 soit entaché de nombreux artéfacts (WYLER 1997), spécialement dans les zones montagneuses (équidistance des courbes de niveau à 20 m), il peut néanmoins être utilisé à des fins de masquage. Après calcul des pentes et des orientations, on a défini un masque d'exclusion pour les pentes inférieures à 9 degrés (*mask1*, fig. 7.3) et un masque de tri selon les quatre points cardinaux (fig. 7.4).

b) Masque des forêts

La couche «verte» de la carte-pixel (*wton*) a été utilisée pour un premier masque d'exclusion de la forêt (*mask2*, fig. 7.5). Pour une prise en compte plus fine des arbres isolés et des ombres portées, on a exclu les parties de l'image ayant un ND (niveau de gris) inférieur ou égal à 85 (*mask4*, fig. 7.5). Cette valeur a été choisie après plusieurs essais.

c) Masque des routes

Les implantations humaines, telles que constructions et réseau de transport (routes surtout), sont caractérisées à la fois par une luminance élevée (béton, gravier, bitume) et/ou par une forme linéaire. Elles peuvent donc être confondues tant avec des niches d'arrachement que des linéaments géologiques.

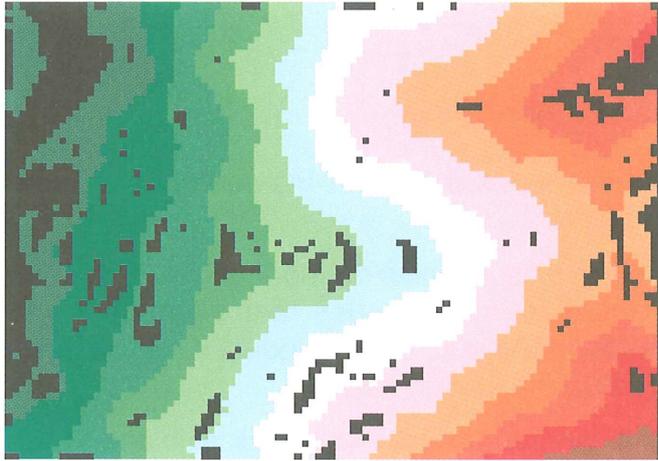


Fig. 7.3: Masque des pentes superposé sur le MNA (ensemble de la zone, correspond au cadre de la fig. 7.2). Les zones peu susceptibles d'être affectées de mouvements sont en noir (pentes ≤ 9 degrés). Reproduit avec l'autorisation de l'OFT du 18.4.2000.

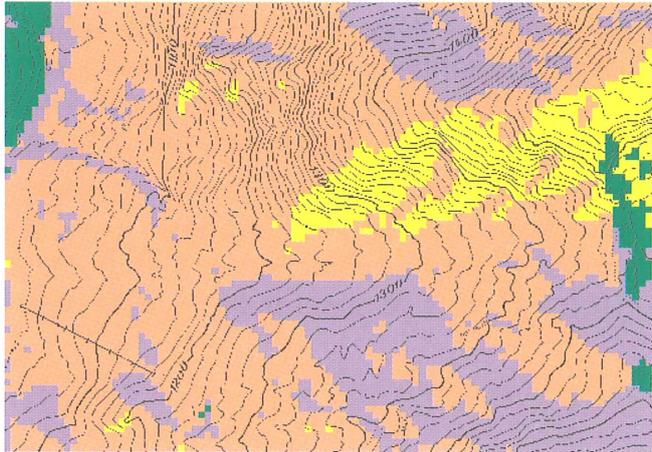


Fig. 7.4: Masque des orientations (ensemble de la zone). Est: vert; Sud: jaune; Ouest: rose; Nord: violet. Reproduit avec l'autorisation de l'OFT du 18.4.2000.



Fig. 7.5: Masque des forêts (zone supérieure du glissement). Vert: *mask2*; rouge: *mask4*. Reproduit avec l'autorisation de l'OFT du 18.4.2000.

Dans le meilleur des cas, on devrait disposer d'une couche vectorielle ad hoc pour la confection du masque. Malheureusement cette information n'était pas disponible pour la région Hohberg; par ailleurs, la couche noire de la carte pixel inclut aussi la toponymie, ce qui rend malaisée sa vectorisation automatique. Nous nous sommes donc limités à numériser à l'écran les routes et chemins, qui ont été ensuite rastérisés et «élargis» d'un tampon de 7 mètres (*mask3_7*; fig. 7.7).

d+e) Masques de haute luminance

Après plusieurs essais, trois reclassements de l'orthophoto (ND >200, ND >210 et ND entre 215 et 240) ont produit le masque d'exclusion *mask5* (DN >200) et, après l'application des masques *mask2* + *mask3_7* + *mask4* et d'un carroyage, les cartes *R_96_200*, *R_96_210* et *R_96_215-240* (fig. 7.6 et 7.7). Le carroyage facilite l'examen systématique de l'image en vue d'identifier les niches d'arrachement.

De semblables opérations de seuillage ont aussi été conduites sur les orthophotos panchromatiques de 1969 à 1997. Elles ont été définies par un seuillage effectué sur les images brutes *oi69*: >179; *oi81*: >196; *oi97*: >175 (fig. 7.6. et 7.18).

Ces cartes représentent donc un premier résultat de l'analyse; elles seront discutées plus loin (7.2).

Superposition et dilatation des masques

Les masques booléens précédemment définis sont agrégés et le masque ainsi produit est encore dilaté de 8 mètres afin d'éliminer des «clairières» trop petites (*masktot8*). C'est ce dernier qui définit donc les zones de l'image susceptibles d'être soumises à l'extraction semi-automatique des linéaments géologiques (fig. 7.8).

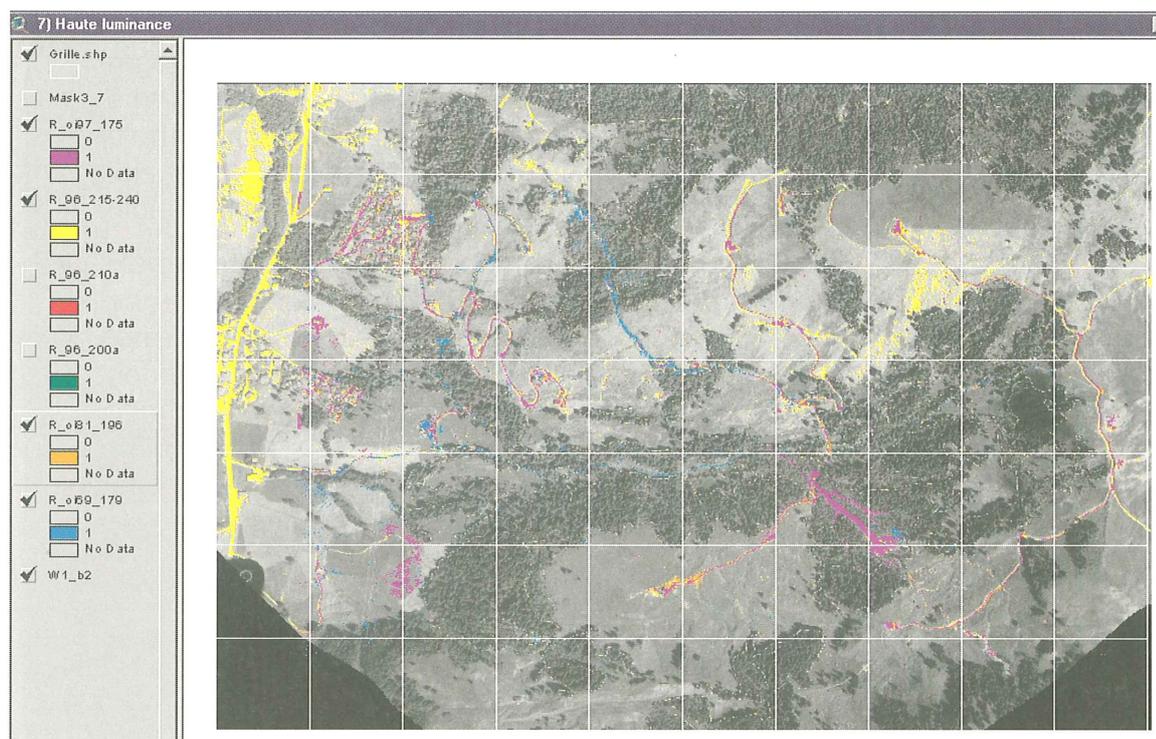


Fig. 7.6: Zones à haute luminance. Turquoise: orthophoto panchro 1969 (>179); orange: panchro 1981 (>196); jaune: PIR 1996 (215–240); violet: panchro 1997 (>175).

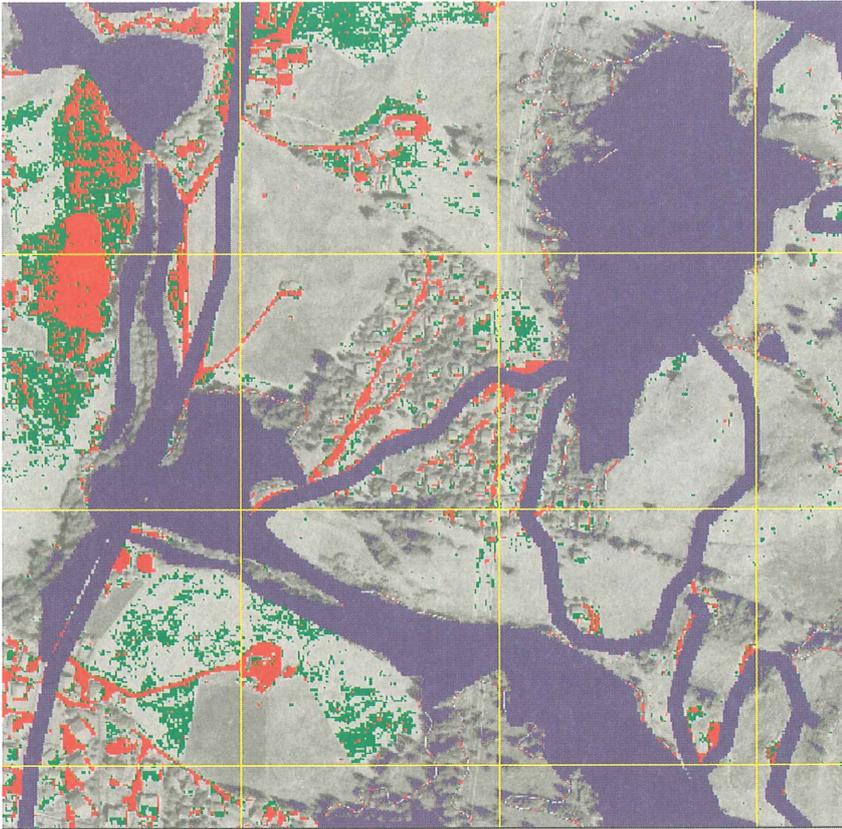


Fig. 7.7: Zones à haute luminance (village). Bleu: $mask2 + mask3_7 + mask4$; Rouge: R_{96_210} ; Vert: R_{96_200} .

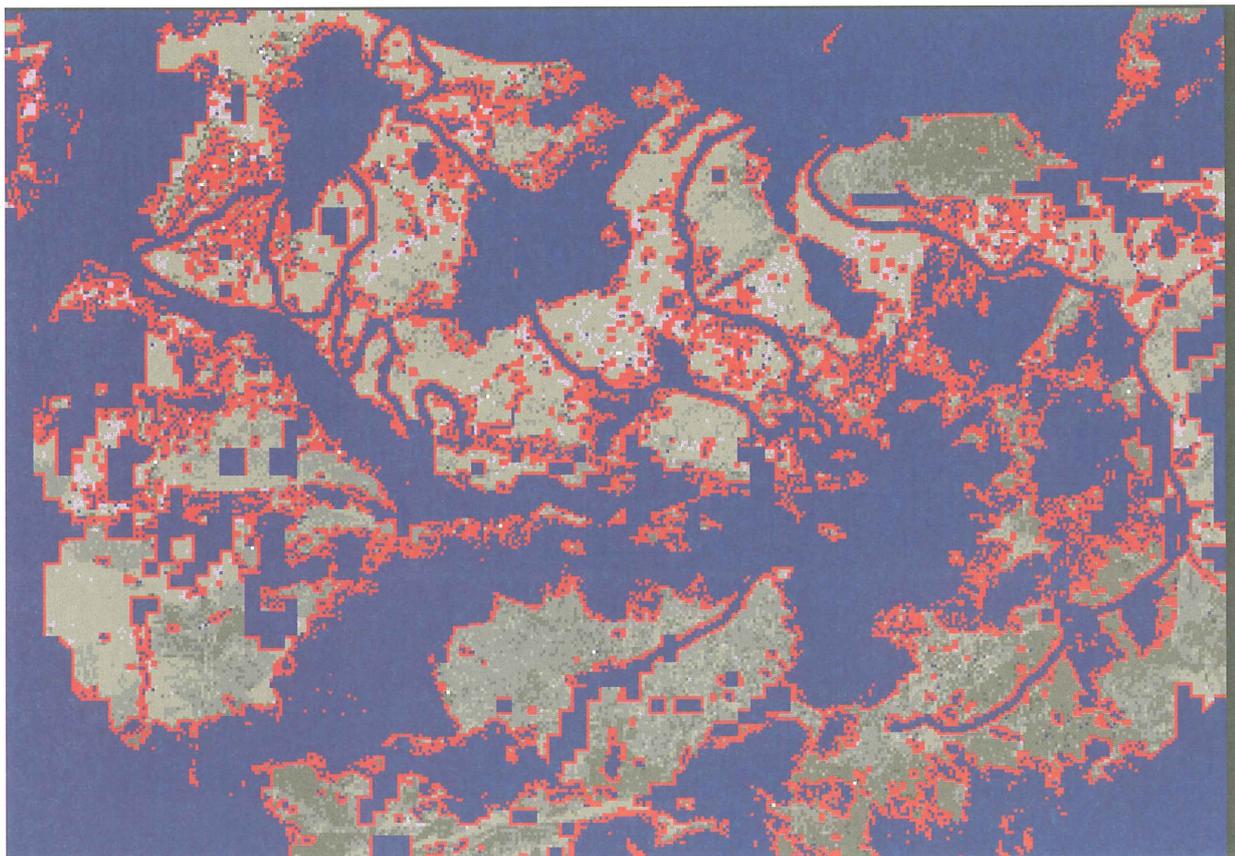


Fig. 7.8: Masque final ($masktot8$). Bleu: $masktot$; Rouge: tampon de 8 m.

7.1.4 Extraction et vectorisation des linéaments

Ces opérations se font sur l'image dégradée à 50 cm, afin de ne pas prendre en compte les linéaments dus aux sentiers tracés par le bétail («pieds de vache»).

Amélioration de l'image et estampage 3D

Un étalement dynamique suivi d'une accentuation directionnelle ont amélioré le contraste et les détails de l'image, qui a été soumise ensuite à un estampage directionnel dans *PhotoPaint*. Cette dernière opération s'applique habituellement aux MNA dans un but cosmétique. Nous l'avons étendue aux photos aériennes, faisant l'hypothèse que le modelé du terrain s'y exprime sous forme d'ombres plus ou moins accentuées.

Dans le but de mettre en évidence la micro-topographie d'une manière aussi complète que possible, nous avons élaboré quatre images d'estampage selon les azimuths d'illumination venant du N, E, S et W. Le module *Effets 3D/estampage* de *PhotoPaint* offre plusieurs options pour la «profondeur» et le «niveau» de l'estampage. Après de nombreux essais, nous avons choisi les valeurs mentionnées dans l'Annexe 1. Le résultat pour l'azimuth N est reporté sur la figure 7.9.

Débruitage et inversion

Les images estampées en niveau de gris ont été seuillées à 180, ce qui met à zéro les zones «lisses». Le bruit a ensuite été supprimé deux fois, puis l'image, binarisée et inversée (fig. 7.10), servira à la vectorisation.

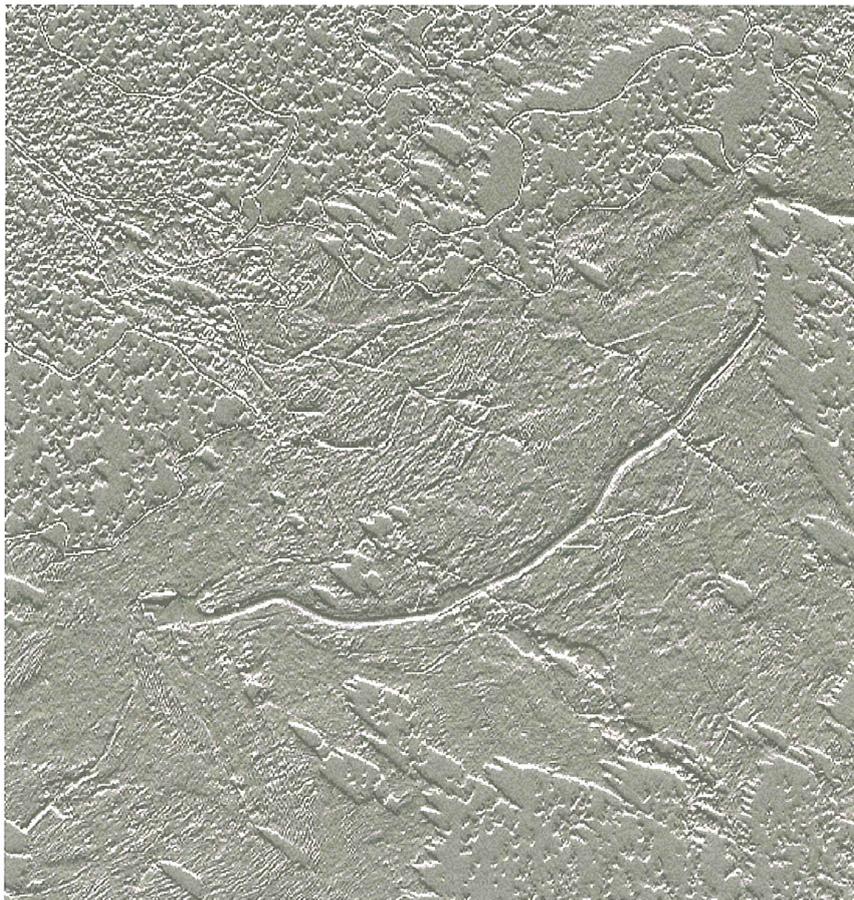


Fig. 7.9: Estampage directionnel. Image en niveaux de gris. L'illumination vient du nord. Sous-zone de Guglera.

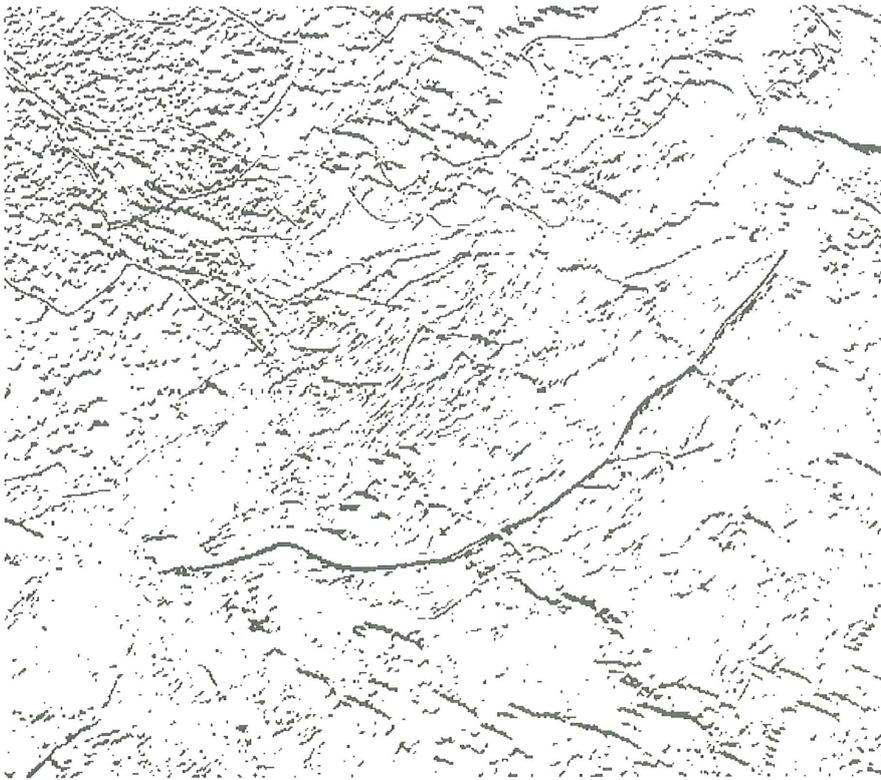


Fig. 7.10: Estampage directionnel. Image débruitée, inversée et binarisée. Sous-zone de Guglera.

Vectorisation

Là encore, *COREL Trace* offre plusieurs options. Nous avons choisi en particulier de tracer les vecteurs à partir de l'axe des linéaments, et ne pas adoucir leur tracé (réduction des points = 0), ce qui évite une segmentation incontrôlable. Sur la zone étudiée, l'on obtient ainsi 32083 objets vectoriels (Annexe 1, tabl. A1.1; fig. 7.11).

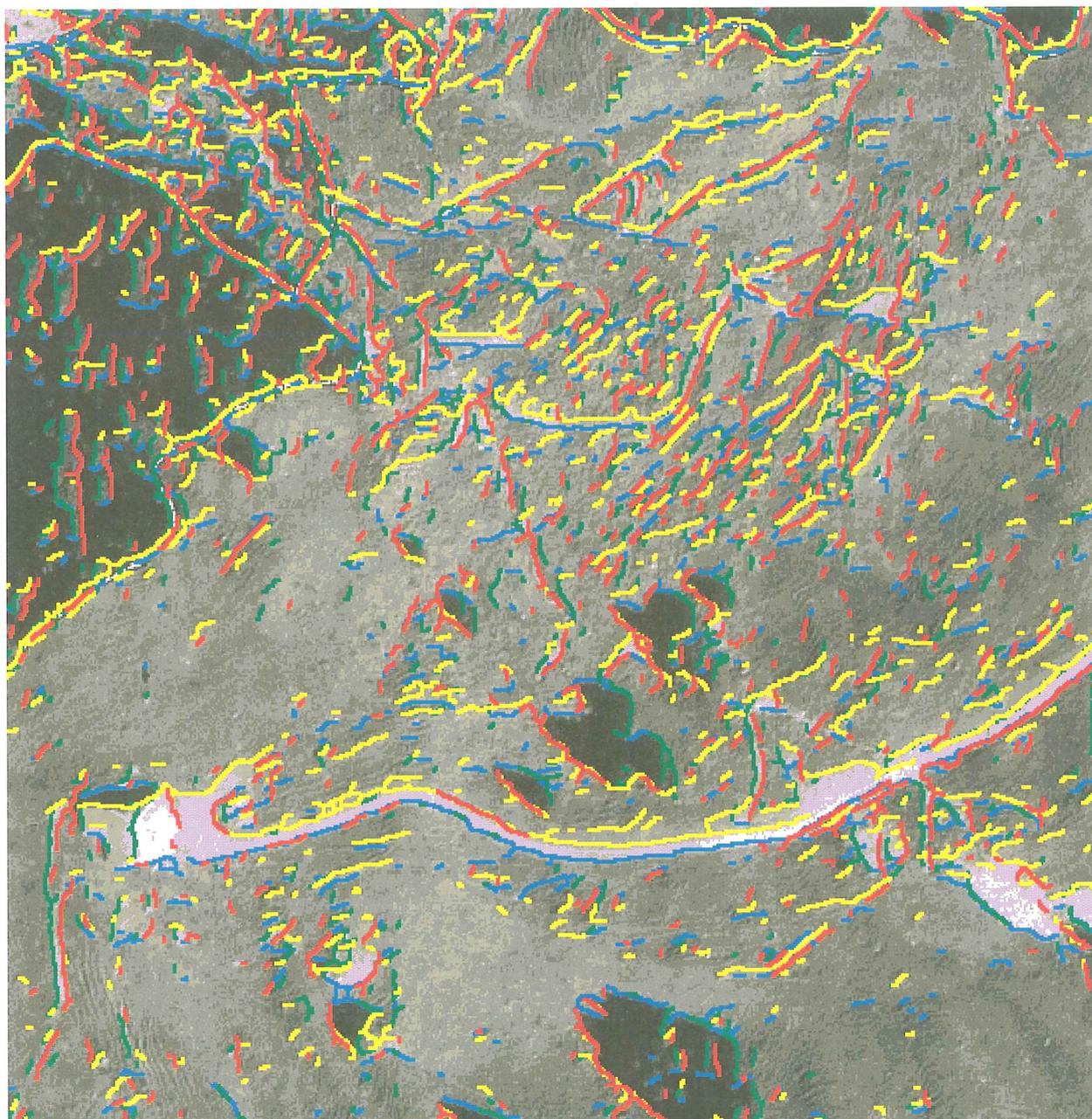


Fig. 7.11: Linéaments bruts. Azimuths d'estampage: Bleu: nord; Vert: est; Jaune: sud; Rouge: ouest. Sous-zone de Guglera.

