

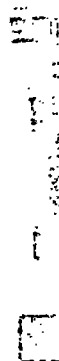
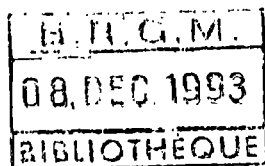
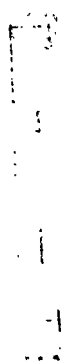


MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT  
DIRECTION DE LA RECHERCHE ET DES AFFAIRES  
ECONOMIQUES ET INTERNATIONALES

*document public*

## méthode d'analyse par photogrammétrie des mouvements de terrains

---



octobre 1993  
R 37784

numéro de référence C 04200755

**MINISTERE DE L'ENVIRONNEMENT  
DIRECTION DE LA RECHERCHE ET DES AFFAIRES  
ECONOMIQUES ET INTERNATIONALES**

**document public**

**méthode d'analyse par photogrammétrie  
des mouvements de terrains**

---

**F. Girault et M. Terrier**

**octobre 1993  
R 37784**

**numéro de référence C 04200755**

**BRGM  
SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL  
Département Géologie  
BP 6009 - 45060 ORLEANS CEDEX 02 - FRANCE - Tél.: (33) 38 64 34 34**

## **RESUME**

Cette étude est subventionnée par la Direction de la Recherche et des Affaires Economiques et Internationales (DRAEI), elle fait suite à la notification n° 90 381 (imputée au chapitre 67-20, article 80 paragraphe 70).

Ce rapport présente une méthode de caractérisation de l'évolution de versants instables basée sur l'utilisation de modèles numériques de terrain (MNT), et sur les techniques de traitements d'images.

Les MNT sont calculés à partir de données photogrammétriques ; ils décrivent l'état d'un site à des dates successives T0, T1, T2, etc.

Les différences observées entre ces MNT permettent d'identifier et de décrire la zone de désordres, et autorise une approche qualitative et quantitative de son évolution. Selon les sites, le comportement des unités pétrographiques ou lithologiques, et le rôle éventuel d'accidents structuraux, peuvent ainsi être décrits.

La démarche adoptée permet à l'ingénieur ou à l'expert d'orienter son diagnostic sur l'origine des désordres et sur la pathologie des terrains, et d'optimiser les mesures à prendre pour conforter ou surveiller le site. Elle complète donc, en permettant de les optimiser, les méthodes classiques, plus ponctuelles, d'auscultation de versants instables.

La méthode présentée dans ce mémoire est illustrée par une application à deux sites français où des glissements importants sont connus : la Clapière et le Friolin.

## TABLE DES MATIERES

RESUME .....	1
INTRODUCTION .....	1
<b>1. LES MOUVEMENTS DE TERRAIN : DEFINITION ET UTILISATION DES DONNEES SPATIALES OU AERIENNES POUR LEUR RECONNAISSANCE.....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Notion de mouvement de terrain.....</b>	<b>2</b>
1.1.1. Définition .....	2
1.1.2. Les différents types de mouvements de terrain .....	2
<b>1.2. Reconnaissance des mouvements de terrain : utilisation des données spatiales ou aériennes .....</b>	<b>4</b>
1.2.1. Identification des zones des désordres en surface et évaluation des déplacements .....	4
1.2.2. Surveillance des instabilités : les réseaux de Télésurveillance .....	7
1.2.3. Définition et applications de la photogrammetrie.....	9
<b>2. LA METHODOLOGIE D'ANALYSE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN PAR PHOTOGRAMMETRIE.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1. Principe.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2. Mise en oeuvre de la méthode .....</b>	<b>12</b>
2.2.1. Acquisition des données de base .....	12
2.2.1.1. Choix des photographies aériennes .....	12
2.2.1.2. Les MNT calculés par l'IGN .....	14
2.2.1.3. Produits dérivés des photographies aériennes : les MNT et les orthophotos calculés par ISTAR .....	15
2.2.2. Traitement des données .....	18
2.2.2.1. Calage dans un référentiel de points photogrammétriques.....	18
2.2.2.2. Préparation d'un fichier matriciel.....	18
2.2.2.3. Transformation d'un fichier maillé (.XOZ) en MNT.....	19

2.2.3. Exploitation des MNT .....	19
2.2.3.1. Calcul du différentiel.....	19
2.2.3.2. Analyse qualitative.....	19
2.2.3.3. Analyse quantitative.....	20
2.2.3.4. Réalisation de profils topographiques .....	20
2.2.4. Visualisation des résultats : l'établissement de cartes colorées.....	23
2.2.4.1. But et techniques de coloriage .....	23
2.2.4.2. Le coloriage par pseudo-couleurs .....	23
2.2.4.3. Le "mélange" des images et des pseudo-couleurs.....	23
2.2.4.4. Les vues en perspectives .....	24
2.3. Evaluation des coûts et des délais.....	24
<b>3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA METHODOLOGIE DEVELOPPEE .....</b>	<b>26</b>
<b>3.1. Configuration du système de traitement d'image du département de télé-détection du BRGM (1991).....</b>	<b>26</b>
3.1.1. Matériel.....	26
3.1.2. Logiciels.....	26
3.1.3. Restitution des données .....	26
<b>3.2. Méthode de préparation et de traitement des modèles numériques de terrain.....</b>	<b>27</b>
3.2.1. Condensation des données .....	27
3.2.2. Lissage des données.....	27
3.2.3. Calcul du différentiel.....	27
3.2.4. Calcul de volumes sur différentiel de MNT .....	28
3.2.5. Extraction de profils topographiques.....	29
<b>3.3. Principaux programmes et fonctions utilisés .....</b>	<b>29</b>
<b>3.4. Les différents programmes développés dans le cadre de cette étude .....</b>	<b>31</b>
<b>3.5. Le programme XOY .....</b>	<b>32</b>