Transfert dans ArcView

Les fichiers des linéaments selon les quatre azimuths sont traduits du format *.dxf en *.shp, puis géoréférentiels à l'écran sur les images estampées.

7.1.5 Manipulation des linéaments

Les linéaments sont maintenant des objets, mais doivent être encore masqués et corrigés.

Statistiques et masquage

Une statistique des longueurs avant masquage est reportée dans le tableau A1.3, Annexe 1. On y remarque leur distribution très biaisée (lognormale), et des moyennes variant entre 6,4 et 7,0 m. Celles-ci ne varient donc pas significativement avec l'azimut de l'illumination.

Les linéaments se trouvant dans les parties de l'image inaptés à l'analyse sont éliminés sous le masque total (fig. 7.12). Ceux qui restent vont subir un second tri, et seront écartés si leur longueur est inférieure à 1,5 m (fig. 7.13). Là encore, ce seuil a été choisi après examen à l'écran. Les statistiques des linéaments avant et après ce tri sont reportées sur le tableau A1.4, Annexe 1: leur nombre a passé de 19031 à 12674, et leur longueur moyenne est voisine de 5 m.

7.1.6 Morphologie des linéaments

Dans le but de caractériser géométriquement les linéaments, nous avons calculé à l'aide de scripts *ArcView* (voir Annexe 2):

- **Descripteurs (script LINEAM AZI 3)**
 - *Length*: longueur réelle.
 - *Line_Eq_L*: longueur de la droite équivalente reliant les deux extrémités.
 - *RatioL/L*: rapport (Longueur équivalente) / (Longueur réelle).
 - *Azimuth* de la ligne équivalente. Sa représentativité par rapport au linéament est d'autant meilleure que le *RatioL/L* est proche de l'unité.
 - *Conc/Conv*: forme brisée (*broken*) ou rectiligne (*straight*). Deux termes indiquent en outre la direction de la courbure du linéament: *concave* = courbé vers le bas de la pente (plutôt les cicatrices d'extension, voir fig. 3.1); *convexe* = courbé vers le haut (plutôt bourrelets d'accumulation).
- **Tri par orientation (script TRI ORIENT)**

Sur la base des figures 3.1 et 3.3, on fait l'hypothèse que les signatures linéamentaires les plus significatives sont sub-parallèles aux courbes de niveau. L'orientation de chaque linéament est donc comparée à celle du terrain sous-jacent avec une tolérance de ± 25 degrés. En cas de dépassement, le linéament n'est pas conservé. Cette procédure permet l'élimination d'un bon nombre de structures parasites, ramenant le nombre total des linéaments à 3913. Rappelons que ce chiffre représente les linéaments «répétés» selon les quatre azimuts. Les statistiques de cette population finale de linéaments sont reportées dans le tableau A1.6 de l'Annexe 1.

On remarquera sur ce dernier qu'il existe un nombre apparemment plus grand de linéaments (*somme*) pour les orientations 2 (est) et 4 (ouest). Cette différence n'est toutefois pas significative, et s'explique par la présence de longs linéaments à peu près NS dans la partie gauche de l'image, dus à une ligne à haute tension.

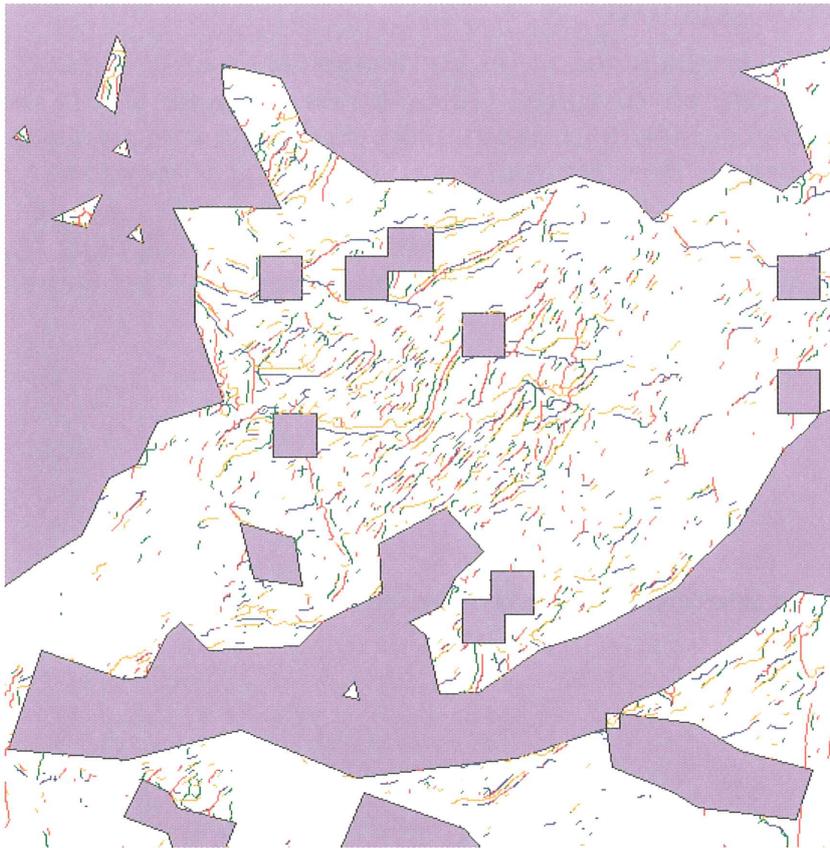


Fig. 7.12: Linéaments bruts masqués par le masque total. Même légende que fig. 7.11. Sous-zone de Guglera.

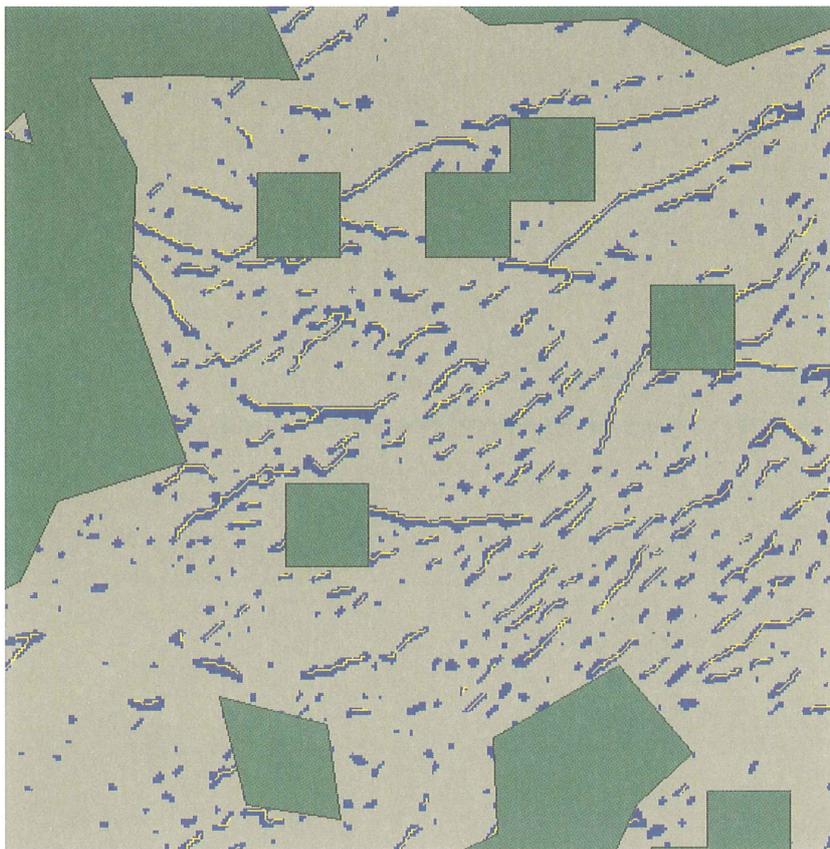


Fig. 7.13: Linéaments de longueur supérieure à 1,5 m (jaune); Bleu: linéaments raster avant vectorisation. Sous-zone de Guglera.

- **Densité des linéaments (script CLIPPO4)**

Pour faciliter l'examen visuel et le rendu des zones de l'image riches en linéaments, nous avons divisé cette dernière en 70 carrés (10 colonnes, 7 lignes, 243 m de côté), au sein desquels ont été calculés deux descripteurs de densité linéamentaire: *moyenne du nombre de linéaments dans les quatre azimuths* (NL_m) et *moyenne de la longueur cumulée des linéaments dans les quatre azimuths* (SL_m). Ces deux descripteurs sont fortement corrélés (coefficient de détermination R^2 voisin de 0,95; fig. 7.14), donc utilisables aussi bien l'un que l'autre. Ils sont représentés sur les figures 7.15 et 7.16.

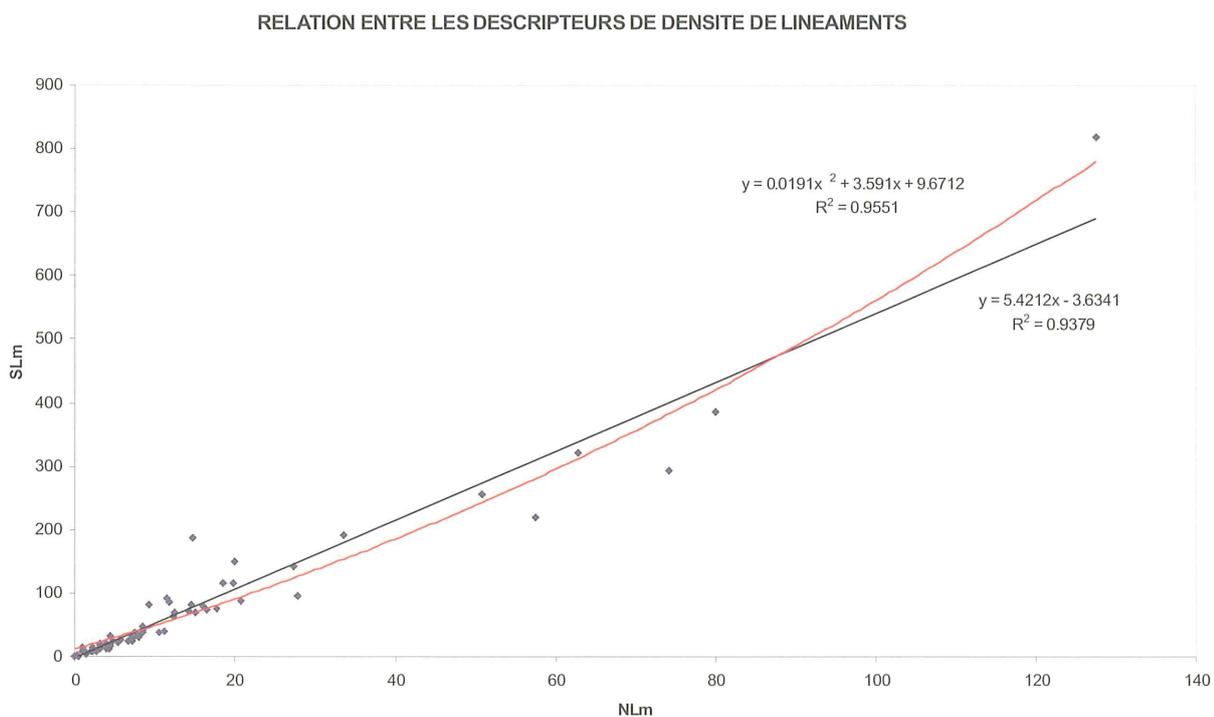


Fig. 7.14: Relation entre les deux descripteurs de densité de linéaments NL_m et SL_m .

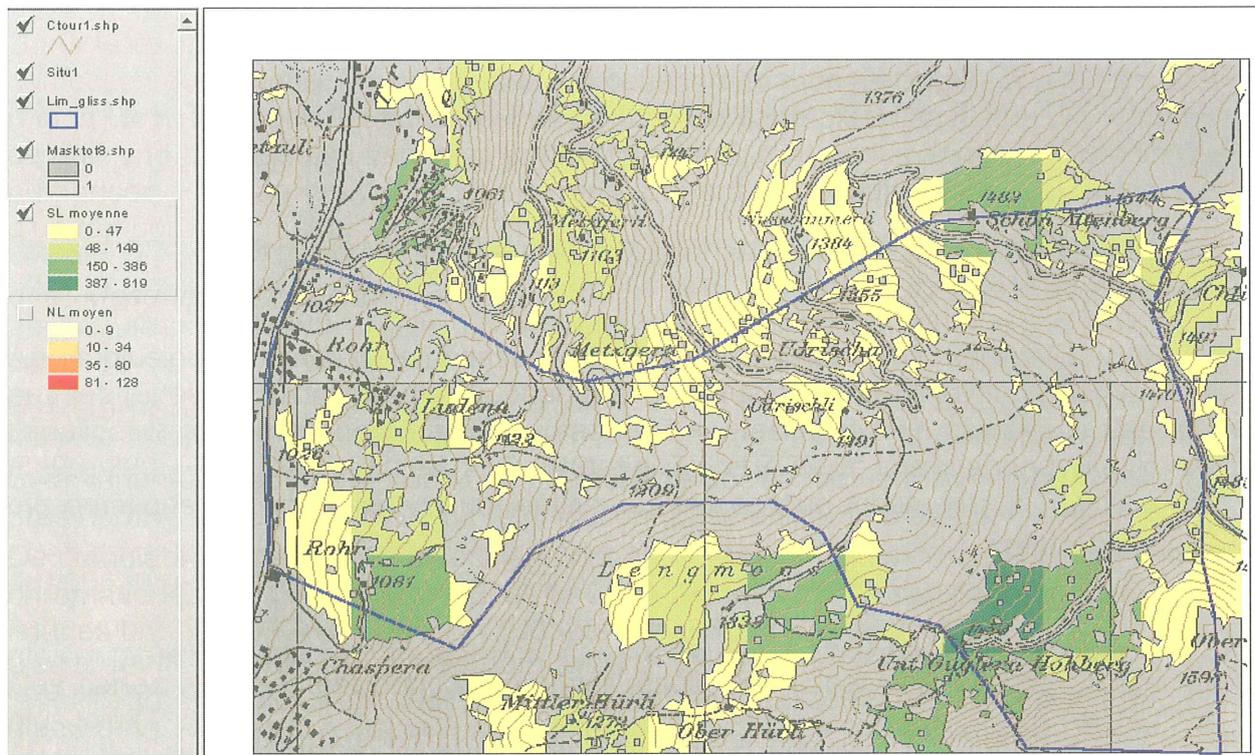


Fig. 7.15: Carte finale de la densité des linéaments par unité de surface dans la région du Hohberg, exprimée par SL_m (moyenne de la longueur cumulée des linéaments dans les quatre azimuts). Les zones à vérifier sur le terrain sont marquées en vert foncé. Reproduit avec l'autorisation de l'OFT du 18.4.2000.

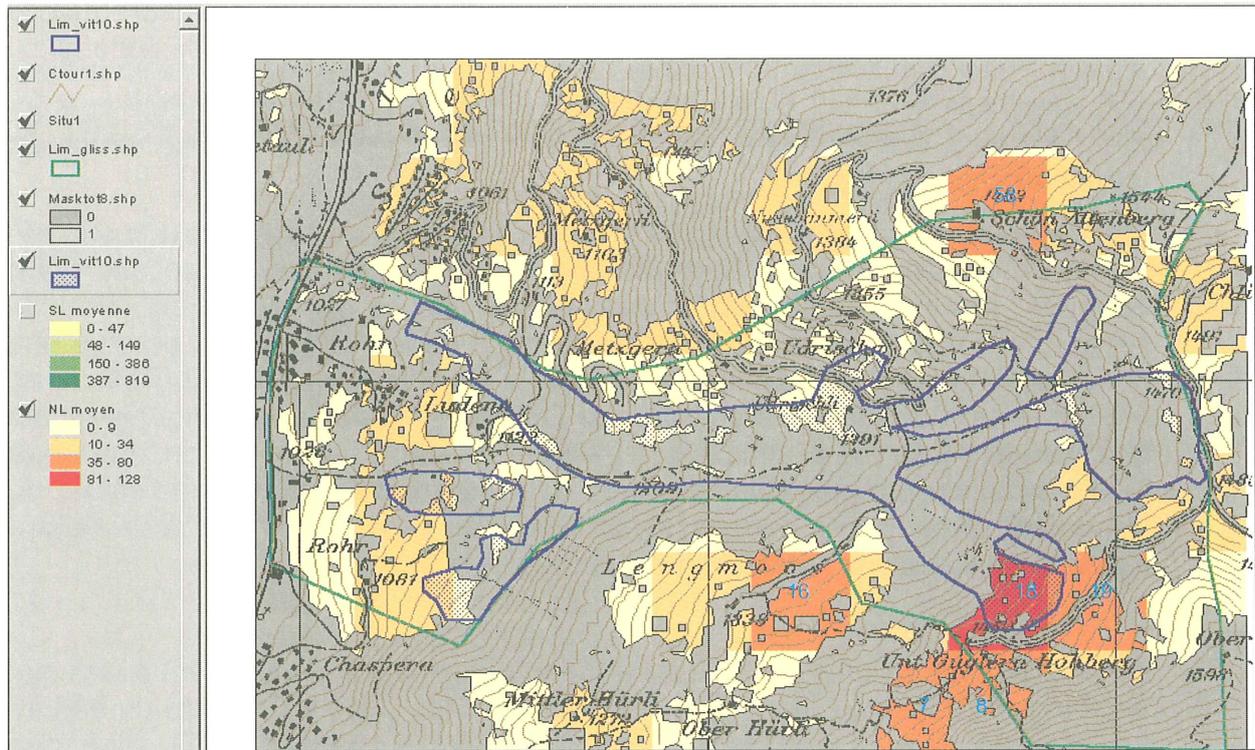


Fig. 7.16: Carte finale de la densité des linéaments par unité de surface dans la région du Hohberg, exprimée par NL_m (moyenne du nombre de linéaments dans les quatre azimuts). Les zones à vérifier sur le terrain sont marquées en rouge et orange foncé. Les numéros en cyan représentent les carrés discutés en 6.1.3. Bleu: périmètres affectés de mouvements > 10 cm par an (selon BEER & RAETZO 1992). Reproduit avec l'autorisation de l'OFT du 18.4.2000.

7.2 Discussion

Nous commentons ici les résultats obtenus lors des différentes étapes sur la zone test du Hohberg.

- *Taille des zones d'application*

Nous avons constaté que les logiciels de traitement d'images sur PC utilisés dans ce projet approchent de leurs limites pour des fichiers excédant les 700 Mb. Dans le cas d'une orthophoto d'origine en 24 bits et à une résolution de 0,25 m, cela représente une zone d'environ 4 km^2 . Si l'on part d'une orthophoto en 8 bits (noir-blanc), on pourrait alors traiter une surface d'environ 12 km^2 . Ces valeurs représentent donc les surfaces maximales traitables d'un seul tenant avec la technologie actuelle. Au cas où l'étendue de la zone à étudier serait plus vaste, il suffirait d'appliquer la méthodologie à plusieurs reprises et à fusionner ensuite les résultats.

- *Quelles signatures?*

Parmi les sept possibilités de signatures permettant de caractériser une cible (BONN & ROCHON 1992, p. 63), nous n'avons retenu, dans notre approche, que celles de la *luminance* et du *contexte* (texture). Un examen cursif de l'information de l'image PIR et de ses trois composantes ne nous a pas permis d'y distinguer des signatures *spectrales*. Cela n'exclut pas qu'elles existent dans certains cas, par exemple à titre d'information indirecte sur des zones humides, elles-mêmes liées à des glissements.

- *Masquage*

Les masques sont élaborés non seulement à partir de l'orthophoto elle-même, mais aussi des données ancillaires (carte-pixel, carte-vecteur et modèle numérique d'altitude). Ces dernières sont donc indispensables à l'existence-même de notre méthodologie (fig. 7.1).

Les masques d'exclusion appliqués ont pour avantage de restreindre la superficie des zones à soumettre à l'analyse texturale, allégeant ainsi la procédure. En revanche, ils risquent de cacher des parties actives du glissement. Pour le Hohberg, c'est le cas des masques de la forêt: celle-ci a été prise comme une entité homogène, alors qu'elle montre, sur le parcours principal du glissement, une couverture arbustive caractéristique (aulnes et saules). La partie principale de cette dernière a été délimitée à l'écran. Sur la figure 7.17, on remarque qu'elle coïncide remarquablement bien avec la zone de vitesse maximale du glissement. Suite à une autre analyse texturale, ce type de forêt pourrait être distingué en vue d'une vérification ultérieure sur le terrain.

- *Zones à haute luminance*

Dans la région du Hohberg, les zones à haute luminance proviennent avant tout de cibles anthropiques (fig. 7.6 et 7.7): ainsi, la non-prise en compte du bâti induit-elle des erreurs par commission (LILLESAND & KIEFER 1987), bien que l'application du masque des routes (*mask3_7*) montre qu'il est possible d'éliminer une partie des fortes luminances d'origine anthropique.

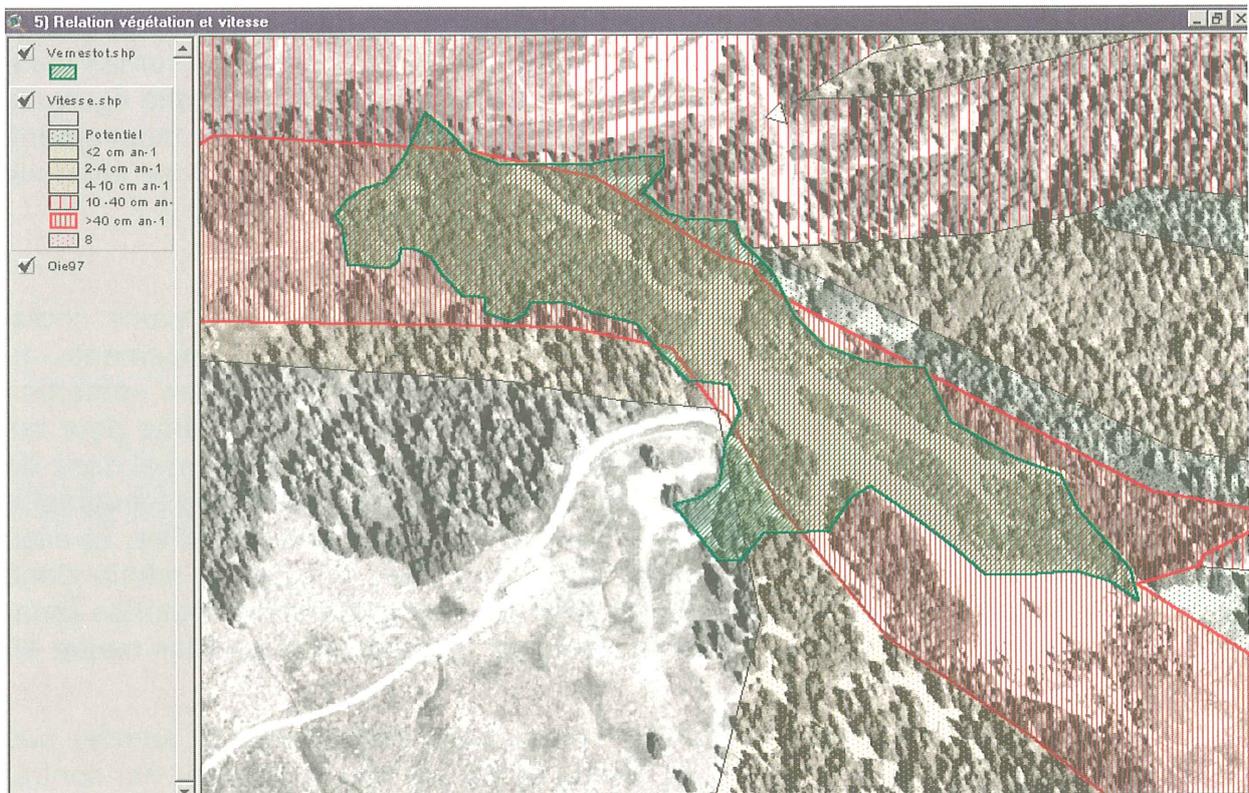


Fig. 7.17: Correspondance entre les zones à haute vitesse de glissement et les forêts de vernes entre Guglera et Udrischli. Image de fond: orthophoto de 1997 étalée dynamiquement.

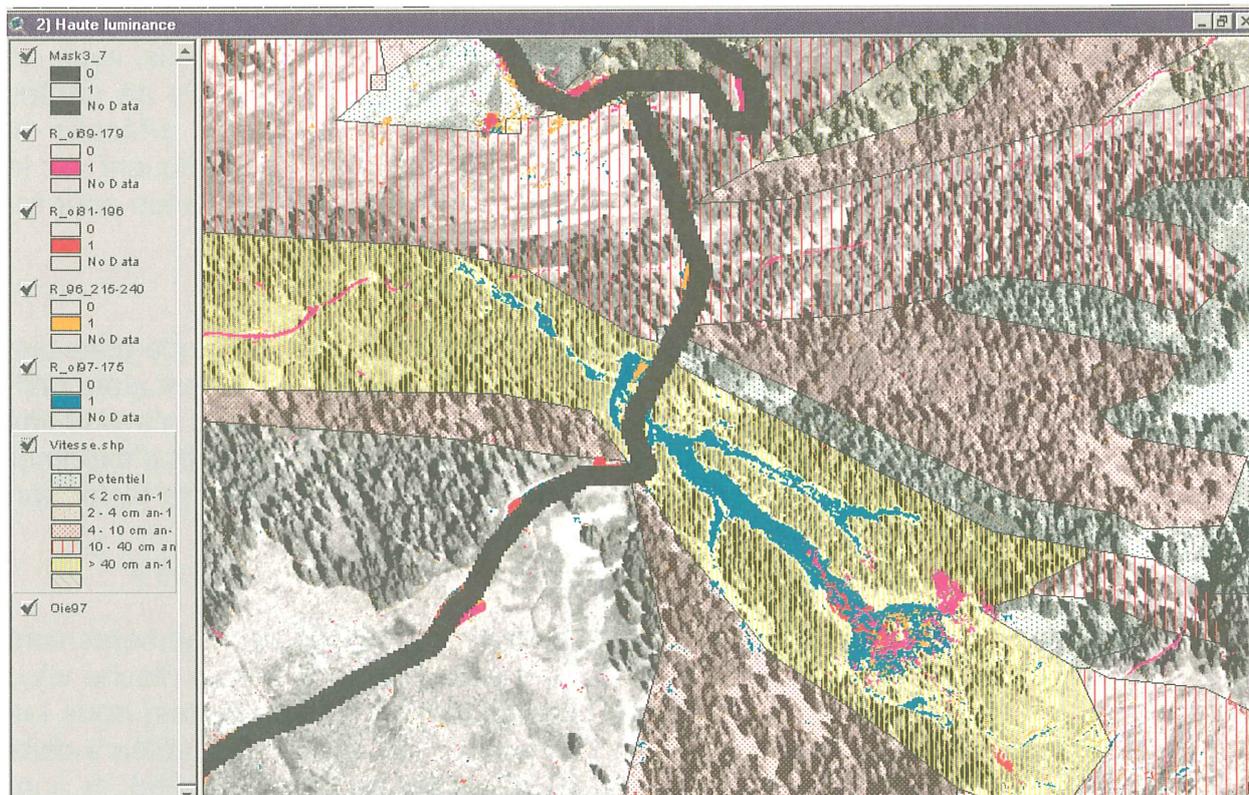


Fig. 7.18: Zones à haute luminance (1969, 1981, 1996 et 1997) entre Udrischli et Lengmoos, superposées à la carte des vitesses de glissement (simplifiée d'après BEER & RAETZO 1997). Image de fond: orthophoto de 1997.

Les niches d'arrachement sont plutôt discrètes, alors que les zones de glissement dénudées très actives apparaissent beaucoup mieux, surtout sur les composites pluri-annuelles (fig. 7.18). On remarquera par ailleurs sur cette figure. la bonne coïncidence entre zones dénudées et vitesses élevées de mouvement. Dans l'état actuel de la méthodologie, l'identification de ces zones se fait donc par inspection visuelle à l'aide du carroyage.

- *Mise en évidence de la micro-topographie*

Du fait de la nature linéaire des signatures d'extension, nous avons choisi l'estampage directionnel pour les mettre en évidence. Ce type de linéaments, de courte longueur d'onde pour une amplitude assez forte, produit des «ombres» bien définies lors de l'illumination artificielle. Il n'en va pas de même pour les bourrelets de pied (fig. 3.1), de plus grande longueur d'onde (>10 m) et donc de relief plus adouci. Au bas du glissement du Hohberg, leur orientation topographique par rapport à la direction solaire ne leur donne aucune signature, et elles échappent même à une inspection visuelle. Il n'en va pas de même dans d'autres cas (voir 7.4). Il serait souhaitable d'explorer d'autres méthodes (analyse morphologique de MNA à haute résolution, par exemple) pour les mettre en évidence.

L'orientation de l'illumination lors de l'estampage directionnel ne semble pas avoir une influence significative au niveau de l'ensemble de l'image. Par contre, cela pourrait être le cas sur des zones plus restreintes. Par prudence, nous avons donc gardé les quatre orientations pour le calcul de la densité linéamentaire.

- *Débruitage*

Alors que le débruitage élimine à juste titre les parasites, il peut aussi avoir un effet négatif sur les linéaments discontinus, formés d'un ensemble de parties (pixels) déconnectées parfois très courtes: celles-ci sont alors effacées et l'information disparaît. Nous prévoyons de pallier ce défaut en appliquant par la suite à l'image des opérations de morphologie mathématique (dilatation pour reconnecter les segments suivie d'une squelettisation).

- *Caractérisation des linéaments*

Dans le but de vectoriser des linéaments en segments aussi longs que possible, nous n'avons pas pu adoucir leur tracé, qui est très «brisé». Il devient alors difficile d'en caractériser la concavité ou convexité, ce qui fait que nous n'avons pas exploité ces descripteurs. En revanche, la droite équivalente permet d'exprimer de manière acceptable l'azimuth général du linéament et, partant, de tester son parallélisme avec les courbes de niveau.

- *Représentation et utilisation des résultats*

Rappelons que les cartes de luminance et celles de densité de linéaments sont destinées, avant tout, à focaliser les zones à examiner sur le terrain (flèche «A», fig. 2.1). Pour faciliter et systématiser l'examen visuel de ces cartes, nous les avons subdivisées en carrés d'une taille choisie par l'analyste et adaptée à celle de la région à étudier (pour le Hohberg, 10 x 7 carrés de 243 m de côté); ils sont dotés d'une numérotation (1 à 70). Ces carrés sont ensuite affectés d'une couleur en fonction de la densité (fig. 7.15 et 7.16).

Dans le cas d'une utilisation de type «A», l'analyste va examiner les carrés en dessus d'un certain seuil (Hohberg: >35 linéaments par carré) et retourner à l'orthophoto d'origine si nécessaire pour finalement choisir les zones à vérifier sur le terrain.

Il pourrait être aussi intéressant d'inclure, dans la carte des phénomènes, des informations linéamentaires plus précises que les *figurés* habituellement employés (voir par exemple la légende de BOLLINGER & NOVERRAZ 1996). Il s'agit là de l'utilisation de type «B» (fig. 2.1). Ce transfert d'information devra bien sûr être précédé d'une vérification sur le terrain.

- *Objectivité de la méthode*

On remarquera que l'analyste intervient très activement dans toutes les opérations d'extraction des linéaments. Le choix de l'une ou l'autre des options se fait par tâtonnement, et dépend entre autres de l'orientation des versants, de l'heure de prise des photos et du type de linéament recherché. Pour assurer la reproductibilité des résultats, il est donc capital de conserver la liste des options choisies dans la méta-information attachée à chaque image. *Tout chercheur doit être capable de reproduire dans ses plus fins détails la séquence des opérations ayant conduit à un résultat donné*, tel que figuré sur les figures 7.15 et 7.16). Libre à lui d'en modifier les options selon sa propre expérience et de reprendre l'analyse, mais toujours en la décrivant dans la méta-information. Si ces conditions sont remplies, nous considérons la méthodologie comme reproductible, donc «objective».

7.3 Comparaison avec la cartographie de terrain

Il convient finalement d'examiner quelles relations existent entre les linéaments extraits de l'image et la dynamique du glissement. Nous avons choisi d'exprimer cette dernière au moyen de la carte des vitesses dans le glissement du Hohberg, dressée par BEER & RAETZO (1997) et reproduite sur la figure 7.19. Nous avons vectorisé et distingué, sur ce document, les zones restées immobiles des périmètres affectés de déplacements. C'est donc, en toute logique, à l'intérieur de ces derniers que devraient se trouver les champs de linéaments d'extension et les zones de niches d'arrachement. La superposition de ces deux types d'information est représentée sur la figure 7.18, et les carrés de haute densité (NI >35) comparés aux zones d'iso-vitesses dans le tableau 7.1.

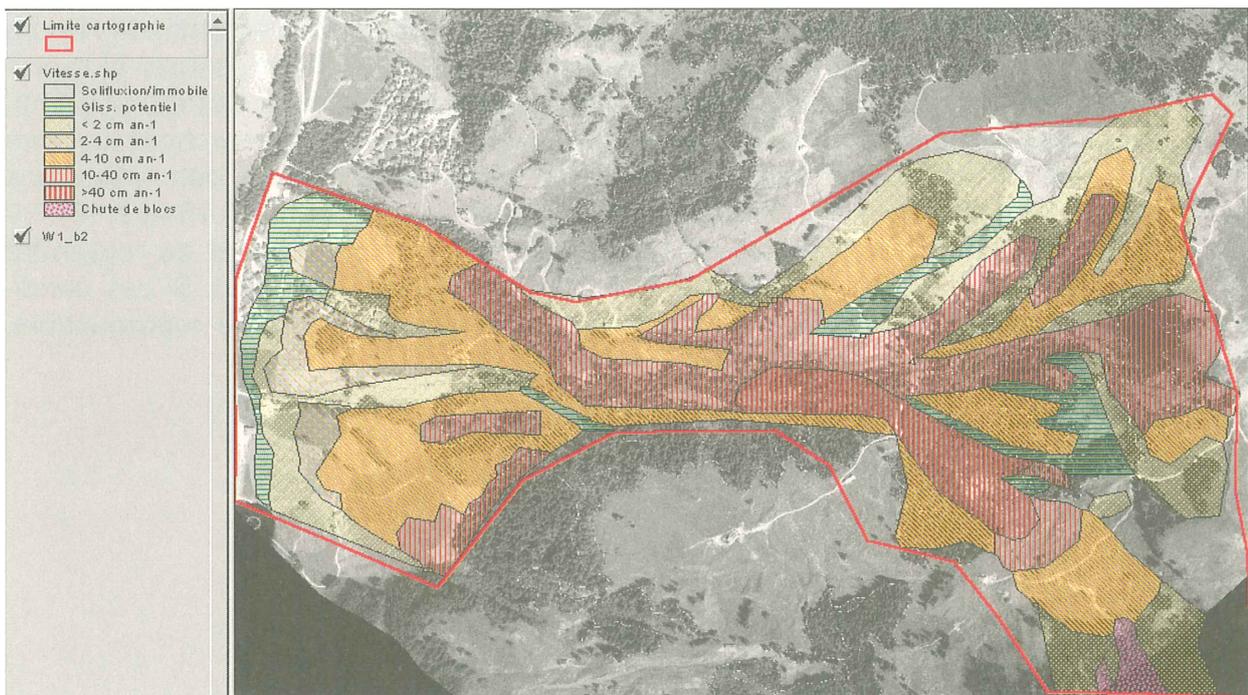


Fig. 7.19: Carte des zones d'iso-vitesses du glissement de Hohberg (vectorisée d'après BEER & RAETZO 1997), superposée à l'image w1_b2.

Tabl. 7.1: Matrice de co-occurrence des linéaments et des zones en mouvement (les cases contiennent le % de classes de vitesse par carré).

Intensité	Carré no					
	7	8	16	18	19	58
Immuable		81		21	41	93
Potentiel				2		
<2 cm an ⁻¹		12			10	7
2-10 cm an ⁻¹		7		20	43	
>10 cm an ⁻¹				56	7	

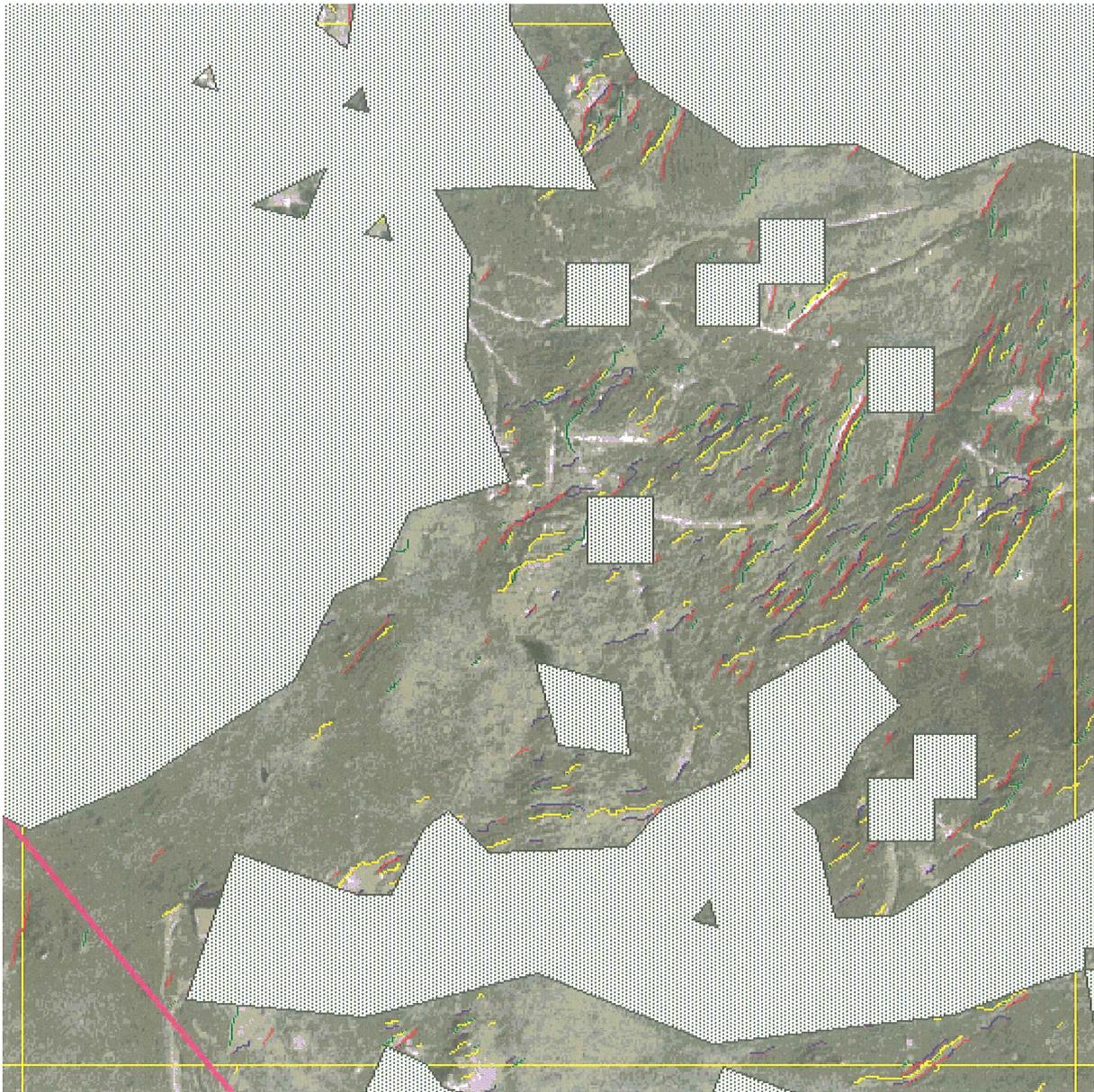


Fig. 7.20: Linéaments dans le carré no 18.

- Sur les six carrés ayant une densité de linéaments supérieure à 35, trois d'entre eux coïncident avec des zones en mouvement (nos. 8, 18 et 19). Le no 18 est représenté sur la figure 7.20, où l'on distingue sans peine les cicatrices d'extension de la zone très active de Guglera.



Fig. 7.21: Linéaments dans le carré no 16.

- Les carrés no 7 et 16 (fig. 7.21) sont situés en dehors de la zone cartographiée. L'interprétation des linéaments est difficile sur la photo, et demanderait à être vérifiée sur le terrain (sentiers de bétail en partie?).

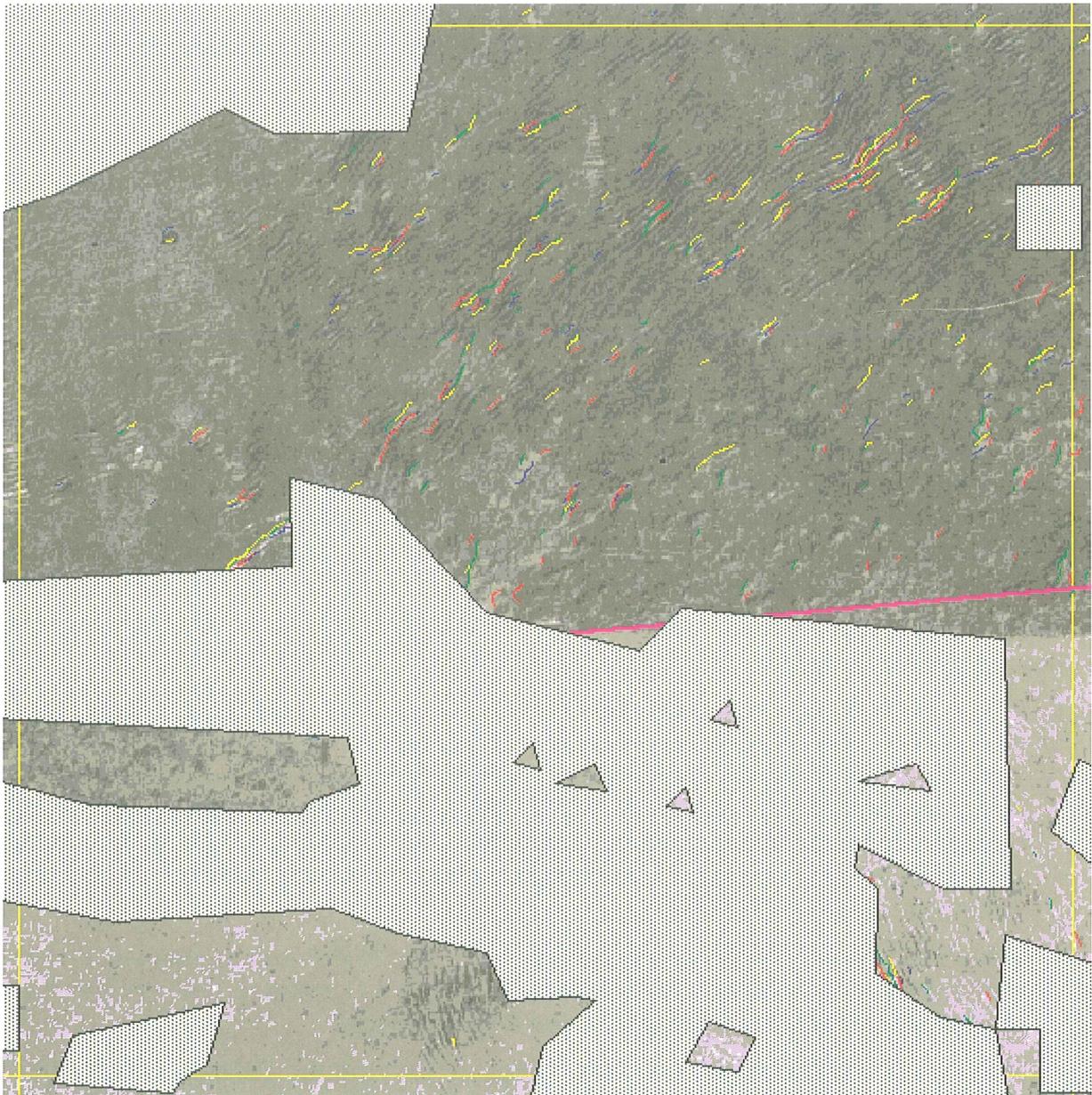


Fig. 7.22: Linéaments dans le carré no 58.

- Il n'en va pas de même pour le carré no 58 (fig. 7.22), où les linéaments sont clairement des sentiers de bétail. Dans ce cas, la réduction de résolution effectuée avant l'estampage directionnel n'a pas suffi pour les filtrer. Ce carré doit être éliminé.

Avant l'interprétation visuelle, le carré 58 est donc affecté d'une erreur par *commission* (LILLESAND & KIEFER 1987). Par contre, eu égard aux opérations de filtrage-débruitage relativement légères qui ont été appliquées, nous pensons que les erreurs par *omission* sont rares dans les zones non-masquées.

Dans les carrés nos. 7 et 16, la présence de linéaments pourrait indiquer la présence de mouvements de terrain non cartographiés.

7.4 Test de variantes de la méthode pour la mise en évidence de bourrelets et de niches

La méthode de base élaborée sur le cas du Hohberg permet d'identifier des signatures topographiques de troisième ordre, en particulier les crevasses d'extension, mais pas les signatures topographiques de premier et de deuxième ordre, telles que les bourrelets, niches d'arrachement secondaires ou convexité de pied. Celles-ci ne présentant aucune signature visible sur les orthophotos disponibles pour la région du Hohberg, des variantes de la méthode ont donc été testées sur d'autres secteurs, dans le but d'identifier ces formes.

Les tests ont été effectués sur des glissements de la vallée des Ormonts, pour lesquels on disposait à la fois de photos aériennes PIR et de levés de terrain détaillés pour contrôle (SCHOENEICH 1995, NOVERRAZ 1986). Les photos aériennes n'étant pas des orthophotos, et ne permettant pas, par conséquent, les opérations de masquage par des données ancillaires, seules les opérations d'analyse d'image proprement dite (dans *COREL PhotoPaint*), soit l'étape 7.1.4. de la démarche-type, ont été appliquées. Quelques résultats sont illustrés ci-après.

Par rapport à la méthode-type détaillée sous 7.1. et dans l'Annexe 1, les variantes ont porté sur les points suivants:

- *Choix de la bande spectrale*: après examen, c'est la composante rouge de la composition colorée (soit originalement la bande PIR) qui a été choisie. Les variations topographiques progressives, caractéristiques des formes de deuxième ordre, apparaissent le mieux dans le rouge, avec un minimum de signatures parasites. La bande verte, qui avait été utilisée au Hohberg, présente trop de signatures parasites liées aux différences d'état de la végétation (champs fauchés/pâturés ou non).
- *Résolution*: avec une résolution de 0,6–1,0 m, les signatures de troisième ordre, recherchées au Hohberg, sont éliminées, mais les signatures plus progressives de deuxième ordre apparaissent mieux à l'estampage.
- *Profondeur d'estampage*: avec une option de profondeur d'estampage de 10 (3 au Hohberg), on met en évidence des variations de tons moins nettes et plus larges.
- Un *second estampage* (profondeur 3) après débruitage ramène les formes détectées à une largeur plus faible, vectorisable comme linéaments selon la suite de la procédure type.
- Le *masquage* n'a été fait, le cas échéant, que sur la base des photos elles-mêmes (masquage des forêts par les tons sombres de la bande rouge, masquage des routes par les tons clairs de la bande verte).

Les résultats (fig. 7.23 à 7.26) montrent que:

- Avec une méthode modifiée (bande rouge, résolution 0,8–1,0 m, profondeur d'estampage 10) il est possible dans les cas favorables de mettre en évidence des formes de deuxième ordre telles que convexité de pied, niches d'arrachement, bourrelets, gradins de glissement rocheux.
- La méthode est par contre très sensible à la direction d'estampage qui, pour un résultat optimal, doit être perpendiculaire aux formes à détecter, soit en général

dans le sens de la pente. Le meilleur résultat a été obtenu avec une direction montante. Dans l'optique d'une méthode semi-automatisée, la confection préalable d'un masque des orientations sur la base du MNA serait donc indispensable.

- Outre les signatures parasites des forêts et des bâtiments, les linéaments confondables avec les formes recherchées sont dus essentiellement aux chemins. Dans le cas d'orthophotos utilisées en conjonction avec des données ancillaires (dans le cas du canton de Vaud on pourrait disposer du plan d'ensemble vectorisé), la plupart des signatures parasites pourraient être éliminées par un masque forêts-bâtiments-chemins.
- Dans un certain nombre de cas, les signatures des formes recherchées sont trop diffuses et ne se distinguent pas du bruit. Les filtres utilisés ne permettent pas de les isoler.

La méthode paraît donc intéressante, mais nécessiterait une validation sur la base d'orthophotos, permettant l'application de la procédure complète.

Fig. 7.23: Exemple 1 – Convexité frontale.



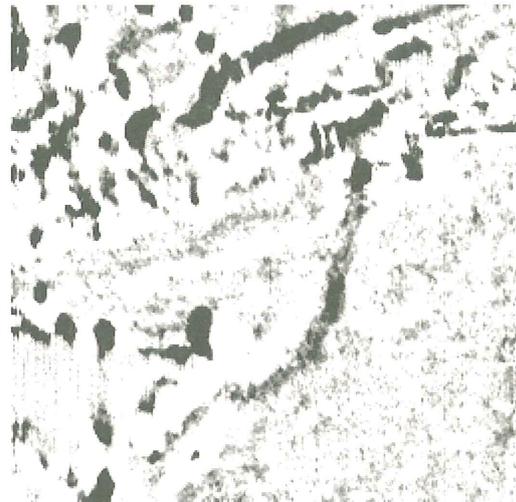
Pied du glissement de la Jorasse (Ormont-Dessus, VD).

Signature spectrale due à une différence d'humidité du talus frontal.

Photo aérienne PIR
Service des forêts VD no 50136
1.7.86, 12h25, alt. 3500 m
éch. d'origine: env. 1:15'000
résolution de scan: env. 0,8 m
Reproduit avec l'autorisation du
Service cantonal des forêts, de la
faune et de la nature du 28.3.2000.



1 – Bande rouge, après contrastage (égalisation d'histogramme, réglage manuel).



2 – Estampage (prof. 10 / niv. 500 / dir. 340°).



3 – Seuillage (seuil 127) + suppression de bruit (2 x).



4 – Estampage (prof. 3 / niv. 500 / dir. 340°) + bruit filtre moyen 5%.

Fig. 7.24: Exemple 2 – Niche d'arrachement.



Glissement au NW des Voëtes
(Ormont-Dessous).

Signature texturale due au contraste
d'ombrage.

Photo aérienne PIR
Service des forêts VD no. 84017
28.9.86, 9h25(?), alt. 3500 m
éch. d'origine: env. 1:15'000
résolution de scan: env. 0,8 m

Reproduit avec l'autorisation du
Service cantonal des forêts, de la
faune et de la nature du 28.3.2000.



1 – Bande rouge, après contrastage (égalisation
d'histogramme, réglage manuel).



2 – Accentuation directionnelle + estampage
(prof. 15 / niv. 500 / dir. 90°).



3 – Seuillage (seuil 127).



4 – Suppression de bruit.

Fig. 7.25: Exemple 3 – Bourrelets.



Glissement du Rachy-Dessous (Ormont-Dessus).

Topographie bosselée, partie amont du glissement.
Signature texturale due à l'effet d'ombrage.

Photo aérienne PIR
Service des forêts VD no. 50136
1.7.86, 12h25, alt. 3500 m
éch. originale: env. 1:15'000
résolution de scan: env. 0,8 m

Reproduit avec l'autorisation du Service cantonal des forêts, de la faune et de la nature du 28.3.2000.



1 – Bande rouge, après contrastage (égalisation d'histogramme, réglage manuel).



2 – Estampage (prof. 10 / niv. 500 / dir. 202°).



3 – Seuillage (seuil 127), suppression de bruit, estampage (prof. 3 / niv. 500 / dir. 202°, filtre moyen (5 %)).



4 – Elimination signatures parasites par masque forêt-bâtiments.

Fig. 7.26: Exemple 4 – Rides longitudinales.



Glissement des Voëttes (Ormont-Dessous)

Glissement secondaire superposé, avec rides et lignes de fluage.

Signature texturale par effet d'ombrage.

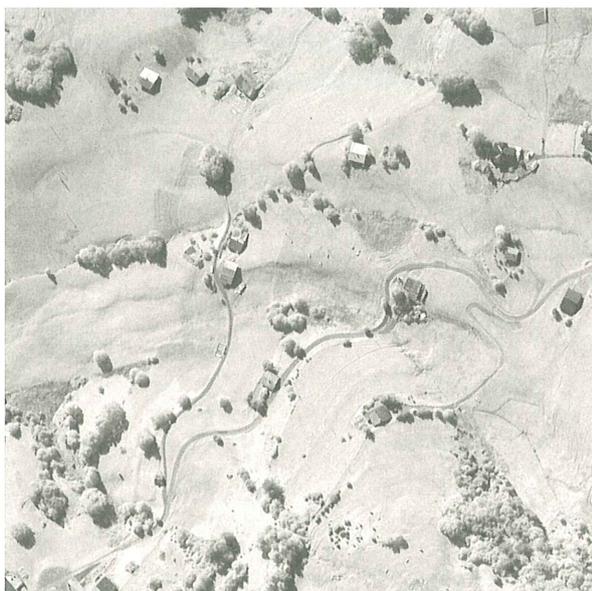
Photo aérienne PIR

Service des forêts VD n° 84017

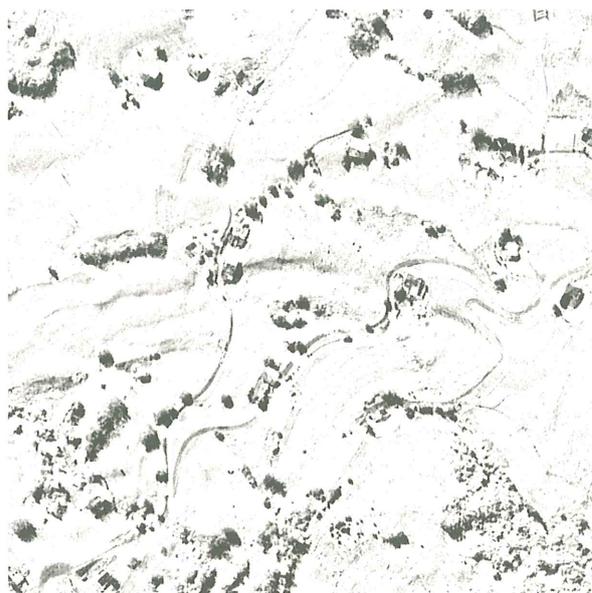
éch. originale: env. 1:15'000

résolution de scan: env. 0,8 m

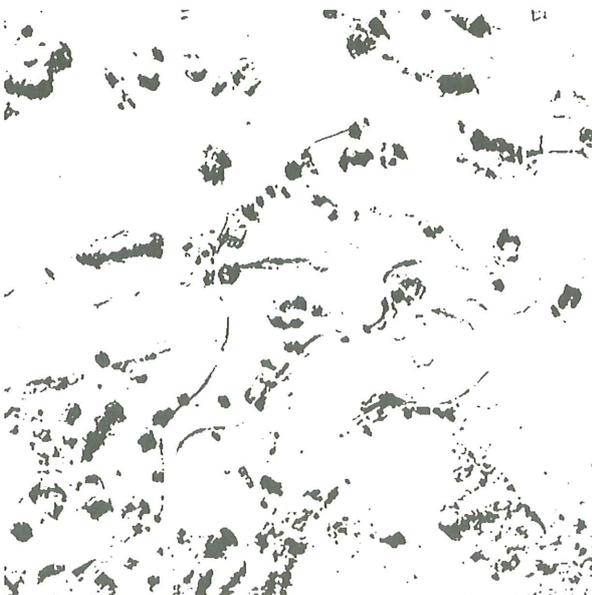
Reproduit avec l'autorisation du Service cantonal des forêts, de la faune et de la nature du 28.3.2000.



1 – Bande rouge, après contrastage.



2 – Estampage.



3 – Seuillage, conversion bitmap.

7.5 Bilan général de l'analyse texturale dirigée

Par rapport aux différents types de signatures détaillés au chapitre 3.2, il apparaît ainsi que:

- Les signatures topographiques de premier ordre, de par leur grande taille, mais aussi du fait que leur visibilité est souvent masquée ou interrompue par la forêt ou d'autres éléments, échappent totalement à la méthode.
- La méthode modifiée appliquée sur les cas des Ormonts permet l'identification de formes topographiques de deuxième ordre telles que les bourrelets, niches, gradins.
- La méthode type mise au point au Hohberg permet l'identification de formes topographiques de troisième ordre, telles que les crevasses d'extension, ainsi que des signatures spectrales dues à la dénudation du sol.

Pour identifier des formes d'ordre de grandeur différents, il faut donc appliquer des méthodes différentes, à tout le moins des variantes de la méthode de base.

8. ANALYSE DIACHRONIQUE

8.1 Approches

La mise en évidence d'indicateurs diachroniques de glissement de terrain exige à la fois la disponibilité de documents multidates aux propriétés comparables et une précision d'orthorectification adaptée aux modifications de surface à relever.

Pour l'ensemble du territoire suisse il existe une base d'archives photographiques qui nous semble offrir ce potentiel de documents diachroniques: il s'agit des photos aériennes de l'Office fédéral de topographie (OFT) servant à la mise à jour des cartes nationales. De plus, actuellement, les développeurs de logiciels de traitement d'image sont de plus en plus nombreux à proposer des outils spécialisés et performants de photogrammétrie numérique fonctionnant dans un environnement bureautique (par exemple Windows PC), tel que le module *OrthoEngine* de la firme PCI ou encore *OrthoBase* d'Erdas.

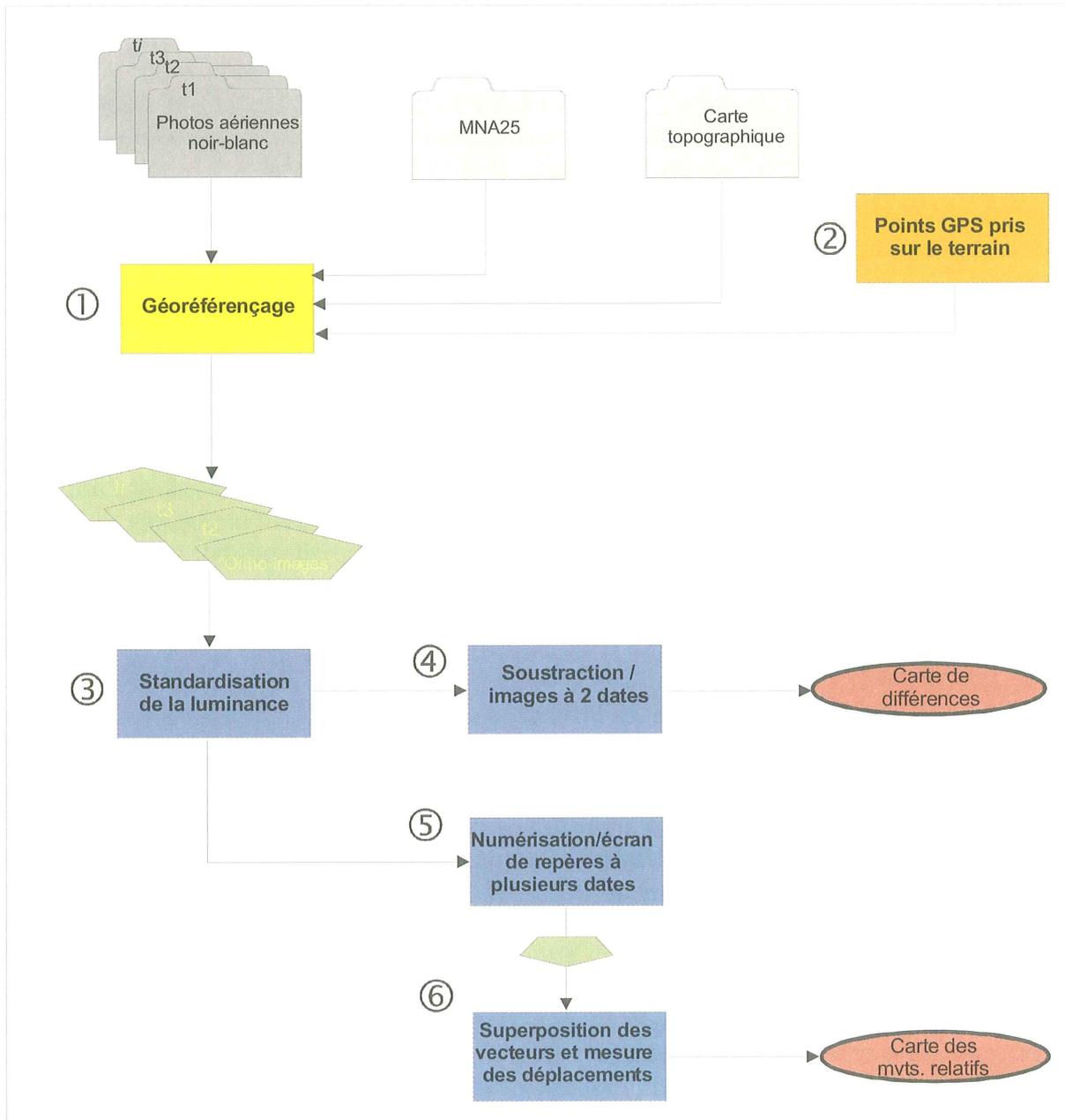
Les expérimentations réalisées dans le cadre de ce projet visent à évaluer l'apport de l'exploitation diachronique de ces photographies aériennes dans l'étude des signatures multitemporelles de glissements de terrain. Comme il a été fait mention plus haut (4.1), deux approches sont envisageables:

- La détection des modifications de relief exprimant des déplacements *verticaux* (abaissement, surélévation).
- La détection de déplacements *horizontaux* exprimés par des différences de positionnement d'objets dans les images.

La première approche n'est pas abordée dans cette étude, car sa mise en œuvre est particulièrement lourde et sa réalisation fait appel à des compétences et des moyens photogrammétriques spécialisés. Dans cette approche il est en effet nécessaire de procéder à une reconstruction exhaustive du relief de la zone à partir de plusieurs photos aériennes (couples), ceci pour chacune des dates considérées. Il s'agit ensuite d'évaluer les variations altimétriques au cours du temps pour ne retenir que celles susceptibles d'exprimer des mouvements de terrain. Si cette démarche est appliquée, c'est dans le cadre d'une analyse locale et détaillée de mouvements de terrain *identifiés* plutôt que dans celui de leur détection. Comme mentionné brièvement au point 5.1, l'interférométrie radar (DIXON 1995, GABRIEL et al. 1989) ou les levés par Lidar (ALACE Project 1999) pourraient apporter cette information de manière plus directe et rapide.

C'est la seconde approche qui sera traitée dans cette étude. Il s'agira de produire des images de différence entre dates qui permettront d'interpréter, soit visuellement, soit de manière semi-automatique, les signatures de changement.

Comme indiqué précédemment, l'interprétation des images de différence diachronique n'a d'intérêt que si la qualité de la précision géométrique des images produites (les orthophotos) est supérieure à l'amplitude des mouvements horizontaux à mettre en évidence. Il s'agit donc avant tout de proposer un contexte de traitement optimal combinant une mise en œuvre la plus simple possible et une qualité de géoréférence suffisante pour la détection de ces signatures diachroniques. Les expérimentations méthodologiques réalisées dans le cadre de ce projet portent donc sur les *orthophotographies numériques* obtenues à partir des photos aériennes de l'OFT selon la méthodologie «élaborée» décrite plus haut (chapitre 6). Les étapes en sont résumées sur l'organigramme de la figure 8.1.



LEGENDE

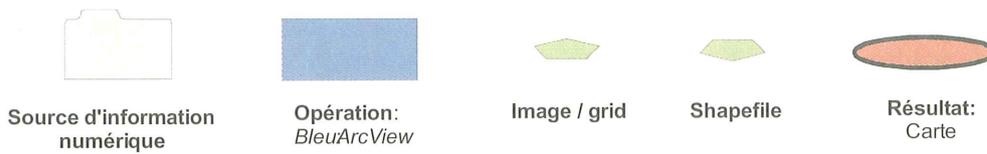


Fig. 8.1: Organigramme de l'analyse diachronique.

8.2 Méthodes d'interprétation des images diachroniques

On trouvera dans EASTMAN & MCKENDRY (1991) un exposé détaillé des méthodes utilisées pour l'exploitation des images diachroniques, généralement satellitaires. Lorsque la série chronologique se limite à deux images, on a recours au calcul des paramètres suivants:

- leur *différence* ou leur *rapport*.

Ces cartes dérivées doivent être recodées avant l'interprétation, afin d'éliminer les différences non-significatives. Les changements mis en évidence en appliquant ces méthodes peuvent provenir des causes suivantes:

1. Orientation et étendue des ombres portées des arbres ou bâtiments (fonction de la date et de l'heure des prises de vue),
2. Etat de la végétation herbacée ou agricole (fonction de la saison),
3. Paramètres photographiques (ton, contraste, gamme dynamique, erreurs de géoréférencage),
4. «Véritables» différences dues aux changements de couverture du sol (constructions) et aux phénomènes géologiques (mouvements, dénudation par érosion, divagation des cours d'eau).

Dans le cas des photos aériennes à haute résolution, les changements parasites (1 à 3) sont particulièrement gênants, au point d'oblitérer les véritables différences.

- *leurs mouvements relatifs*, obtenus par numérisation à l'écran de vecteurs choisis (routes, canaux de drainages) ou recodage de zones à haute luminance (fig. 7.18), suivis de leur superposition sur une base photographique commune. Deux exigences fondamentales sont à remplir pour appliquer avec succès cette méthode. Il faut d'abord que ces formes soient suffisamment étendues pour être identifiées et numérisées sur les orthophotos (donc que l'une de leurs dimensions dépasse celle de la résolution de l'image). Ensuite, il est nécessaire que le déplacement affectant les objets dépasse **en principe 3,5 m** pour la variante «élaborée» (voir 6.3) et **4,2 m** pour la variante «légère» (6.2); remarquons que cette évaluation de déplacement minimal représente la situation la plus défavorable où les erreurs de chacune des orthophotos s'additionnent, ce qui n'est pas forcément le cas.

8.3 Résultats

8.3.1 Cartes de différences

Le principe de cette interprétation est relativement simple puisqu'il s'agit de repérer les objets qui, d'une image à l'autre, ont changé d'emplacement; cela peut être le cas pour des chalets, des routes, des blocs de rochers, des pylônes, etc. La meilleure image de différences semble être celle entre 1997 et 1981 ($\Delta t = 16$ ans), car peu d'infrastructures ont changé durant cette période et le glissement y a été actif.

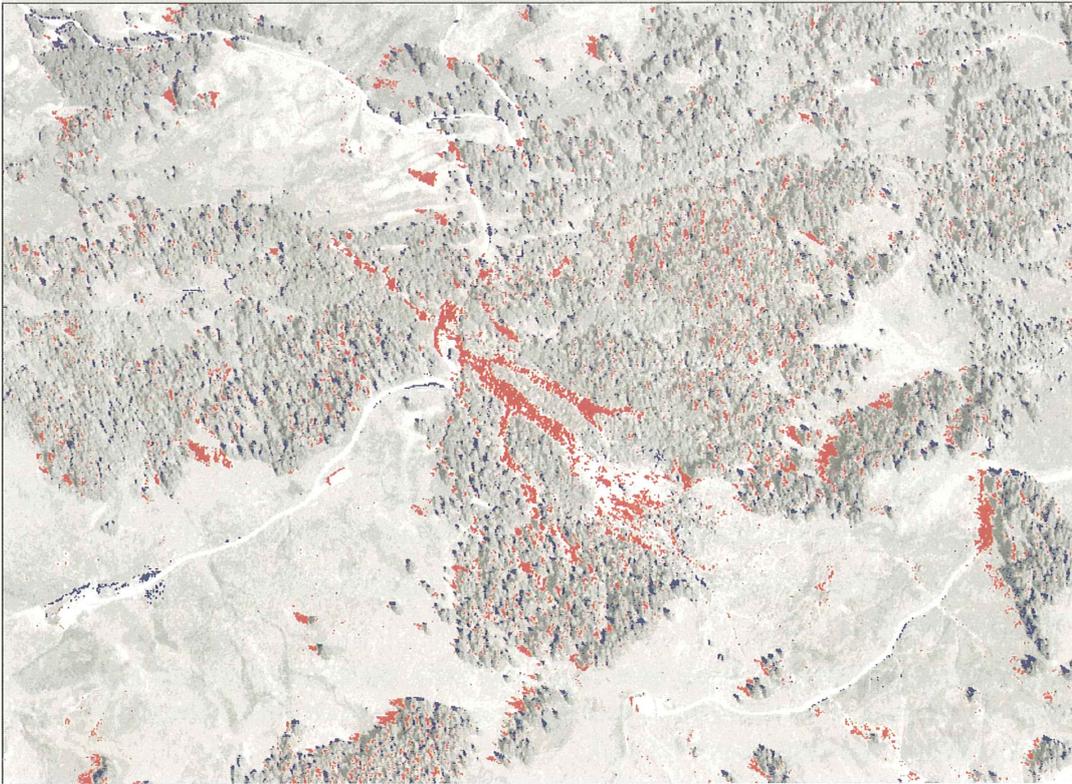


Fig. 8.2: Carte de différences entre les images 1997 et 1981 (*niveaux de gris[oi97] – niveaux de gris[oi81]*), sur fond de l'image *oi97*. Rouge: différences positives. Bleu: différences négatives. Les différences comprises entre la valeur moyenne -2 écart-type ont été considérées comme non-significatives et ne sont pas figurées.

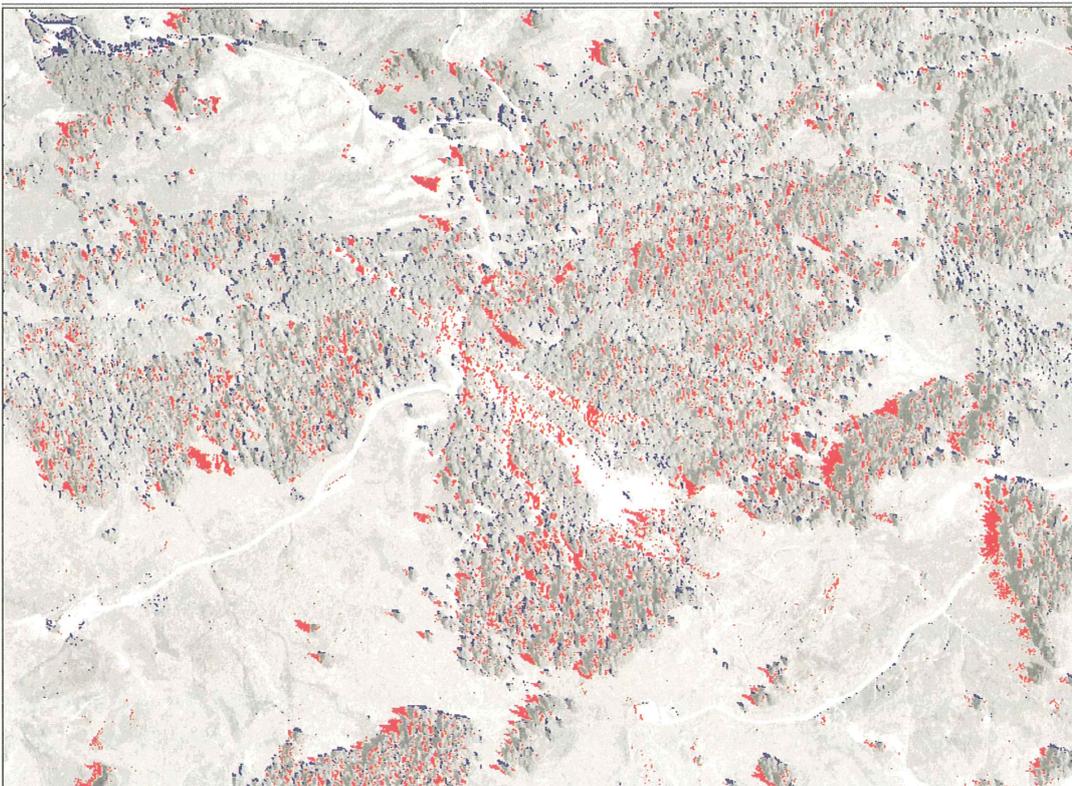


Fig. 8.3: Carte de différences entre les images contrastées 1997 et 1981 (*niveaux de gris[oie97] – niveaux de gris[oie81]*), sur fond de l'image *oi97*. Rouge: différences positives. Bleu: différences négatives. Les différences comprises entre la valeur moyenne -2 écart-type ont été considérées comme non-significatives et ne sont pas figurées.

Les cartes de différences ont été calculées sur des images brutes ou étalées dynamiquement. Des extraits en sont présentés sur les figures 8.2 et 8.3, où les différences comprises entre la moyenne ± 2 écart-type (non-significatives) ont été éliminées.

Bien que l'essentiel des différences apparaissant sur ces cartes proviennent des ombrages de la canopée, on notera tout de même le développement, entre 1981 et 1997, de la coulée principale du glissement située entre Guglera et Udrischa. Par contre, aucune signature univoque de mouvement n'y apparaît.

8.3.2 Déplacements relatifs

Nous avons choisi de numériser les objets vectoriels suivants: les *fossés de drainage* (fig. 8.4) ainsi que les *routes* (fig. 8.5).

Sur la figure 8.4, on observe un certain nombre de décalages entre les fossés de drainage numérisés en 1981 et 1997. Alors que certaines de ces faibles différences sont clairement des artéfacts, d'autres semblent refléter la réalité de mouvements entre ces deux dates: bien que les décalages notés *Mvt 1* (2,5 m) et *Mvt2* (3 m) soient dans les limites de l'imprécision des orthophotos (voir 6.2), leur position et leur orientation sont assez crédibles.

En ce qui concerne les routes, la figure 8.5 révèle deux déplacements dont l'un (*Mvt5* = 19 m), est incontestable. Notons également qu'ils coïncident avec les zones de vitesses maximales cartographiées par BEER & RAETZO (1997).

Par ailleurs, les déplacements *Mvt1* – *Mvt 4* ($\Delta t = 16$ ans) ramenés à une moyenne annuelle correspondent bien aux valeurs de la carte des vitesses.

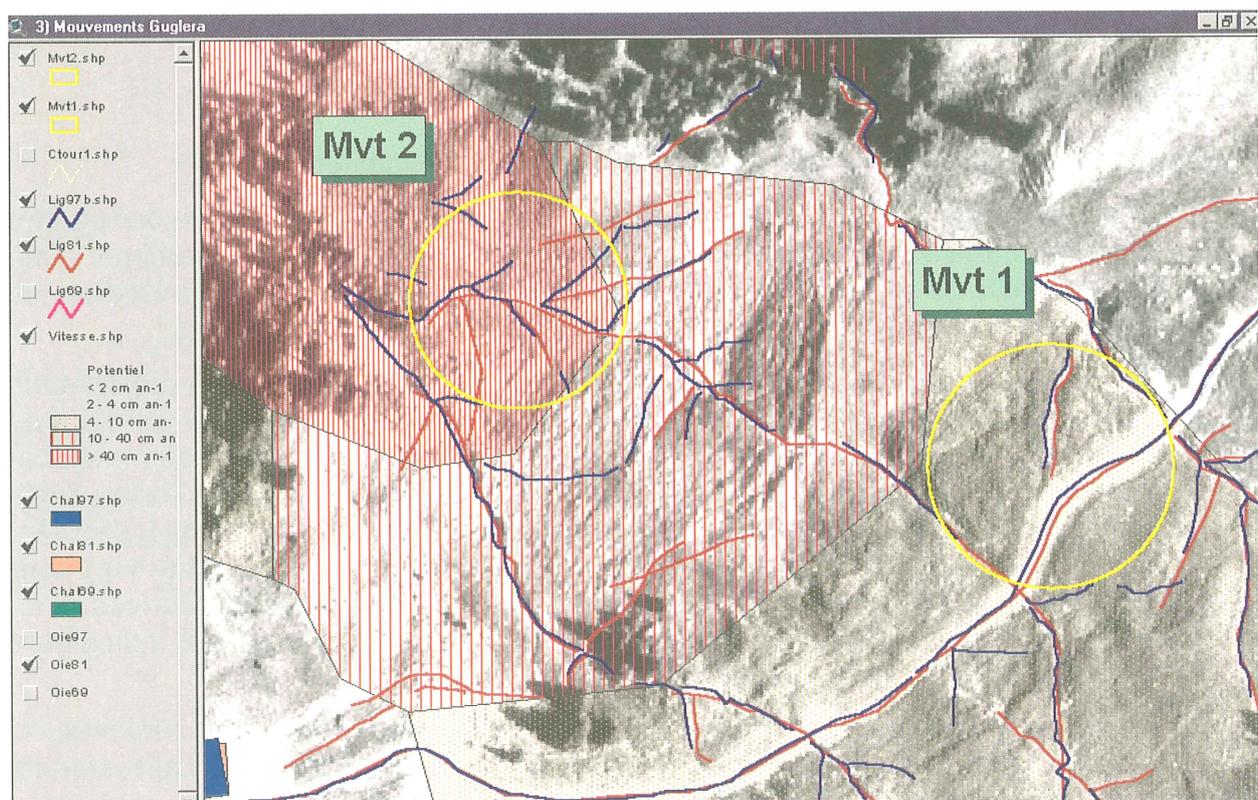


Fig. 8.4: Mouvements relatifs d'une route (*Mvt1*: environ 2,5 m) et de fossés de drainage (*Mvt2*: environ 3 m) entre 1981 et 1997, en dessous de Guglera. Images de fond: carte des vitesses et orthophoto 1981 étalée dynamiquement. Vecteurs: bleu (1997); rouge (1981).

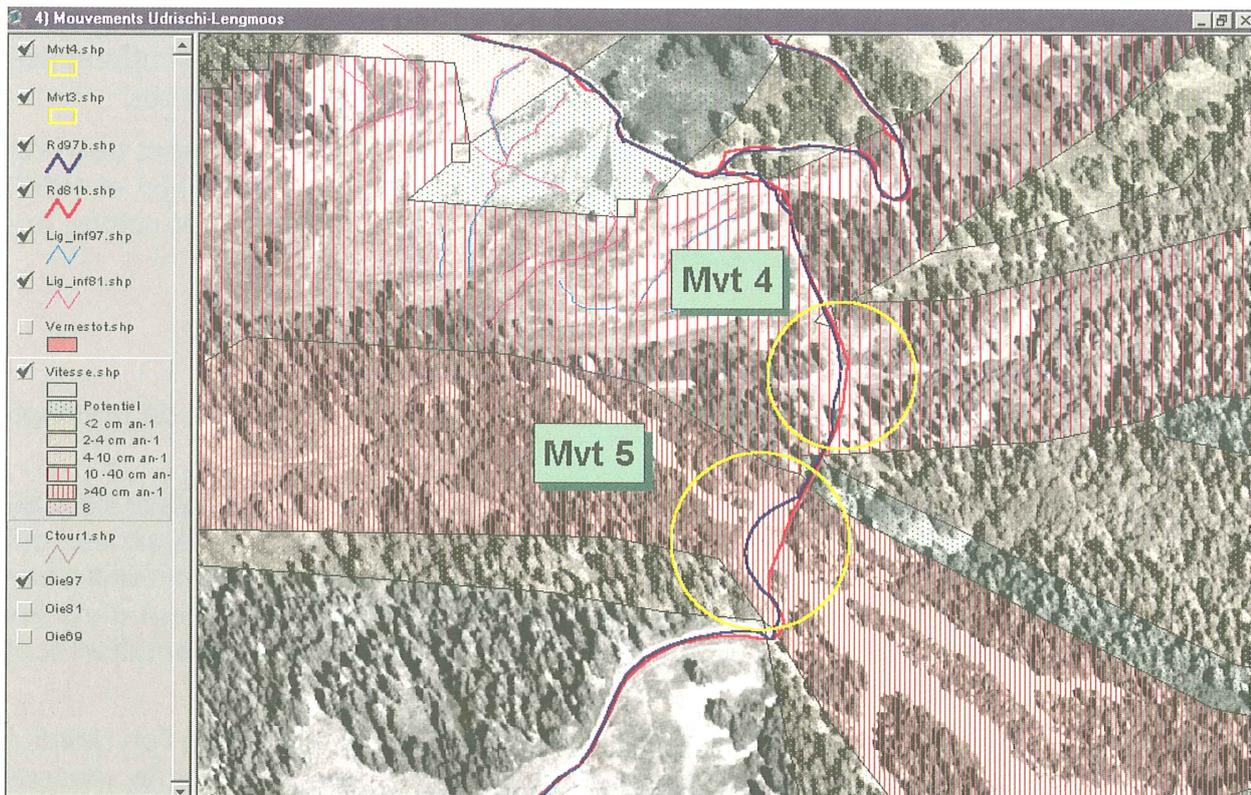


Fig. 8.5: Mouvements relatifs de la route Udrischi–Lengmoos (Mvt5: environ 19 m; Mvt4: environ 5 m) entre 1981 et 1997. Images de fond: carte des vitesses et orth-photo 1997 étalée dynamiquement). Vecteurs: bleu (1997); rouge (1981).

8.4 Bilan général de l'analyse diachronique

A ce stade, l'analyse diachronique a permis de livrer deux types de résultats:

- D'une part, des différences très nettes et facilement reconnaissables ont pu être identifiées, mais pour lesquelles la nécessité d'une analyse diachronique n'est pas absolue, quoique confortable. Il s'agit ici des secteurs amont et médian, en particulier la coulée principale et le tronçon de route qu'elle a emporté.
- D'autre part, des résultats plus nuancés et difficiles à interpréter ont été obtenus dans ces mêmes secteurs. Les décalages observés peuvent avoir ici d'autres causes que le glissement. La difficulté vient également du fait que ces déplacements présentent une amplitude proche de la limite de précision de l'orthorectification. Dans le cas de ce glissement, il n'existe pas d'éléments faciles à délimiter sur photo et qui aient subi un déplacement suffisamment important (>4 m) pour marquer un décalage nettement identifiable sur les images de différences. Il en résulte que cette méthode reste dépendante de la disponibilité de tels indicateurs dont la présence n'est pas assurée.

Les deux types de résultats montrent qu'en cas de présence de ces indicateurs, l'analyse diachronique est une méthode performante pour la détection des glissements de terrain.

9. MISE EN ŒUVRE PRATIQUE

9.1 Equipement et logiciels

L'étude-pilote a été conduite au moyen de l'équipement et des logiciels suivants:

- Ordinateur standard type Pentium 450; 128 MB de mémoire vive; 20 GB de disque dur.
- Périphériques: lecteur de CD, imprimante couleur standard, scanner de bureau format A3.
- Logiciel d'orthorectification: *OrthoEngine* de *PCI*.
- Logiciels de traitement d'image, SIRS et d'analyse visuelle: *ArcView* avec *Spatial Analyst* de *ESRI*, *COREL PhotoPaint* et *Trace*, *Idrisi*.
- Trois projets *ArcView* et trois scripts programmés sous *Avenue*.

Ces moyens sont d'ores et déjà assez largement disponibles dans les administrations et certains bureaux privés, et les logiciels de géomatique enseignés à la plupart des géologues et ingénieurs actuellement en formation. Le contexte informatique actuel (sans parler du futur) se prête donc sans difficultés aux approches numériques.

9.2 Documents

Les documents et données utilisés dans le cadre de cette étude-pilote sont les suivants:

- Documents analogiques: photos aériennes N/B et PIR, cartes topographiques et plan d'ensemble.
- Documents numériques: orthoimage PIR, carte-pixel, plan d'ensemble numérique.
- Données ancillaires: mesures GPS pour amers, rapports et documents publiés.

9.3 Facteur temps

9.3.1 Analyse texturale (unitemporelle)

L'estimation de ces facteurs que nous présentons ici est basée sur la situation suivante:

- Les équipements, logiciels et scripts mentionnés ci-dessus sont disponibles.
- Les données à disposition sont du même type que celles du Hohberg (ortho-photos PIR et cartes numériques).
- La zone à étudier a une surface de 4 km² (soit celle d'une orthophoto PIR).
- La démarche est conduite suivant la méthodologie dans son état actuel par un géologue-géomaticien ayant une pratique des mouvements de terrain.
- Les produits finaux de l'analyse sont (1) *une carte des zones dénudées actives et niches d'arrachement vraisemblables* basée sur l'information de luminance (cf.

fig. 6.6) et (2) *une carte de la densité des linéaments* figurant les zones à vérifier sur le terrain (cf. fig. 6.15 et 6.16) et (3) *un SIRS* sous forme de projets *ArcView*.

Le temps nécessaire pour l'analyse et le rendu des résultats est de *trois jours*.

9.3.2 Analyse diachronique

Cette estimation part du principe que les documents nécessaires à l'orthorectification (photos aériennes – MNA – plan d'ensemble numérisé) sont à disposition:

- la production d'une orthophoto selon la variante «légère» demande *1 jour et demi à deux jours*,
- la durée de l'interprétation dépend de la complexité de la situation; il convient d'y consacrer au moins *un demi-jour par orthophoto*,
- dans le cas de la variante «élaborée», la campagne GPS demande des moyens plus importants, y compris en temps. Pour réaliser les 29 mesures, nous avons eu besoin de 2 jours (bien remplis) à trois personnes (dont une restant à la base fixe). Une fois ces mesures acquises la démarche est la même que celle de la variante «légère» (la lecture des amers sur le plan d'ensemble en moins).

PARTIE 3 – CONCLUSIONS

10. APPORTS DE LA MÉTHODOLOGIE

10.1. Mise en contexte

Partant du principe qu'il existe une volonté nationale et une obligation politique de cartographier les phénomènes de mouvements de terrain en Suisse, il nous paraît important de proposer aux géologues praticiens qui auront à réaliser ces levés une méthodologie aussi *reproductible* que possible.

Comme on l'a vu plus haut et résumé sur la figure 2.1, l'étude appliquée des mouvements de terrain passe par un certain nombre d'étapes, jusqu'alors basées principalement sur des documents et méthodes dits analogiques. La méthodologie proposée ici, dans son état actuel encore expérimental, n'est pas encore applicable à l'identification et à la surveillance des glissements de terrain. Elle représente un *complément* à l'approche traditionnelle et nécessite encore une phase de validation et de simplification sur d'autres secteurs, avant d'être performante et opérationnelle. Elle devrait prendre place au sein d'une *approche intégrant de manière intelligente les avantages respectifs de l'analogique et du numérique*. Celle-ci prendrait la forme d'une séquence formelle d'opérations pré-programmées, mais pourvue de nombreuses possibilités de choix (analogique/numérique, etc) qui permettraient au géologue d'appliquer son expertise de manière souple, tout en documentant aussi exactement que possible la stratégie adoptée (= reproductibilité).

Au terme de trois années d'expériences dans l'application de la télédétection et de l'analyse semi-automatisée de l'imagerie aérienne pour la détection des glissements de terrain, le bilan est relativement négatif. Ces méthodes numériques ne sont pas encore applicables telles quelles par les bureaux privés à la problématique des mouvements de terrain. Néanmoins, quelques éléments permettent d'espérer des développements favorables, dans un avenir proche:

1. Les orthophotos panchromatiques et proche-infrarouge numériques peuvent fournir trois types d'informations sur les mouvements de terrain:

- Signatures linéamentaires (crevasses d'extension, bourrelets et convexité de pied),
- Signatures de luminance (zones dénudées actives et niches d'arrachement), mises en évidence par une *analyse texturale dirigée unitemporelle*.
- Signatures de déplacement, mises en évidence par une *analyse de différences multitemporelle*.

2. La méthodologie proposée consiste en un ensemble d'opérations réalisées semi-automatiquement sur des images numériques (orthophotos et cartes), et pilotées d'une manière documentée par l'analyste. A ce titre, elle s'inscrit bien dans le contexte des Systèmes d'Information du Territoire actuellement mis en place en Suisse. Pour le moment, nous la considérons comme un complément et non un remplacement de l'approche analogique traditionnelle.

3. L'analyse texturale dirigée unitemporelle est réalisée après des opérations de masquage qui éliminent au mieux les zones qui ont trop de linéaments non significatifs (routes, forêts). Un estampage directionnel est ensuite appliqué sur l'orthophoto (résolution de 0,5 m) et l'image ainsi obtenue sert à l'extraction de linéaments qui sont ensuite filtrés et vectorisés. Ces objets linéamentaires sont définis par des descripteurs

morphologiques, ce qui permet une deuxième opération de filtrage sur la base de la longueur et de l'orientation.

4. Le résultat final de l'analyse texturale dirigée unitemporelle est une carte de la densité des linéaments par unité de surface. Un examen à l'écran permet d'en réduire les erreurs par commission.

5. L'analyse texturale dirigée unitemporelle a été calibrée sur le glissement du Hohberg. Elle devra être validée sur d'autres cas.

6. L'application de l'analyse texturale dirigée unitemporelle à une surface de 4 km² (contenue dans une orthophoto PIR) prend actuellement trois jours de travail à un analyste. Après optimisation de la programmation, la durée peut être ramenée à deux jours.

7. Dans l'approche diachronique, la mise en évidence de mouvements relatifs par numérisation à l'écran d'objets vectoriels donne de meilleurs résultats que les cartes de différences.

10.2. Conditions d'utilisation

Il est évident que la méthodologie proposée requiert des données numériques tant sous forme d'images que de cartes. Nous les avons réunies sans trop de difficultés pour la région du Hohberg, et ce serait certainement le cas pour d'autres zones des Alpes ou les Préalpes suisses. Cependant, cette récolte a constitué une partie trop conséquente du temps que nous avons consacré à cette étude. Il faut donc se demander si ce déséquilibre pourrait s'atténuer à l'avenir.

La plupart des cantons et même certaines communes sont en train de se doter de systèmes d'information du territoire. Cette tendance va continuer, mettant à disposition un «cadre numérique» ainsi qu'un certain volume de données de base utilisables par les cartographes. Par ailleurs, les couvertures orthophotographiques numériques sont de plus en plus utilisées comme source d'information, en Europe comme aux Etats-Unis (ROWE et al. 1999, EVANS 1999, BROWN & ARBOGAST 1999, JENSEN & COWEN 1999). Nous pensons donc que les efforts de recherche voire de numérisation des données vont s'alléger progressivement. Le géologue pourra alors se consacrer essentiellement à des tâches d'analyse et d'interprétation.

Que l'exploitation de l'information soit automatique, semi-automatique ou même strictement manuelle, le contexte informatique offre un atout majeur essentiel à toutes ces méthodologies: il homogénéise la nature de l'information à référence spatiale sous une forme numérique et il autorise la géoréférence des informations. Ce second aspect est indispensable à toute exploitation nécessitant la mise en relation de propriétés contenues dans des documents différents. La numérisation des documents et leur géoréférencement ne sont donc pas des contraintes uniquement liées au traitement numérique automatisé, mais des étapes indispensables à la réalisation d'une base de données à référence spatiale intégrée. Cette dernière offre un environnement d'exploitation efficace et confortable, aussi bien pour le domaine de l'interprétation d'image assistée par ordinateur (IIAO) que pour celui du traitement d'image (COLLET 1999).

10.3. Comparaison avec l'approche analogique traditionnelle

Les résultats obtenus par l'analyse diachronique et l'analyse texturale de l'imagerie aérienne ne permettent pas de remplacer l'approche analogique traditionnelle (cartes de phénomènes et cartes de danger) pour l'identification et la surveillance des glissements de terrain. La méthodologie numérique (analyses texturale et diachronique) est encore beaucoup trop lente et il faut compter environ 5 à 6 jours de travail pour couvrir un secteur de 4 km², alors que la cartographie traditionnelle nécessite 2 jours au maximum.

Par contre, le contexte informatique exploitant des documents numériques géoréférencés offre un environnement d'interprétation assistée par ordinateur (IIAO) qui permet à l'analyste la réalisation de la plupart des démarches interprétatives traditionnelles non stéréoscopiques. La confrontation des documents en est beaucoup plus aisée et leur exploitation est enrichie par les capacités de rehaussement visuel offertes par les logiciels de traitement d'image, qu'ils soient à vocation professionnelle ou de bureautique.

Dans son état actuel, la méthodologie d'analyse texturale proposée offre les applications suivantes:

- Screening préliminaire des zones susceptibles d'être le siège de mouvements: la méthode d'analyse linéaire grossière, telle qu'appliquée aux Ormonts (chapitre 7.4) peut aider à repérer des signatures de mouvements de terrain, en complément à l'analyse de la carte topographique et à l'analyse visuelle des photos.
- Repérage des zones de mouvements actifs: l'analyse linéaire fine, telle que mise au point au Hohberg, ainsi que l'analyse spectrale (hautes luminances), peut mettre en évidence les signatures de forte activité, telles que les crevasses de tension et les zones dénudées.
- Ajout cartographique d'objets linéaires sur la carte des phénomènes.

10.4. Comparaison avec la photogrammétrie

La méthode classique d'analyse multitemporelle par comparaison de photos aériennes fait appel aux méthodes de la photogrammétrie. Deux approches principales sont pratiquées:

- la mesure des déplacements horizontaux de repères caractéristiques: avec des restituteurs analogiques ou analytiques (numériques), cette méthode permet d'interpréter des déplacements totaux supérieurs à env. 20 cm sur des photos classiques de l'OFT (KÖLBL & STUBY 1982, DUTI 1985). L'utilisation de méthodes de photogrammétrie numérique sur station graphique, moyennant un travail très précis, permet d'atteindre une précision de l'ordre de 25–30 cm, toujours sur les photos de l'OFT (NOVERRAZ et al. 1998), pour un temps de mise en oeuvre de l'ordre de 10–20 heures pour deux couples de photos ou de l'ordre d'une journée par km² analysé. Ces méthodes nécessitent jusqu'ici des équipements spécialisés. Ils tendent maintenant à être disponibles sur PC, et sont donc à la portée des bureaux privés de photogrammétrie. Il faut toutefois noter que les imprécisions des bases topographiques et la nature des repères utilisés pour le calage peuvent limiter considérablement la précision (Bart 1996).
- la comparaison de modèles d'altitude d'ensemble: appliquée sur des glaciers rocheux, à l'aide d'un restituteur numérique (SMMS = simultanes Monoplotting in multitemporalen Stereomodellen, KÄÄB 1996), cette méthode a une résolution de l'ordre

de 40–60 cm en sens horizontal et de 40 cm en sens vertical sur des photos de l'OFT, et de l'ordre de 15–20 cm en sens horizontal pour des photos à l'échelle 1:4500 à 1:6000 (KÄÄB 1998), pour un temps de mise en oeuvre de l'ordre de 15–20 heures pour deux couples de photos. Une nouvelle approche par photogrammétrie digitale permet de réduire le temps de mise en oeuvre à 10–12 heures pour une précision équivalente (A. Kääb, comm. pers.). Les deux méthodes nécessitent un équipement photogrammétrique et/ou logiciel spécialisé.

A titre de comparaison, la méthode diachronique présentée dans ce rapport atteint une précision de calage de l'ordre de 30 cm (à comparer avec les valeurs de 20–30 cm de la photogrammétrie classique) et une résolution horizontale par rapport au terrain de l'ordre de 2 mètres (à comparer le mieux avec les valeurs de l'ordre du mètre données par BART 1996), pour un temps de mise en oeuvre de l'ordre de 12 à 16 heures par couple d'orthophotos. Soit une précision nettement inférieure, pour un temps de travail équivalent.

Les deux méthodes nécessitent des points de calage stables, dont la précision de repérage tant sur le terrain que sur les photos détermine directement la résolution de l'interprétation. La photogrammétrie présente par contre l'avantage d'utiliser directement l'information tridimensionnelle stéréoscopique contenue dans les couples de photos, alors que la création d'orthophotos nécessite le recours à des données topographiques indépendantes, qui peuvent en limiter la précision.

Compte-tenu de la légèreté du matériel nécessaire (un PC et un logiciel permettant l'orthorectification), la méthode proposée pourrait être concurrentielle par rapport à la photogrammétrie, avec toutefois une précision moindre.

En résumé:

- la méthode n'est pas assez précise, dans l'état actuel (voir plus bas la question du MNA), pour garantir des valeurs de vitesses moyennes annuelles fiables. Pour le suivi détaillé de zones à risques, la photogrammétrie reste incontournable.
- l'investissement en temps reste trop important pour l'utiliser de façon systématique;
- la méthode peut par contre être mise en oeuvre de façon ciblée sur des zones de glissement déjà identifiées ou supposées, pour déterminer un degré d'activité, ou des variations de l'activité au cours du temps.

On constate toutefois que les méthodes de photogrammétrie numérique se rapprochent de la méthode utilisée ici, et que l'allègement des équipements matériels et logiciels les rendent accessibles aux bureaux d'étude. Le temps de mise en oeuvre, et dans une moindre mesure la précision, dépendent beaucoup de l'expertise de l'opérateur: l'association de bureaux de géologie avec des bureaux de photogrammétrie maîtrisant ces techniques semble donc être la meilleure solution actuelle.

10.5. Orthorectification et MNA

La précision de l'orthorectification dépend directement de celle du modèle numérique d'altitudes. Le modèle standard actuellement disponible sur toute la Suisse est le MNT 25 de l'OFT, à maille de 25 m, basé sur la carte nationale au 1:25'000. C'est celui que nous avons utilisé:

- Pour les images Landsat, la résolution du MNT 25, très proche de celle de l'image (30 m), est suffisante et une meilleure précision topographique n'aurait guère de sens.
- Pour l'exploitation des photos aériennes, la résolution et les artéfacts du MNT25 introduisent une limitation importante. La qualité du MNT25 dépend fortement de l'équidistance des courbes de niveau du modèle de base: si la précision est bonne à l'équidistance de 10 m, elle diminue fortement dans les régions basées sur une équidistance de 20 m, et surtout, des ondulations fictives apparaissent dès que la distance horizontale entre 2 courbes dépasse 50 m.

L'expérience a montré également l'importance du contrôler des paramètres d'orthorectification. Le problème se pose pour les documents livrés sous forme déjà corrigée:

- Pour les images radar ERS géocodées GTC, le fournisseur ne donne aucune information sur la procédure de correction et on ignore jusqu'au MNA utilisé !
- Les orthophotos PIR, livrées en tant que telles, malgré une échelle et une résolution nettement supérieures, ne sont pas plus précises que celles réalisées par nos soins sur les photos de l'OFT.

Or, la qualité de l'orthorectification est essentielle au succès de la démarche multitemporelle. Un MNA de meilleure qualité est donc nécessaire. De nombreux cantons envisagent actuellement l'acquisition de MNA à haute précision par des techniques de mesure laser, et de tels MNA devraient donc devenir disponibles dans un proche avenir.

D'autre part, l'exigence de précision de l'orthorectification doit être élevée pour garantir l'identification des déplacements. Cette exigence est supérieure à celle nécessitée pour la planification forestière par exemple. Les mandats d'établissement de couvertures orthophotographiques devraient tenir compte, le cas échéant, de ces différentes utilisations possibles.

11. DÉVELOPPEMENTS FUTURS

Le présent travail est de nature scientifique et exploratoire, et notre méthodologie souffre encore d'imperfections et de lacunes. Pour pouvoir la proposer à la communauté des praticiens, il sera indispensable de procéder à un certain nombre de travaux dans les domaines suivants.

11.1. Extraction de l'information

- Exploiter l'information fournie par la forêt souvent dégradée sur les glissements de terrain au moyen d'une analyse texturale basée soit sur les matrices de co-occurrence (SOH & TSATSOULIS 1999), soit sur les semi-variogrammes (CARR & PELLON DE MIRANDA 1998).
- Tester la possibilité de signatures spectrales de l'imagerie PIR, pour la mise en évidence de signes indirects de mouvements de terrain (végétation et humidité).
- Fusionner, donc préserver, les signatures linéamentaires discontinues par opérations de morphologie mathématique (dilatation/squelettisation).
- Perfectionner la méthode de mise en évidence des formes de deuxième ordre, telles que bourrelets de pied.
- Intégrer l'analyse du relief sur la base du MNA (délimitation des facettes topographiques, direction de pente, etc.) ou sur la base des courbes de niveau (ruptures de pentes, concavités, etc. selon la nouvelle méthode en cours de développement à l'EPFL (FREITAG & NOVERRAZ 2000).

11.2. Validation de la méthodologie

- Appliquer la méthodologie révisée à un minimum de trois autres zones de glissement typiques des conditions alpines et préalpines

11.3. Programmation informatique

- Programmer à l'intérieur d'*ArcView* les opérations actuellement exécutées par *COREL Trace*.
- Incorporer une fonctionnalité de logging/reporting, de façon à conserver une trace automatique des options choisies (= méta-information).

11.4. Harmonisation numérique / analogique

- Inscrire la méthodologie numérique au sein d'une approche plus large incorporant l'interprétation stéréophotographique et le travail de terrain.

BIBLIOGRAPHIE

- ALACE Project (1999): Airborne LIDAR assessment of coastal erosion (ALACE) project. – <http://www.csc.noaa.gov/crs/tcm/index.html>
- ASTÉ, J.-P. & GIRAULT, F. (1995): GIS, SPOT, DEM and morphology of major land movements. – *Landslides. ISL 1992*, Christchurch. Balkema, 3, 1539–1545.
- ATKINSON, P. M. & MASSARI, R. (1998): Generalised linear modelling of susceptibility to landsliding in the Central Apennines, Italy. – *Computers & Geosci.* 24/4, 373–385.
- BART, R. (1996): Grundlagenkartierung mittels Photogrammetrie. – FAN Forum 1996.
- BEER, C. & RAETZO, H. (1997): Rutschgebiet Hohberg–Rohr. Kurzbericht, Stand der Arbeiten. – Intern. Ber. geol. Inst. Univ. Fribourg.
- BOLLINGER, D. & NOVERRAZ, F. (1996): Vereinheitlichung der Aufnahme von Naturgefahren in der Schweiz. Pilotstudie Karte der Bodenbewegungsgefahren 1:25'000. Blatt 1247 Adalboden. – *Geol. Ber. Landeshydrol. u. -geol.* 20.
- BONN, F. & ROCHON, G. (1992): Précis de télédétection. Vol. 1: principe et méthodes. – Presses de l'Univ. Québec/AUPELF.
- BRABB, E. E. (1984): Innovative approaches to landslide hazard and risk mapping. – *ISL 1984*, Toronto, 1, 307–324.
- BRAND, E. W. (1988): Special lecture: Landslide risk assessment in Hong Kong. – *Landslides. ISL 1988*, Lausanne. Balkema, 2, 1059–1074.
- BROWN, D. G. & ARBOGAST, A. F. (1999): Digital photogrammetric change analysis as applied to active coastal dunes in Michigan. – *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing* 65/4, 467–474.
- CARR, J. R. & PELLON DE MIRANDA, F. (1998): The semivariogram in comparison to the co-occurrence matrix for classification of image texture. – *IEEE transactions on Geosci. and Remote Sensing* 36/6, 1945–1952.
- CARRARA, A. (1983): Multivariate models for landslide hazard evolution. – *Math. Geol.* 15/3, 403–426.
- CARRARA, A., CARDINALI, M., GUZZETTI, F. & REICHENBACH, P. (1995): GIS technology in mapping landslide hazard. In: CARRARA, A. & GUZZETTI, F. (Ed.): *Geographical Information Systems in assessing natural hazards* (p. 135–176). – Kluwer, Dordrecht.
- (1998): GIS-based techniques for mapping landslide hazard. – <http://deis158.deis.unibo.it/>
- COUSSOT, P. & MEUNIER, M. (1996): Recognition, classification and mechanical description of debris flows. – *Earth-Sci. Rev.* 40, 209–227.
- DIKAU, R., CAVALLIN, A. & JÄGER, S. (1996): Databases and GIS for landslide research in Europe. – *Geomorph.* 15/3–4, 227–239.
- DIXON, T. H. (1995): SAR interferometry and surface change detection. – Tech. Rep. TR 95-003, Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Sci., Univ. Miami.
- DUTI (1985): Détection et utilisation des terrains instables. Rapport final. – EPFL, Lausanne.
- (1986): Le glissement de Cergnat–La Frasse (Le Sépey–Leysin). Analyse pluridisciplinaire. – EPFL, Lausanne.
- EASTMAN, J. R. & MCKENDRY, J. E. (1991): Change and time series analysis. – IDRISI-UNITAR Workbooks.
- EVANS, J. D. (1999): Interoperable Web-based services for digital orthophoto imagery. – *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing* 65/5, 567–572.
- FLAGEOLLET, J.-C. (1989): Les mouvements de terrain et leur prévention. – Masson, Paris.
- FREITAG, N. & NOVERRAZ, F. (2000): Automatic detection of landslides. – *Landslides. ISL 2000*, Cardiff (sous presse).
- FUJITA, K., OBAYASCHI, S. & KASA, K. (1996): Some aspects of landslide prediction using satellite remote sensing data. – *Landslides. ISL 1996*. Balkema, 3, 1545–1555.

- GABRIEL, A. K., GOLDSTEIN, R. M. & ZEBKER, H. A. (1989): Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. – *J. geophys. Res.: Solid Earth and Planets* 94/B7, 9183–9191.
- HEIM, A. (1932): *Bergsturz und Menschenleben*. – Fretz & Wasmuth, Zürich.
- HUTCHINSON, J. N. (1988): General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. – ISL 1988, Lausanne. Balkema, 1, 3–35.
- IRIGARAY, C., FERNÁNDEZ, T. & CHACÓN, J. (1996): Inventory and analysis of determining factors by a GIS in the northern edge of the Granada Basin (Spain). – *Landslides*. ISL 1996. Balkema, 3, 1915–1921.
- JAQUET, J.-M., COLLET, C. & SPICHER, M. (1998): Mise en évidence des zones d'instabilité de terrain par analyse d'images aériennes à haute résolution: étude-pilote sur le glissement du Hohberg (Canton de Fribourg). – *Rapp. FE/BUWAL/310.97.XII, UTED-S, Univ. Genève; Inst. Géogr., Univ. Fribourg*.
- JENSEN, J. R. & COWEN, D. C. (1999): Remote sensing of urban/suburban infrastructure and socio-economic attributes. – *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing* 65/5, 611–624.
- KÄÄB, A. (1996): Photogrammetrische Analyse von Gletschern und Permafrost. – *Vermessung Photogrammetrie Kulturtechnik* 12/96, 639–644.
- (1998): Oberflächenkinematik ausgewählter Blockgletscher des Oberengadins. In: *Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie*. – *VAW Mitteilungen* 158, 121–140.
- KASA, H., KURODAI, M., KOJIMA, H. & OBAYASHI, S. (1991): Study on landslide prediction model using satellite remote sensing data and geographical information. – *Landslides*. ISL 1992, Christchurch. Balkema, 2, 938–988.
- KIENHOLZ, H. & KRUMMENACHER, B. (1995): Légende modulable pour la cartographie des phénomènes. – *Dangers naturels – recommandations*. OFEE/OFEFP, Berne.
- KINGSBURY, P. A., HASTIE, W. J. & HARRINGTON, A. J. (1991): Regional landslip hazard assessment using a Geographic Information System. – *Landslides*. ISL 1992, Christchurch. Balkema, 2, 995–999.
- KÖLBL, O. & STUBY, J.-J. (1982): Mesure du déplacement du terrain à l'aide de photographies multitemporaires. – *Mensuration, Photogrammétrie, Génie rural* 11/82, 350–354.
- LATELTIN, O. (1997): Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. – *Dangers naturels – recommandations*. OFAT/OFEE/OFEFP, Berne.
- LATELTIN, O., BEER, C., RAETZO, H. & CARON, C. (1997): Instabilités de pente en terrain de flysch et changements climatiques. – *Rapport final PNR 31, vdf Hochschulverlag, Zürich*.
- LIENER, S., KIENHOLZ, H., LINIGER, M. & KRUMMENACHER, B. (1996a): SLIDISP. A procedure to locate landslide prone areas. – *Landslides*. ISL 1996. Balkema, 1, 279–284.
- LIENER, S., LINIGER, M., KRUMMENACHER, B. & KIENHOLZ, H. (1996b): Abgrenzung rutschgefährdeter Gebiete. Entwicklung eines Dispositionsmodells. – *Interpraevent 1996, Garmisch-Partenkirchen*, 3, 151–160.
- LILLESAND, T. M. & KIEFER, R. W. (1987): *Remote sensing and image interpretation*. – Wiley & Sons, New York.
- LOAT, R. & PETRASCHECK, A. (1997): Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. – *Dangers naturels – recommandations*. OFEE/OFAT/OFEFP, Berne.
- MANI, P. & GERBER, B. (1992): Geographische Informationssysteme in der Analyse von Naturgefahren. – *Interpraevent 1992, Bern*, 3, 97–108.
- MANTOVANI, F., SOETERS, R. & WESTEN, C. J. VAN (1996): Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. – *Geomorph.* 15/3–4, 213–225.
- MCDERMID, G. J. & FRANKLIN, S. E. (1994): Spectral, spatial and geomorphometric variables for the remote sensing of slope processes. – *Remote Sensing of Environ.* 49/1, 57–71.

- MEUNIER, M. (1994): Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels. – *Houille Blanche* 94/3, 25–31.
- NOVERRAZ, F. (1986): Carte des instabilités du Canton de Vaud. – Service de l'Aménagement du Territoire, Vaud.
- NOVERRAZ, F., BONNARD, C., DUPRAZ, H. & HUGUENIN, L. (1998): Grand glissements de versants et climat. – Rapport final PNR 31, vdf Hochschulverlag, Zürich.
- PIKE, R. J. (1988): The geometric signature: quantifying landslide terrain types from digital elevation models. – *Math. Geol.* 20/5, 491–511.
- POWERS, P. S., CHIARLE, M. & SAVAGE, W. Z. (1996): A digital photogrammetric method for measuring horizontal surficial movements on the Slumgullion earthflow, Hinsdale county, Colorado. – *Computers & Geosci.* 22/6, 651–663.
- ROWBOTHAM, D. N. & DUDYCHA, D. (1998): GIS modelling of slope stability in Phewa Tal watershed, Nepal. – *Geomorph.* 26/1–3, 151–170.
- ROWE, J. P., WARNER, T. A., DEAN, D. R. & EGAN, A. F. (1999): A remote sensing strategy for measuring logging road system length from small-format aerial photography. – *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing* 65/6, 697–704.
- SCANVIC, J.-Y. (1994): Observation spatiale et SIG: des outils pour cartographier les zones sensibles aux mouvements de terrain. – *Mappemonde* 94/4, 44–47.
- SCHOENEICH, P. (1995): Les glissements de terrain des Ormonts. – Rapp. non-publ. Inst. Géogr. Univ. Lausanne.
- SHU-QUIANG, W. & UNWIN, D. J. (1992): Modelling landslide distribution on loess soils in China: an investigation. – *Int. J. Geographical Information Systems* 6/5, 391–405.
- SOH, L. K. & TSATOULIS, C. (1999): Texture analysis of SAR sea ice imagery using gray level co-occurrence matrices. – *IEEE transactions on Geosci. and Remote Sensing* 37/2, 780–795.
- SUTER, C., JAQUET, J.-M. & WAGNER, J.-J. (1997): Evaluation du potentiel des images radar pour l'analyse et le suivi des mouvements de terrain dans la zone-test d'Adelboden. – Rapp. final FE/BUWAL/310.96.XIV, UTED-S, CERG, Univ. Genève.
- TERRETTAZ, P. (1998): Délimitation des agglomérations et segmentation urbaine à l'aide d'images satellitaires SPOT-HRV. – Thèse Inst. Géogr. Univ. Fribourg.
- TRIPET, J.-P., BOLLINGER, D. & NOVERRAZ, F. (1993): Cartes de mouvements de terrain: proposition de légende. In: SCHOENEICH, P. & REYNARD, E. (Ed.): *Cartographie géomorphologique, cartographie des risques* (p. 67–73). – Trav. Rech. Inst. Géogr. Lausanne 9.
- VARNES, D. J. (1984): *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. – UNESCO, Paris.
- WAGNER, A. (1992): Cartes d'aléas en terrains rocheux et meubles établies par traitement informatique: exemple de la région d'Isérables en Valais. – *Interpraevent* 1992, Bern, 6, 201–212.
- WAGNER, A., LEITE, E. & OLIVIER, R. (1988): Rock and debris-slides risk mapping in Nepal. A user-friendly PC system for risk mapping. – *Landslides. ISL 1988, Lausanne. Balkema*, 2, 1251–1258.
- WESTEN, C. J. VAN (1993): GISSIZ. Training package for geographic information systems in slope instability zonation. – ITC-Publication 15/1, Enschede.
- WLADIS, D. (1999): Automatic lineament detection using digital elevation models with second derivative filters. – *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing* 65/4, 453–458.
- WYLER, N. (1997): Réalisation d'un Modèle Numérique d'Altitude optimisé pour le canton de Genève. – Mém. de géomatique, UTED-S, Univ. Genève.

Geologische Berichte Rapports géologiques Rapporti geologici

Diffusion:

Service hydrologique et géologique national, CH-3003 Berne

Nr. 1	1987	TJ. PETERS, A. MATTER, H.-R. BLÄSI, A. GAUTSCHI Sondierbohrung Böttstein – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 2	1987	A. ESCHER, H. MASSON, A. STECK Coupes géologiques des Alpes occidentales suisses	épuisé
Nr. 3	1988	A. PUGIN Carte des isohypses de la base des sédiments du Quaternaire	Fr. 10.–
Nr. 4	1988	M. BURKHARD Horizontalschnitt des Helvetikums der Westschweiz	Fr. 10.–
Nr. 5	1988	A. MATTER, TJ. PETERS, CH. ISENSCHMID, H.-R. BLÄSI, H.-J. ZIEGLER Sondierbohrung Riniken – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 6	1988	A. MATTER, TJ. PETERS, H.-R. BLÄSI, J. MEYER, H. ISCHI, CH. MEYER Sondierbohrung Weiach – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 7	1988	A. ESCHER Structure de la nappe du Grand-Saint- Bernard entre le val de Bagnes et les Mischabel	Fr. 10.–
Nr. 8	1988	A. MATTER, TJ. PETERS, H.-R. BLÄSI, F. SCHENKER, H.-P. WEISS Sondierbohrung Schafisheim – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 9	1989	TJ. PETERS, A. MATTER, H.-R. BLÄSI, CH. ISENSCHMID, P. KLEBOTH, CH. MEYER, J. MEYER Sondierbohrung Leuggern – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 10	1989	TJ. PETERS, A. MATTER, J. MEYER, CH. ISENSCHMID, H.-J. ZIEGLER Sondierbohrung Kaisten – Geologie	Fr. 60.–
Nr. 11	1989	P. JEANBOURQUIN, M. BURRI La zone de Sion-Courmayeur dans la région du Simplon	Fr. 10.–

Nr. 12	1990	H. DRONKERT, H.-R. BLÄSI, A. MATTER Facies and Origin of Triassic Evaporites from the NAGRA Boreholes, Northern Switzerland	Fr. 50.-
Nr.13	1990	B. Keller, H.-R. Bläsi, N.H. Platt, P.S. MOZLEY, A. MATTER Sedimentäre Architektur der distalen Unteren Süsswassermolasse	épuisé
Nr. 14	1992	P. DIEBOLD, H. NAEF, M. AMMANN Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz (regionale Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen)	Fr. 80.-
Nr. 15	1992	A. SPICHER (†) Verzeichnis der geologischen und tektoni- schen Karten und Kartenskizzen der Schweiz 1930-1950 (Neudruck)	Fr. 20.-
Nr. 16	1993	M. AMMANN, P. BIRKHÄUSER, H.-R. BLÄSI, J.-M. LAVANCHY, S. LÖW, B. MEIER, W.H. MÜLLER Untere Süsswassermolasse im Erdsondenfeld Burgdorf. Charakterisierung mittels Geologie, Petrophysik und Fluid Logging	Fr. 40.-
Nr. 17	1994	Y.P. BONANOMI, E.R. MÜLLER, W.K. NABHOLZ, H. SCHEIWILLER Zur Hydrogeologie des Bergsturzgebietes im Raum Flims	Fr. 25.-
Nr. 18	1994	M. THURY, A. GAUTSCHI, M. MAZUREK, W.H. MÜLLER, H. NAEF, F.J. PEARSON S. VOMVORIS, W. WILSON Geology and Hydrogeology of the Crystalline Basement of Northern Switzerland	Fr. 80.-
Nr. 19	1996	C. SCHINDLER, C. BEER, D. MAYER-ROSA, E. RÜTTENER, J.-J. WAGNER, J.-M. JAQUET, C. FRISCHKNECHT Integrierte Auswertung von seismischen und bodenspezifischen Parametern: Gefährdungskarten im Kanton Obwalden	Fr. 25.-
Nr. 20	1996	C. BOLLINGER, F. NOVERRAZ Vereinheitlichung der Aufnahme von Naturgefahren in der Schweiz, Pilotstudie, Karte der Bodenbewegungsgefahren 1:25' 000, Blatt 1247 Adelboden	Fr. 35.-
Nr. 21	1997	J. DOLLINGER Geologie und Hydrogeologie der Unteren Süsswassermolasse im SBB-Grauholztunnel bei Bern	Fr. 40.-

Nr. 22	1998	P. KELLERHALS, A. ISLER (GEOLOGENGRUPPE LÖTSCHBERG-BASISTUNNEL) Lötschberg-Basistunnel: Geologische Voruntersuchungen und Prognose	épuisé
Nr. 23	1999	M. THURY, P. BOSSART Mont Terri Rock Laboratory: Results of the Hydrogeological, Geochemical and Geotechnical Experiments Performed in 1996 and 1997	Fr. 60.-
Nr. 24	1999	T. NOACK, D. FÄH, P. KRUSPAN Erdbebenmikrozonierung für den Kanton Basel-Stadt	Fr. 35.-
Nr. 25	2000	J.-J. WAGNER, C. FRISCHKNECHT, P. ROSSET, M. SARTORI, C. SCHINDLER, C. BEER, D. MAYER-ROSA, E. RÜTTENER, P. SMIT Contribution au zonage sismique dans la vallée du Rhône, entre Sion et Brigue - Beitrag zur seismischen Zonierung des Rhonetals zwischen Sitten und Brig	Fr. 40.-
Nr. 26	2000	D. MAYER-ROSA, M.-J. JIMÉNEZ Seismic Zoning - State-of-the-art and recommendations for Switzerland	Fr. 65.-
Nr. 27	2000	J.M. JAQUET, P. SCHOENEICH, C. COLLET, M. SPICHER, O. LATELTIN Analyse semi-automatisée de l'imagerie aérienne et détection des glissements de terrain: possibilités et limites	Fr. 40.-

ANNEXE 1

MARCHE À SUIVRE DE L'ANALYSE TEXTURALE DIRIGÉE

Clés

Bleu: commandes dans les logiciels. Souligné: logiciels ou scripts Avenue. Italique: fichiers; ceux marqués en jaune représentent des résultats.

1. Rectification des stéréphotos OFT

2. Définition du cadre géographique

Fenêtre w1:

588891.76 591335.26

169092.59 170790.34

Fenêtre w3:

590557.7490 591040.2490

169279.8865 169634.8865

3. Extraction des images

- **ArcView (*aav_LN1.apr* / Vue 1: Général)**

3.1 Ouvrir projet *proj_ln_1.apr* (avec extensions Spatial Analyst et Xtools, et scripts GRID CLIPTOPOLY, GRID2IMG, R2VPOLY, CLIPPO4)

3.2 Add image *fr961083.tif* (avec *.*tfw*) (24 bits).

3.3 Image to Grid: *hoh1*, *hoh2*, *hoh3*. Suite de l'analyse sur *hoh2*.

3.4 Rectangle d'extraction *w1*.Graphics, puis Graphic to Shape.

3.5 Extraction

Activer thème *w1*, open table, select feature 1 (jaune)

Add *hoh2*,

Run script **GRID CLIPTOPOLY** (bouton carré/point) → *Extr1*. Delete theme, save project.

Xtools: rename *Extr1* en *w1b2*.

3.6 Convertir le grid *w1b2* en ***w1b2.tif***.

Run script **GRID2IMG** (bouton diamant) → ***w1_b2.tif*** et *w1_b2.tfw*.

- **COREL PhotoPaint**

3.7 Dégradation de la résolution de 0,25 à 0,5 m pour *w1_b2*. A l'ouverture, option Ré-échantillonner l'image. Largeur / Hauteur: 50%. → ***w50.tif***.

- **Notepad**

3.8 Créer le fichier *w50.tfw* à partir de *w1_b2.tfw* (0.50 /0 / 0/ -0,50 / 58891.7575 / 170790.3433)

Tabl. A1.1: Opérations de masquage

Nom du masque	Donnée-source	A partir du fichier	Annule si:	Résolution (m)
<i>mask1</i>	MNA: pente topographique	<i>slope1</i>	<9 degrés	2
<i>mask2</i>	Pixelkarte: forêt (vert)	<i>wton1</i>	= 1	2
<i>mask3_7</i>	Pixelkarte: traçage des routes + tampon de 7 m	<i>situ1</i>	<1	2
<i>mask4</i>	Orthophoto PIR, fenêtre W1, bande 2: ombres + forêts	<i>w1b2</i>	≤ 85	0,25
<i>R200, R210</i>	Orthophoto PIR, fenêtre W1, bande 2: haute réflectance	<i>W1b2</i>	<200, <210	2
<i>mask5</i>	Orthophoto PIR, fenêtre W1, bande 2: haute réflectance	<i>w1b2</i>	>200	2
<i>mask123_7</i>	Superposition (multiplication) des masques 1, 2 et 3_7		≠ 1	2
<i>masktot</i>	Superposition (multiplication) des masques 1, 2, 3_7, 4 et 5		≠ 1	0,5
<i>masktot_8</i>	Dilatation de <i>masktot</i> d'un tampon de 8 m et dégradation de la résolution	<i>masktot</i>	≠ 1	5
<i>masktot_8</i>	Polygonisation (<i>grid to shape</i> dans <i>ArcView</i>)	<i>masktot8</i>	≠ 1	—

4. Confection des masques

- **ArcView (aav_LN1.apr)**

4.1 Masque de pente (Vue 2)

Surface / Derive slope de *mna1* → *slope1*.

Map Query: *slope1* ≥ 9 → ***mask1***.

4.2 Masque d'orientation (Vue 3)

Surface / Derive orientation de *mna1* → ***aspect***.

Analysis / Reclassify *aspct* → ***aspctr***. Quatre classes centrées sur N (1), E (2), S(3) et W(4).

Convert to shapefile *aspctr* → ***aspct3.shp***.

Convert *aspect* to square polygons using script **R2VPOLY** → ***aspec.shp***.

4.3 Masque des forêts «topographiques» (Vue 4)

Map Query: *wton1* <> 1 → ***mask2***.

4.4 Masque des ombres portées et forêts «ortho» (Vue 4)

Map Query: *w1b2* ≤ 85 → ***mask4***.

4.5 Masque des routes «élargies» (Vue 5)

Digitalisation sur écran des rtes principales sur fond *situ1* et conversion en shp → *routes.shp*.

Convert shape to grid → *rtes*.

Find distances to *rtes* → *dist_rtes*.

Map Query: *dist_rtes* > 7 → ***mask3_7***.

4.6 Zones et masques de haute luminance (Vues 6 et 7)

Map Query: $w1b2 > 200 \rightarrow R200a$

Map Query: $w1b2 > 210 \rightarrow R210a$

Map Query: $w1b2$ entre 215 et 240 $\rightarrow R_96_215-240$

Map Query: $w1b2 > 200 \rightarrow mask5$.

Les cartes des zones de haute luminance sont définies ainsi: **R200a+R210a** ou **R215-240** masquée par **mask2 + mask3_7 + mask4**, avec un carroyage de 243m obtenu à partir du script **CLIPPO4** ($\rightarrow grille.shp$). Le carroyage facilite le balayage visuel et la sélection des niches d'arrachement (Vue 7).

4.7 Superposition des masques (Vue 8)

Analysis/Properties: 2 m resolution.

Map Calculator: $mask1 + mask2 + mask3_7 = mask123_7$.

Map Calculator: $mask123_7 + mask4 + mask5 = masktot$.

4.8 Dilatation de masktot et dégradation de la résolution (Vue 8)

Analysis/Properties: 5 m résolution.

Choisir la table de masktot et sélectionner valeurs zéro.

Find Distance $\rightarrow dist_8$.

Map Query: $dist_8 > 8 \rightarrow masktot8$.

Theme/Convert to Shapefile $\rightarrow masktot8.shp$.

5. Extraction des linéaments

• COREL PhotoPaint

5.1 Image Réglage/Egaliser les niveaux/Détourage val. d'entrée: 35–244 $\rightarrow w50_e$.

5.2 Effets/Accentuation/Accentuation directionnelle/Pourcentage: 75 $\rightarrow w50_es$.

5.3 Effets 3D/Estampage: Couleur: gris; Profondeur: 3; Niveau: 317; Angles solaires: 90 (= du Nord) **w50_h1**. 0 (= de l'Est) $\rightarrow w50_h2$. 270 (= du Sud) $\rightarrow w50_h3$. 180 (= de l'Ouest) $\rightarrow w50_h4$.

5.4 Image/Transformer/Seuil: 180 $\rightarrow w50_hit$.

5.5 Effets/Bruit/Suppression du bruit: 2 passages $\rightarrow w50_hin$.

5.6 Image/Convertir en Noir et Blanc: Dessin au trait/128. Image/Transformer/Inverser $\rightarrow w50_hib$.

• COREL Trace

5.7 Charger **w50_hib**. Paramètres de vectorisation: Axe / Réduction Points = 0 / Réduction bruit = 5 (sans effet) / Itérations = 20 (défaut). $\rightarrow w50_hib0.dxf$.

- 6.4 Elimination des linéaments trop courts (Vue 5)
 Xtools/Update ...Length sur *lini.shp*.
 Table/Query: Length < 1.5 /New set.
 Table/Start Editing.
 Edit/Delete Records (élimine les enregistrements sélectionnés).
 Table/Save Edits.
- 6.5 Copie de sauvegarde de *lini.shp*
 Xtools/ Manage Shapefiles /Copy *lini.shp* → *linix.shp*.

7. Morphologie des linéaments

- **ArcView** (avec LINEAM_AZI_3, TRI_ORIENT ET CLIPPO4; *aav_LN3.apr*)

7.1 Morphologie des linéaments

Pour chaque orientation (*linix.shp*), exécuter le script LINEAM_AZI_3. La table correspondante est augmentée des colonnes suivantes:

- *Length*: Longueur réelle (en m).
- *Line_Eq_L*: Longueur de la droite équivalente reliant les deux extrémités.
- *RatioL/L*: Rapport (Longueur équivalente) / (Longueur réelle).
- *Azimuth* de la ligne équivalente. Sa représentativité par rapport au linéament est d'autant meilleure que le *RatioL/L* est proche de l'unité.
- *Conc/Conv*: Forme brisée (*broken*) ou rectiligne (*straight*). Deux termes indiquent en outre la direction de la courbure du linéament: *concave* = courbé vers le bas de la pente (plutôt les cicatrices d'extension); *convexe* = courbé vers le haut (plutôt bourrelets d'accumulation).

En outre, des tables de résumé statistique sont aussi produites → *liniS.dbf*. Elle sont combinées en *lineam_stat.xls*.

7.2 Marquage des linéaments sub-parallèles aux courbes de niveau (Vue 2)

Pour chaque *linix.shp*, exécuter le script TRI_ORIENT, qui fonctionne ainsi: dans chaque carré de *aspec.shp*, on sélectionne dans la table de *linix.shp* les linéaments dont le centre est compris à l'intérieur du carré, et compare leur azimuth à la [valeur du champ «Orientation» d'*aspec.shp*] ± 25 degrés. Si la condition est remplie, la colonne «Parall_CN» de *linix.shp* = 1.

8. Densité des linéaments

- **ArcView** (*aav_LN3.apr*)

8.1 Résumé statistique des linéaments par unité de surface

Pour chaque *linix.shp*, exécuter le script CLIPPO4. Il établit tout d'abord une grille de 70 carrés (10 colonnes, 7 lignes, 243 m de côté) couvrant toute la zone W1 → *xsq_lini.shp*. Pour chaque carré, il clippe les *linix.shp* et calcule:

- *N_of_Lin*: nombre de linéaments.

- *Sum_Length*: longueur cumulée des linéaments. Les linéaments s'étendant sur deux ou plusieurs carrés sont divisés en segments dont les longueurs sont comptabilisées séparément.
- *Conc_n*, *Conv_n*, etc: nombre de segments par catégorie de forme (voir ci-dessus), lesquels constituent des champs de *xsq_lin1.shp*. Enfin, il crée la couverture finale des linéaments → **xclp_lin1.shp**.

Les tables *xsq_lin1.dbf* sont fusionnées dans EXCEL → **xsqLintot.xls**.

Elaboration d'une table des moyennes sur tous les azimuths: faire une copie de *xsq_lin1.shp* → **xsq_ltot.shp**. L'ouvrir simultanément avec, successivement, *xsq_lin2.shp*, *xsq_lin3.shp* et *xsq_lin4.shp*. A chaque fois, joindre *xsq_lin1.shp* (source) à *xsq_ltot.shp* (destination). Rajouter 2 champs: NL_m (moyenne du nombre de linéaments dans les quatre azimuths) et SL_m (moyenne de la longueur cumulée des linéaments dans les quatre azimuths). Mettre des alias pour les champs N_of_Lin et Sum_length (=Nli et Sli). Calculer (Field/Calculate) ces moyennes. Oter les autres champs correspondant à *xsq_lin1.shp*, puis «Remove all joints» → **xsq_ltot.shp**.

8.2 Affichage de la densité des linéaments (Vue 3)

xsq_ltot.shp Nlmoy en 4 classes (0–9; 10–34; 35–80; 81–128)

xsq_ltot.shp SL moy en 4 classes (0–47; 48–149; 150–386; 387–819 m).

9. Discussion (les numéros se réfèrent aux étapes ci-dessus)

5.3 Si la profondeur = 2, il y a confusion des linéaments. Si prof = 4, ceux-ci sont plus flous.

5.7 La RP (% de réduction de points) = 0 donne des vecteurs en escaliers, mais non segmentés artificiellement.

Pour *w50_h1bj.dxf*, les statistiques prises sur les *.shp dans ArcView sont (en unités dxf):

Tabl. A1.2

Réduction Points %	N de segments	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
0	32083	0.022	9.75	0.146	0.234
50	41029	0.008	3.117	0.099	0.105
100	39042	0.008	3.117	0.104	0.127

Pour RP = 0, le nombre de segments est plus bas et leur longueur moyenne est plus grande.

6.2 Pour les différentes orientations, les statistiques sont (en m):

Tabl. A1.3

Orientation	N de segments	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
lin_h1b0.shp	32083	1.0	438.8	6.6	10.6
lin_h2b0.shp	32747	1.0	250.0	6.4	8.7
lin_h3b0.shp	36065	1.0	290.4	6.4	9.4
lin_h4b0.shp	30175	1.0	235.0	7.0	9.9

Il n'y a pas de différences significatives selon l'orientation!

6.4 Statistiques avant et après élimination des linéaments trop courts:

Tabl. A1.4

Orientation	Elimin.	N de segments	Min	Max	Moyenne	Ecart-type
lin1.shp	avant	4952	0.1	62.7	3.8	4.5
	après	3366	1.5	62.7	5.1	4.9
lin2.shp	avant	4488	0.1	112.1	3.6	4.5
	après	2975	1.5	112.1	4.9	4.9
lin3.shp	avant	5166	0.1	54.5	3.6	4.0
	après	3410	1.5	54.5	4.9	4.4
lin4.shp	avant	4425	0.1	109.6	3.8	4.6
	après	2923	1.5	109.6	5.2	5.1
N total de segments		19031 12674				

6.7 Statistique des descripteurs morphologiques des linéaments

Tabl. A1.5

Lineam_stat.xls	STATISTIQUES DES LINEAMENTS (Tables liniS.dbf)				
Azimuth		Moyenne	Minimum	Maximum	ECT
Lin1 (N)	LL	4.44	1.10	52.10	4.11
	RatioL/L	0.89	0.17	1.00	0.08
	Azimuth	79.17	8.00	180.00	29.72
Lin2 (E)	LL	4.17	1.10	108.10	4.21
	RatioL/L	0.88	0.16	1.00	0.10
	Azimuth	76.28	0.00	180.00	62.98
Lin3 (S)	LL	4.13	0.00	48.40	3.60
	RatioL/L	0.88	0.00	1.00	0.10
	Azimuth	79.51	0.00	180.00	32.77
Lin4 (W)	LL	4.45	1.10	105.00	4.31
	RatioL/L	0.88	0.25	1.00	0.09
	Azimuth	75.12	0.00	180.00	63.05

Tabl. A1.6

GLISSEMENT LAC NOIR: STATISTIQUE DES LINEAMENTS PAR CARRE DE 243 m												
Orient:	<i>Nord</i>						<i>Est</i>					
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	
<i>Carré</i>	<i>NL</i>	<i>SLEN</i>	<i>CONC</i>	<i>CONV</i>	<i>STRAI</i>	<i>BROK</i>	<i>NL</i>	<i>SLEN</i>	<i>CONC</i>	<i>CONV</i>	<i>STRAI</i>	<i>BROK</i>
1	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
2	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
3	6	27.2	0	0	17	83	5	14.5	20	0	40	40
4	8	40.6	13	0	38	50	18	83.6	22	33	6	39
5	3	7.9	33	67	0	0	12	52.8	8	42	0	50
6	8	61.1	13	13	0	75	7	24.1	0	0	14	86
7	67	280.9	10	27	13	49	50	162.9	16	18	22	44
8	54	320.9	7	20	7	65	45	198.9	24	31	4	40
9	19	77.3	21	21	5	53	18	85.0	17	28	6	50
10	1	3.6	100	0	0	0	2	8.2	0	50	0	50
11	0	0.0	0	0	0	0	5	17.5	40	0	20	40
12	4	25.0	25	25	0	50	23	366.3	13	9	22	57
13	4	25.1	25	25	0	50	5	26.3	20	0	0	80
14	3	8.7	67	33	0	0	4	20.9	0	25	25	50
15	8	35.3	25	25	13	38	18	97.6	17	22	6	56
16	94	336.9	21	21	12	46	60	226.7	22	33	8	37
17	19	69.8	11	42	5	42	23	90.6	26	30	9	35
18	124	791.8	12	21	8	59	130	865.2	15	22	12	52
19	43	226.5	9	26	19	47	83	383.4	22	20	11	47
20	4	9.6	25	0	25	50	6	22.8	50	17	17	17
21	0	0.0	0	0	0	0	3	18.6	67	33	0	0
22	2	6.0	50	0	0	50	19	179.5	16	26	26	32
23	0	0.0	0	0	0	0	6	24.6	0	0	50	50
24	1	5.0	100	0	0	0	5	21.6	0	0	20	80
25	5	30.0	20	0	20	60	2	6.7	0	0	50	50
26	12	56.4	8	25	25	42	4	13.8	25	25	25	25
27	2	8.7	50	0	0	50	1	5.6	0	0	0	100
28	0	0.0	0	0	0	0	1	5.9	0	100	0	0
29	19	115.0	21	32	11	37	17	60.9	12	41	18	29
30	19	108.2	26	26	5	42	7	26.7	43	29	0	29
31	2	17.7	0	0	0	100	5	16.2	40	20	0	40
32	13	49.3	23	15	8	54	27	194.0	15	19	15	52
33	6	27.8	17	0	33	50	8	34.4	13	25	13	50
34	1	7.4	0	100	0	0	13	50.3	31	15	23	31
35	10	51.4	0	40	30	30	6	15.3	0	67	0	33
36	5	14.1	0	0	60	40	14	58.1	21	50	0	29
37	7	33.3	0	43	29	29	5	18.0	20	40	20	20
38	3	23.8	0	33	0	67	2	11.7	0	50	0	50
39	1	2.7	100	0	0	0	8	26.4	13	13	13	63
40	4	21.2	0	50	0	50	3	13.4	33	33	33	0
41	1	4.6	100	0	0	0	2	29.4	0	0	0	100
42	4	11.4	25	25	25	25	17	146.7	12	18	24	47

43	4	19.9	75	0	0	25	14	83.7	14	21	7	57
44	11	50.5	18	27	0	55	49	237.7	18	24	10	47
45	2	16.6	0	100	0	0	21	74.6	19	24	24	33
46	7	40.0	14	43	43	0	5	26.0	0	80	0	20
47	9	29.6	0	0	44	56	4	14.9	25	0	0	75
48	2	22.2	0	0	0	100	4	9.0	25	25	25	25
49	10	50.9	0	70	0	30	4	13.4	0	25	50	25
50	19	107.5	16	32	16	37	10	25.9	10	40	10	40
51	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
52	13	62.3	15	15	0	69	52	332.7	23	15	0	62
53	6	24.3	17	17	0	67	18	176.8	11	22	11	56
54	5	29.0	0	80	0	20	29	122.6	28	31	7	34
55	3	14.0	33	33	0	33	8	29.7	25	38	13	25
56	8	21.5	13	25	13	50	16	50.7	38	25	6	31
57	5	14.3	20	20	40	20	5	32.5	0	0	20	80
58	72	390.4	13	22	14	51	83	413.7	13	22	14	51
59	26	102.9	15	27	12	46	29	80.7	14	34	14	38
60	9	25.5	22	33	0	44	1	1.9	0	100	0	0
61	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
62	0	0.0	0	0	0	0	10	68.5	10	20	20	50
63	3	10.1	0	33	0	67	37	263.8	24	30	14	32
64	14	92.4	21	14	7	57	13	62.7	8	31	15	46
65	6	16.0	33	17	0	50	20	126.0	25	25	5	45
66	1	2.7	0	0	0	100	2	7.7	50	50	0	0
67	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
68	3	8.2	0	0	0	100	1	3.8	0	100	0	0
69	1	1.9	0	0	0	100	0	0.0	0	0	0	0
70	4	14.3	25	25	25	25	5	17.3	0	20	20	60
Sum	821						1123					

Tabl. A1.6 (suite)

Orient	Sud						West						
	Carré	NL	SLEN	CONC	CONV	STRAI	BROK	NL	SLEN	CONC	CONV	STRAI	BROK
1	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
2	0	0.0	0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
3	5	15.6	0	40	0	60	11	36.6	0	0	45	55	
4	13	49.5	31	8	8	54	25	143.0	20	20	16	44	
5	4	11.8	25	25	0	50	12	59.0	8	42	0	50	
6	8	31.0	0	38	25	38	11	50.8	9	18	0	73	
7	62	238.6	15	18	19	48	51	195.2	24	22	18	37	
8	56	262.5	13	30	5	52	48	238.3	17	19	8	56	
9	14	71.8	7	21	0	71	15	61.7	13	20	27	40	
10	2	4.7	0	50	50	0	1	2.8	0	0	100	0	
11	0	0.0	0	0	0	0	3	10.8	0	33	33	33	
12	2	14.7	0	0	50	50	30	344.6	10	7	37	47	
13	2	12.6	0	50	0	50	2	14.4	50	0	0	50	
14	2	6.1	50	50	0	0	0	0.0	0	0	0	0	
15	8	43.6	25	25	25	25	15	81.6	20	27	0	53	
16	92	369.2	20	28	5	47	50	237.8	12	18	18	52	
17	26	116.0	19	12	12	58	15	76.3	7	27	13	53	
18	125	768.6	15	16	9	60	131	851.0	13	14	15	59	
19	45	246.5	18	18	7	58	80	430.0	11	16	13	60	
20	7	45.3	14	14	14	57	14	59.1	14	43	14	29	
21	2	16.5	0	50	0	50	4	24.0	0	50	0	50	
22	6	33.1	33	17	0	50	19	149.7	5	21	26	47	
23	1	2.4	100	0	0	0	6	22.6	0	17	33	50	
24	1	1.5	100	0	0	0	2	5.5	0	0	0	100	
25	6	29.8	17	0	0	83	3	12.3	0	33	0	67	
26	14	45.2	29	21	0	50	2	12.4	0	50	0	50	
27	2	9.1	0	100	0	0	1	1.9	100	0	0	0	
28	1	10.2	0	0	0	100	2	15.8	50	0	0	50	
29	17	70.0	12	41	12	35	18	59.4	28	22	6	44	
30	25	128.4	12	24	0	64	6	25.3	17	17	33	33	
31	6	23.1	17	17	0	67	4	10.2	0	0	0	100	
32	14	62.5	29	14	14	43	20	157.5	25	15	15	45	
33	6	26.1	17	33	0	50	10	50.0	10	20	20	50	
34	3	24.3	33	33	0	33	13	73.5	23	8	15	54	
35	9	31.5	22	22	11	44	9	49.5	11	11	11	67	
36	6	26.2	0	0	17	83	7	25.3	14	29	0	57	
37	5	27.0	0	20	20	60	12	35.7	8	25	17	50	
38	4	12.0	0	0	25	75	4	21.0	25	0	0	75	
39	2	11.5	0	0	0	100	5	10.4	40	60	0	0	
40	5	28.0	40	20	0	40	7	33.2	43	29	0	29	
41	1	23.3	0	0	0	100	0	0.0	0	0	0	0	
42	6	28.6	33	0	0	67	10	142.3	10	10	10	70	
43	5	31.3	20	60	0	20	11	54.8	27	9	9	55	

44	11	81.7	27	27	0	45	38	197.5	24	21	8	47
45	3	6.0	33	0	0	67	16	53.2	31	13	31	25
46	6	17.4	0	67	17	17	5	19.9	20	40	0	40
47	9	26.0	0	56	33	11	7	24.0	43	29	0	29
48	4	10.4	25	25	25	25	3	11.9	33	33	0	33
49	12	47.7	0	42	0	58	3	19.1	0	67	0	33
50	12	56.0	17	25	17	42	19	90.7	16	26	5	53
51	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
52	32	175.8	28	16	3	53	37	197.8	14	35	5	46
53	5	18.4	0	0	0	100	18	127.7	17	11	17	56
54	18	121.0	11	17	6	67	27	188.0	15	19	15	52
55	3	9.3	33	33	33	0	8	36.4	0	13	25	63
56	3	13.2	0	0	0	100	18	71.7	33	17	6	44
57	4	12.4	0	75	0	25	4	7.9	50	25	0	25
58	83	388.1	6	22	22	51	82	351.7	20	29	9	43
59	34	114.3	21	15	15	50	22	85.9	27	18	0	55
60	7	23.9	0	29	29	43	0	0.0	0	0	0	0
61	0	0.0	0	0	0	0	1	6.9	0	0	0	100
62	1	17.9	0	0	0	100	7	44.0	43	0	14	43
63	6	38.3	17	33	17	33	34	282.8	12	12	21	56
64	12	53.6	8	33	17	42	11	71.2	18	0	27	55
65	14	55.5	29	21	14	36	18	126.5	28	22	11	39
66	1	1.7	0	100	0	0	2	4.9	0	50	0	50
67	0	0.0	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0
68	4	10.1	0	25	25	50	3	7.1	33	0	67	0
69	1	1.7	0	100	0	0	0	0.0	0	0	0	0
70	3	7.5	0	0	0	100	6	23.2	17	17	0	67
Sum	900						1069					
										Grand total		3913

Un test statistique (t) montre que ces sommes ne sont pas significativement différentes.

ANNEXE 2

SCRIPTS AVENUE

```
' LINEAM_AZI_3
'
' Author: J.-M. Jaquet (Jean-Michel.Jaquet@terre.unige.ch)
'
' Title: Computes the azimuth of the line-equivalent of lineaments, as well as
'       their concavity/convexity with respect to slope direction
'
'-----
' Projet Lac Noir. Script 1 of 3 |
'-----
'
' View should be the Active Document
TheView=av.getactiveDoc
'
' Choice of theme with lineaments
ThemeList=TheView.GetThemes
Mytheme=msgbox.choice(ThemeList,"Choose theme with lineaments: ","Theme choice")
if(Mytheme=nil) then
  exit
end
MyThemeStr=Mytheme.AsString.Left(4)
LFTab=MyTheme.getFTab
'
' Checks whether fields "Line_Eq_L", "RatioL/L", "Azimuth" are present.
' If not, adds them
checkfield=LFTab.FindField("Line_Eq_L")
LFTab.SetEditable(True)
if (checkfield=nil) then
  f1=Field.Make("Line_Eq_L",#Field_FLOAT,8,1)
  f2=Field.Make("RatioL/L",#Field_FLOAT,5,2)
  f3=Field.Make("Azimuth",#Field_SHORT,5,0)
  f4=Field.Make("Conc/Conv",#Field_CHAR,10,0)
  LFTab.AddFields({f1,f2,f3,f4})
end
lengthfield=LFTab.FindField("Length")
'
' Access to "shape" field of FTab
shapefield=LFTab.FindField("shape")
'
' Loop for each lineament
for each rec in LFTab
  myshape=LFTab.ReturnValue(shapefield,rec)
  if (myshape.GetDimension=0) then
    exit
  end
'Transforms polyline obj. into multipoint.obj.
tempshape=myshape.AsMultiPoint
'Returns a multipoint as a list of points
templist=tempshape.AsList
'Tempcount is the polyline number of points (vertices)
tempcount=templist.Count
'msgbox.info(tempcount.AsString, "")
tmprc=tempcount-1
'Extracts the line beginning and end coordinates
xbeg=templist.Get(0).GetX
ybeg=templist.Get(0).GetY
xend=templist.Get(tmprc).GetX
yend=templist.Get(tmprc).GetY
'msgbox.info(xend.AsString,yend.AsString)
dx=xend-xbeg
dy=yend-ybeg
'msg=dx.AsString+" "+dy.AsString
'msgbox.info(msg,"")
'
' Test for quadrant and azimuth computation
dxdy=dx/dy
dydx=dy/dx
'dx>0
```

```

if (dx>0)then
  if(dy>0) then
    az=(dxdy.atan)*57.3
  else
    az=(dydx.atan)*(-57.3)+90
  end
end
'dx<0
else
  if (dy<0) then
    az=(dxdy.atan)*57.3
  else
    az=(dydx.atan)*(-57.3)+90
  end
end
end
'msgbox.info(az.AsString,"")
,
'Computation of new fields
LEL=((dx*dx)+(dy*dy)).sqrt
'msgbox.info(LEL.AsString,"Line-equivalent length")
lfield=LFtab.FindField("Line_Eq_L")
LFtab.SetValue(lfield,rec,LEL)
,
LL=LFtab.ReturnValue(lengthfield,rec)
RLL=LEL/LL
rfield=LFtab.FindField("RatioL/L")
LFtab.SetValue(rfield,rec,RLL)
,
azfield=LFtab.FindField("Azimuth")
LFtab.SetValue(azfield,rec,az)
,
' Line-equivalent equation
a=dy/dx
w=xbeg*dy/dx
b=ybeg-w
'msgbox.info(a.AsString++b.AsString," ")
listc=" "
,
'Computes concavity/convexity
,
npts=tmpc-1
spos=0
sneg=0
for each num in 1..npts
  tempx=templist.Get(num).GetX
  tempy=templist.Get(num).GetY
,
'Y coordinates of points on line-equivalent segment
yd=a*tempx+b
dp=tempy-yd
,
'Tracing the sign of differences between tempy and yd
if (dp<0) then
  sneg=sneg+1
else
  spos=spos+1
end
listc=listc+" "+tempy.AsString+" "+yd.AsString
listc=listc+" "+tempx.AsString+" "+tempy.AsString
'msgbox.info(tempx.AsString++tempy.asString, "")
end
'Test
ctype=""
if (spos=npts) then
  ctype="convex"
  'msgbox.Info(ctype,"")
elseif (sneg=npts) then
  ctype="concave"
  'msgbox.Info(ctype,"")
else
  ctype="broken"
  'msgbox.Info(ctype,"")
end
'Significance thresholding based on RLL
if (RLL>0.95) then
  ctype="straight"
end

```

```

    'msgbox.Info(xbeg.AsString+ " " +ybeg.AsString+ "*****+listc, """)
    'msgbox.Info(ctype, "*****")
,
'Write in "Conc/Conv" field
  cfield=LFTab.FindField("Conc/Conv")
  LFTab.SetValue(cfield,rec,ctype)
end
,
' Creation de la table Line_stat
'myFile=FileDialog.Put("d:\lacnoir\lineaments\line_stat.dbf".AsFileName,"*. *", "File")
myFileStr="d:\lacnoir\lineaments"+MyThemeStr+"S"
myFile=myFileStr.AsFileName
msgbox.Info(myFileStr, "")
sVTab=Vtab.MakeNew(myFile,dbase)
myTable=Table.Make(sVTab)
f5=Field.Make("Descripteur",#FIELD_CHAR,7,0)
f6=Field.Make("Moyenne",#FIELD_FLOAT,6,2)
f7=Field.Make("Minimum",#FIELD_FLOAT,6,2)
f8=Field.Make("Maximum",#FIELD_FLOAT,6,2)
f9=Field.Make("Ecart-type",#FIELD_FLOAT,6,2)
sVTab.AddFields({f5,f6,f7,f8,f9})

' Computes summary statistics
,
' Line_Eq_L
LFTab.SetEditable(FALSE)
MyTheme.editTable
theTable=av.GetActiveDoc
theVTab=theTable.GetVTab
theField=lfield
'theField=theTable.GetActiveField
'msgbox.info(theVTab.AsString, "")
thePrecision = "d.ddddddddd"
theFieldPrecision = theField.GetPrecision
Script.The.SetNumberFormat( thePrecision.Left( theFieldPrecision + 2 ) )

if ( theVTab.GetSelection.Count = 0 ) then
  theSet = theVTab
else
  theSet = theVTab.GetSelection
end

theSum = 0
theCount = 0
theMinimum = nil
theMaximum = nil
for each rec in theSet
  theValue = theVTab.ReturnValueNumber( theField, rec )
  if ( not ( theValue.IsNull ) ) then
    if ( theMinimum = nil ) then
      theMinimum = theValue
      theMaximum = theValue
    else
      theMinimum = theMinimum min theValue
      theMaximum = theMaximum max theValue
    end
    theSum = theValue + theSum
    theCount = theCount + 1
  end
end
theMean = theSum / theCount

theSumSqDev = 0
for each rec in theSet
  theValue = theVTab.ReturnValueNumber( theField, rec )
  if ( not ( theValue.IsNull ) ) then
    theSqDev = ( theValue - theMean ) * ( theValue - theMean )
    theSumSqDev = theSqDev + theSumSqDev
  end
end

if (theCount > 1) then
  theVariance = theSumsqdev / (theCount - 1)
  theStdDev = theVariance.Sqrt
else
  theVariance = 0

```

```

theStdDev = 0
end

MsgBox.Report( lfield.AsString+ " " +"Sum: " + theSum.AsString + nl +
    "Count: " + theCount.SetFormat( "d" ).AsString + nl +
    "Mean: " + theMean.AsString + nl +
    "Maximum: " + theMaximum.AsString + nl +
    "Minimum: " + theMinimum.AsString + nl +
    "Range: " + ( theMaximum-theMinimum ).Abs.AsString + nl +
    "Variance: " + theVariance.AsString + nl +
    "Standard Deviation: " + theStdDev.AsString,
    "Statistics for" ++ theField.GetAlias ++ "field" )
,
' Ecriture dans la table Line_stat
rec=sVTab.AddRecord
'msgBox.Info(rec.AsString,"")
sVTab.setValue(f5,rec,"LL")
sVTab.setValue(f6,rec,theMean)
sVTab.setValue(f7,rec,theMinimum)
sVTab.setValue(f8,rec,theMaximum)
sVTab.setValue(f9,rec,theStdDev)
,

' RatioL/L
LFtab.SetEditable(FALSE)
MyTheme.editTable
theTable=av.GetActiveDoc
theVTab=theTable.GetVTab
theField=rfield
'theField=theTable.GetActiveField
'msgbox.info(theVTab.AsString,"")
thePrecision = "d.ddddddddd"
theFieldPrecision = theField.GetPrecision
Script.The.SetNumberFormat( thePrecision.Left( theFieldPrecision + 2 ) )

if ( theVTab.GetSelection.Count = 0 ) then
    theSet = theVTab
else
    theSet = theVTab.GetSelection
end

theSum = 0
theCount = 0
theMinimum = nil
theMaximum = nil
for each rec in theSet
    theValue = theVTab.ReturnValueNumber( theField, rec )
    if ( not ( theValue.IsNull ) ) then
        if ( theMinimum = nil ) then
            theMinimum = theValue
            theMaximum = theValue
        else
            theMinimum = theMinimum min theValue
            theMaximum = theMaximum max theValue
        end
        theSum = theValue + theSum
        theCount = theCount + 1
    end
end
theMean = theSum / theCount

theSumSqDev = 0
for each rec in theSet
    theValue = theVTab.ReturnValueNumber( theField, rec )
    if ( not ( theValue.IsNull ) ) then
        theSqDev = ( theValue - theMean ) * ( theValue - theMean )
        theSumSqDev = theSqDev + theSumSqDev
    end
end

if (theCount > 1) then
    theVariance = theSumsqdev / (theCount - 1)
    theStdDev = theVariance.Sqrt
else
    theVariance = 0
    theStdDev = 0
end

```

end

```
MsgBox.Report(rfield.AsString + " "+"Sum: " + theSum.AsString + nl +
  "Count: " + theCount.SetFormat( "d" ).AsString + nl +
  "Mean: " + theMean.AsString + nl +
  "Maximum: " + theMaximum.AsString + nl +
  "Minimum: " + theMinimum.AsString + nl +
  "Range: " + ( theMaximum-theMinimum ).Abs.AsString + nl +
  "Variance: " + theVariance.AsString + nl +
  "Standard Deviation: " + theStdDev.AsString,
  "Statistics for" ++ theField.GetAlias ++ "field" )
' Ecriture dans la table Line_stat
rec=sVTab.AddRecord
sVTab.setValue(f5,rec,"RatioL/L")
sVTab.setValue(f6,rec,theMean)
sVTab.setValue(f7,rec,theMinimum)
sVTab.setValue(f8,rec,theMaximum)
sVTab.setValue(f9,rec,theStdDev)
'
' Azimuth
LFtab.SetEditable(FALSE)
MyTheme.editTable
theTable=av.GetActiveDoc
theVTab=theTable.GetVTab
theField=azfield
'theField=theTable.GetActiveField
'msgbox.info(theVTab.AsString,"")
thePrecision = "d.dddddddd"
theFieldPrecision = theField.GetPrecision
Script.The.SetNumberFormat( thePrecision.Left( theFieldPrecision + 2 ) )

if ( theVTab.GetSelection.Count = 0 ) then
  theSet = theVTab
else
  theSet = theVTab.GetSelection
end

theSum = 0
theCount = 0
theMinimum = nil
theMaximum = nil
for each rec in theSet
  theValue = theVTab.ReturnValueNumber( theField, rec )
  if ( not ( theValue.IsNull ) ) then
    if ( theMinimum = nil ) then
      theMinimum = theValue
      theMaximum = theValue
    else
      theMinimum = theMinimum min theValue
      theMaximum = theMaximum max theValue
    end
    theSum = theValue + theSum
    theCount = theCount + 1
  end
end
theMean = theSum / theCount

theSumSqDev = 0
for each rec in theSet
  theValue = theVTab.ReturnValueNumber( theField, rec )
  if ( not ( theValue.IsNull ) ) then
    theSqDev = ( theValue - theMean ) * ( theValue - theMean )
    theSumSqDev = theSqDev + theSumSqDev
  end
end

if (theCount > 1) then
  theVariance = theSumsqdev / (theCount - 1)
  theStdDev = theVariance.Sqrt
else
  theVariance = 0
  theStdDev = 0
end
```

```

MsgBox.Report( azfield.AsString + " "+"Sum: " + theSum.AsString + nl +
"Count: " + theCount.SetFormat( "d" ).AsString + nl +
"Mean: " + theMean.AsString + nl +
"Maximum: " + theMaximum.AsString + nl +
"Minimum: " + theMinimum.AsString + nl +
"Range: " + ( theMaximum-theMinimum ).Abs.AsString + nl +
"Variance: " + theVariance.AsString + nl +
"Standard Deviation: " + theStdDev.AsString,
"Statistics for" ++ theField.GetAlias ++ "field" )

```

```

' Ecriture dans la table Line_stat
rec=sVTab.AddRecord
sVTab.setValue(f5,rec,"Azimuth")
sVTab.setValue(f6,rec,theMean)
sVTab.setValue(f7,rec,theMinimum)
sVTab.setValue(f8,rec,theMaximum)
sVTab.setValue(f9,rec,theStdDev)

```

· TRI_ORIENT

```

' Authors: J.-M. Jaquet (Jean-Michel.Jaquet@terre.unige.ch)
'
' Title: Sets a flag to 1 (field Parall_CN) if a lineament is parallel or sub-parallel
' (within dir +- dDir) to the general direction of underlying contour (expressed
' as the perpendicular of aspect).
'
'-----
' Projet Lac Noir. Script 2 of 3 - precedes CLIPPO4
'-----
'
'View should be the Active Document
TheView=av.getactiveDoc
'
' Choice of theme with lineaments
ThemeList=TheView.GetThemes
theLineam=msgbox.choice(ThemeList,"Choose theme with lineaments: ","Theme choice")
if(theLineam=nil) then
exit
end
theLineamFtab=theLineam.getFtab
theAzimuthField=theLineamFtab.FindField("Azimuth") 'Lineam.line-equivalent azim.(0-180 deg)
theLineamFtab.StartEditingWithrecovery
'
' Checks whether field "Parall_CN" is present.If not,adds it
checkfield=theLineamFtab.FindField("Parall_CN")
MsgBox.Info(checkfield.AsString, " ")
if (checkfield=nil) then
theParCNField=Field.Make("Parall_CN",#Field_FLOAT,8,0)
theLineamFtab.AddFields({theParCNField})
else
theParCNField=theLineamFtab.FindField("Parall_CN")
end

theOrient=msgbox.choice(ThemeList,"Choose aspect theme: ","Theme choice")
if(theOrient=nil) then
exit
end

' Tolerance angle for parallelism test
dDir=25

theOrientFtab=theOrient.getFtab
theOrientField=theOrientFtab.FindField("Gridcode") 'Aspect angle field (0-360)
'
' Loops for each "pixel" or pixel groups of the aspect grid
id=1
for each nrec in theOrientFtab
theOrientSelRecs=theOrientFtab.GetSelection
theOrientSelRecs.set(nrec) 'Selects one record

```

```

theOrientFTab.UpdateSelection
orient=theOrientFTab.ReturnValue(theOrientField,nrec) 'Returns the aspect angle
'
' Transformation of aspect angle into direction of contours and
' expression within the first two quadrants (0-180)
dir=orient-90
  if (dir>=180)
    then dir=dir-180
  end
dir_low=dir-dDir
dir_high=dir+dDir
'
' Selection of lineaments which have their centre within the "pixel
theLineam.selectByTheme(theOrient,#FTAB_RELTYPE_HASCENTERWITHIN,0,#VTAB_SELTYPE_NEW)
'
theSelRecs=theLineamFtab.GetSelection 'Sets the selection bitmap
cod1=0
'
' Loops for each selected lineament
for each lin in theSelRecs
  azimuth=theLineamFtab.ReturnValue(theAzimuthField,lin) 'Returns lineament azimuth
'
' Tests for parallelism between lineament and contour direction
  if ((azimuth>dir_low) and (azimuth<dir_high))
    then cod1=1
    else cod1=0
  end
'
  theLineamFtab.SetValue(theParCNField,lin,cod1) 'Writes flag in "Parall_CN" field
end 'Lineament loop

id=id+1
' if (id>30) then
' exit
' end
theOrientSelRecs.clear(nrec)
theOrientFTab.UpdateSelection

end 'Aspect pixel loop

theLineamFtab.StopEditingWithRecovery(TRUE)

```

· CLIPPO4

```

' Author: J.-M. Jaquet (Jean-Michel.Jaquet@terre.unige.ch)
'
' Title: Computes statistics of lineament number,
'        aggregated length and shape per unit squares
'
'-----
' Projet Lac Noir. Script 3 of 3 - Follows TRI_ORIENT
'-----
'
' View should be the Active Document
TheView=av.getactiveDoc
'
' CHOICE OF THEME WITH LINEAMENTS
TheView=av.getactiveDoc
ThemeList=TheView.GetThemes
theLineam=msgbox.choice(ThemeList,"Choose lineaments:","Theme choice")
NomLineam=theLineam.AsString
NdLineam=NomLineam.left(4)
if(theLineam=nil) then
  exit
end
theLineamFtab=theLineam.getFtab
f1=theLineamFtab.FindField("Parall_CN")
'
' SELECTION OF RECORDS PREVIOUSLY FLAGGED AS 1 IN FIELD "Parall_CN"

```

```

theLineamSelRecs=theLineamFTab.GetSelection
for each nrec in theLineamFTab
  Parall_CN=theLineamFTab.ReturnValue(f1,nrec)
  if (Parall_CN=1) then
    theLineamSelRecs.set(nrec) 'selects one record
  end
end
'-----
'-----
'CREATION OF A SAMPLING GRID(=set of square domains) to be used
'in clipping the lineaments
'Size in meters. nc and nli as number of columns and lines
,
size=242.86
nc=10
nli=7
x=588891.76-size
y=169092.59-size
,
theClipFTab=Ftab.MakeNew(("d:\lacnoir\lineaments\xsq_"+NdLineam).AsFileName,Polygon)
cldField=Field.Make("Square_Nr",#FIELD_DECIMAL,6,0)
cSumLField=Field.Make("Sum_length",#FIELD_DECIMAL,6,1)
cNLField=Field.Make("N_of_Lin",#FIELD_DECIMAL,5,0)
cConcField=Field.Make("Conc_n",#FIELD_DECIMAL,5,0)
cConvField=Field.Make("Conv_n",#FIELD_DECIMAL,5,0)
cStrField=Field.Make("Straight_n",#FIELD_DECIMAL,5,0)
cBroField=Field.Make("Broken_n",#FIELD_DECIMAL,5,0)
,
cNLField.SetEditable(true)
cConcField.SetEditable(true)
cConvField.SetEditable(true)
cStrField.SetEditable(true)
cBroField.SetEditable(true)
,
theClipFTab.AddFields({cldfield,cNLField,cSumLField,cConcField,
cConvField,CStrField,cBroField})
theClipShapeField=theClipFTab.FindField("Shape")
,
' Loops for each square
id=0
for each i in 1..nli
  y=y+size
  for each j in 1..nc
    id=id+1
    x=x+size
    arect=Rect.Make(x@y,size@size)
    apoly=arect.AsPolygon
    newRecNum=theClipFTab.AddRecord
    theClipFTab.SetValue(cldField,newRecNum,id)
    theClipFTab.SetValue(theClipshapeField,newRecNum,apoly)
  end 'column loop
  x=588891.76-size
end ' line loop
,
theClipTheme=FTheme.Make(theClipFTab)
'TheView.AddTheme(theClipTheme)
'-----
'-----
' CREATION OF A NEW THEME THAT WILL CONTAIN CLIPPED
' LINEAMENTS CODED ACCORDING TO SAMPLING GRID NUMBER
,
'defname = Filename.GetCWD.MakeTmp(("clp_"+NdLineam),"shp")
resfile = ("D:\lacnoir\lineaments\xcldp_"+NdLineam+".shp").AsFileName

'resfile = FileDialog.Put(defname,"*.shp","NAME NEW THEME")
rFTab=Ftab.MakeNew(resfile,polyline)
rldField=Field.Make("ID",#FIELD_DECIMAL,5,0)
rSquareField=Field.Make("Square",#FIELD_DECIMAL,5,0)
rLongField=Field.Make("Long",#FIELD_DECIMAL,6,1)
rAzimField=Field.Make("Azimuth",#FIELD_DECIMAL,6,1)
rConcField=Field.Make("Conc_conv",#FIELD_CHAR,8,0)
rFTab.AddFields({rldField,rSquareField,rLongField,rAzimField,
rConcField})
rShapeField=rFTab.FindField("Shape")
resTheme=Theme.Make(SrcName.Make(resfile.AsString))

```

```

'MsgBox.Info(newTheme.asstring, "")
'
'-----
'-----
' CLIPPING PROCESS
' Get the ftab
theLineamIDField = theLineamFTab.FindField("id")
theClipIDField = cldField
if ((theLineamIDField = nil).Not) then
  theLineamIDField.SetVisible(true)
end
if ((theClipIDField = nil).Not) then
  theClipIDField.SetVisible(true)
end
'
' EXTRACTION OF LINEAMENTS FROM EACH SQUARE OF SAMPLING GRID
' (ClipFTab)
compt=0
for each rec in theClipFTab "*****"
' CREATION OF A TEMPORARY COPY (newFTab) OF THE LINEAMENT THEME
' (TheLineamFTab) FOR OVERLAY WITH CLIP THEME
'
outputfile = FileName.Make( "provis.shp")
'MsgBox.Info(outputfile.asstring, "")
newFTab = theLineamFTab.Export(outputfile, Shape, TRUE)
newTheme=Theme.Make(SrcName.Make(outputfile.AsString))
'MsgBox.Info(newTheme.asstring, "")
'
' Get info about the new FTab
theNewShapeField = newFTab.FindField("shape")
theNewShapeType = newFTab.FindField("shape").GetType
theNewAzimField=newFTab.FindField("Azimuth")
theNewLongField=newFTab.FindField("Length")
theNewConcField=newFTab.FindField("Conc_conv")
newFTab.SetEditable(False)
newFTab.SetEditable(True)
newFTab.StartEditingWithRecovery
'
' SELECTION OF A SQUARE
theClipFTab.Getselection.Set(rec) ' selects a square
theClipFTab.UpdateSelection
' Determine which records from the newFTab are selected, or
' select all if none selected
'
theNewSelRecs = newFTab.GetSelection
if (theNewSelRecs.count=0) then
  theNewSelRecs.SetAll
end
'
' Get the ClipTheme
theClipShape = theClipFTab.ReturnValue(theClipShapeField, rec)
'MsgBox.Info(theClipShape.AsString, "") 'returns coord. of square
'
' Reselect for all records within theClipShape
newFTab.SelectbyShapes({theClipShape}, #VTAB_SELTYPE_NEW)
'
' DELETION OF UNSELECTED LINEAMENTS (=rec.outside of square)
' from newFTab
'
av.ShowMsg("Deleting shapes outside of the Clip region...")
newFTab.GetSelection.Not
newFTab.UpdateSelection
theUnselRecs = newFTab.GetSelection
ct = theUnselrecs.count
if(theUnSelRecs.Count > 0) then
  newFTab.RemoveRecords(theUnselRecs)
end
av.ClearMsg
'
' CLIPPING OF REMAINING LINEAMENTS
av.ShowStopButton
av.ShowMsg("Clipping remaining shapes...")
'
for each nrec in newFTab "*****"
'MsgBox.Info(nrec.AsString, "Nrec")
' Get the shape (each lineament is an object)

```


ANNEXE 3 DONNÉES SUR CD-ROM

1. Disponibilité

Toutes les données ayant été utilisées dans le projet-pilote du Hohberg, ainsi que les informations produites ont été archivées sur deux CD-ROM disponibles sur demande à l'adresse électronique suivante: Jean-Michel.Jaquet@terre.unige.ch.

Elles ne peuvent être réutilisées qu'à des fins de recherche ou d'enseignement, avec mention de la source bibliographique (ce volume).

2. Besoins logiciels

Pour reproduire exactement la méthodologie suivie dans ce rapport pour l'analyse numérique d'image, les logiciels suivants sont nécessaires:

- Corel PhotoPaint 7.
- Corel Trace 7.
- ArcView 3.1 avec extensions Xtools Metric et Spatial Analyst.

3. Structure des données

Les données, résultats et scripts Avenue sont stockés sur CD selon la répartition suivante:

C:\lacnoir

..			
..		420 Mb:	CD1
..			

<input type="checkbox"/>	<i>IMAGEs</i>	550 Mb:	CD2
..			

Il faut d'abord copier le CD1 (dossier *lacnoir*) sur un disque dur, puis le CD2 (dossier *IMAGEs*) dans *lacnoir*.

Si le disque utilisé n'est pas *c:* mais, disons, *d:*, il faut modifier dans WordPad les fichiers de projets ArcView (*.av) de façon à remplacer toutes les occurrences de «*c:/*» par «*d:/*».

ANNEXE 4

PROJETS *ArcView*

Quatre projets peuvent être ouverts, qui gèrent les grands types d'opérations suivantes (voir Annexe 1):

Aav_LN1.apr: Généralités et masquages

1. Cadre géographique
2. Masque 1 (MNA)
3. Orientation (MNA)
4. Masques 2 et 4 (forêt)
5. Masque 3 (routes)
6. Masque 5 (forte luminance)
7. Zones à forte luminance
8. Masque total
9. Carte des vitesses de glissement
10. Géologie

Aav_LN2.apr: Extraction des linéaments

1. Estampage directionnel
2. Transformation/débruitage
3. Vectorisation
4. Masquage
5. Elimination des linéaments < 1,5 m

Aav_LN3.apr: Cartographie des linéaments

1. Tous les linéaments
2. Elimination des linéaments non parallèles aux courbes de niveau
3. Densité de linéaments par unité de surface (carrés)
4. Carte des linéaments sur grille
5. Relation entre densité de linéaments et vitesse de glissement

Aav_LN4.apr: Analyse diachronique

1. Carte de différences
2. Zones à forte luminance
3. Mouvements visibles (Guglera)
4. Mouvements visibles (Udrischli–Lengmoos)
5. Relation entre végétation et vitesse de glissement.

ISBN 3-906723-40-2
ISSN 1017-1509