<b>4. EXEMPLES D'APPLICATION.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1. Les sites retenus et les données de base traitées.....</b>	<b>35</b>
4.1.1. Les sites étudiés : situation géographique et état des connaissances.....	35
4.1.2. Les données.....	36
4.1.3. Calcul des différences altimétriques et estimation de l'incertitude.....	36
<b>4.2. Résultats obtenus au niveau du site de la clapiere (evolution de 1970 à 1989).....</b>	<b>43</b>
4.2.1. Analyse qualitative.....	43
4.2.2. Analyse quantitative.....	47
4.2.3. Analyse des profils topographiques .....	53
<b>4.3. Résultats obtenus sur le Friolin (évolution de 1970 à 1986).....</b>	<b>53</b>
4.3.1. Analyse qualitative.....	53
4.3.2. Analyse quantitative.....	58
4.3.3. Analyse des profils topographiques .....	63
<b>5. CONCLUSIONS.....</b>	<b>68</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>71</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 -	Représentation schématique des principaux types de mouvements de terrain d'après les mode de déplacement (MALATRAIT, 1975) .....	3
Figure 2 -	Critères de classification morphométriques des mouvements de terrain (CROZIER, 1973).....	5
Figure 3 -	Procédure d'analyse par photogrammétrie des mouvements de terrain.....	13
Figure 4 -	Projection d'un MNT dans un plan vertical NW-SE et principe de mesure de la composante horizontale des désordres (perpendiculairement à ce plan).....	21
Figure 5 -	Correspondance entre valeur du pixel et amplitude du décalage altimétrique entre 2 MNT .....	22
Figure 6 -	Carte de situation géographique de la Clapière (sur fond topographique IGN, carte à 1/50 000).....	38
Figure 7 -	Schéma morpholithologique de la Clapière (d'après un cliché de 1988, et la carte géologique du LRPC de Nice).....	39
Figure 8 -	Glissement de la Clapière : aspect du versant en 1991 .....	40
Figure 9 -	Carte topographique de la Pointe du Friolin (sur fond topographique IGN à 1/25 000).....	41
Figure 10 -	Croquis de la face Est du Friolin,d'après un croquis original de GOGUEL (1988) .....	42
Figure 11 -	La Pointe du Friolin, face Est (cliché GOGUEL, 1989).....	42
Figure 12 -	Image du Modèle Numérique de Terrain (non interpolé) de la Clapière (1987) - pixel à 5m x 5m - .....	44
Figure 13 -	Carte de l'évolution de la composante verticale des désordres, obtenues par calcul de la différence entre les données MNT de 1970 et 1989.....	45
Figure 14 -	Carte de l'évolution de la composante verticale des désordres de 1987 à 1989.....	46
Figure 15 -	Vue en perspective du versant de l'W.NW vers l'E.SE (ou de l'amont vers l'aval), avec cartographie de la composante verticale des désordres de 1970 à 1989.....	48
Figure 16 -	Image en pseudocouleurs de la différence (1989-1987) calculée par rapport à un plan vertical NW-SE (mesure de l'évolution des désordres dans un plan horizontal).....	49
Figure 17 -	Distribution statistique de la composante verticale des désordres dans les trois principaux compartiments structuraux.....	50
Figure 18 -	Distribution statistique de la "quantité déplacée" dans les trois principaux compartiments structuraux.....	51
Figure 19 -	Caractéristiques statistiques des désordres superficiels de la Clapière de 1970 à 1989 .....	52
Figure 20 -	Localisation des profils topographiques réalisés sur le site de la Clapière, extraits des MNT de 1970 et 1989 .....	54
Figure 21 -	Site de la Clapière : profil topographique 1, extrait des MNT de 1970 et 1989.....	55
Figure 22 -	Site de la Clapière : profil topographique 2, extrait des MNT de 1970 et 1989.....	56

Figure 23 - Modèle Numérique de Terrain (MNTAERO) de type ISTAR, vue en perspective de la face Est .....	57
Figure 24 - Carte de l'évolution de la face Est de la Pointe du Friolin .....	59
Figure 25 - Vue en perspective SE - NW de la face Est du Friolin .....	60
Figure 26 - Vue en perspective E-W de la face Est du Friolin .....	61
Figure 27 - Caractéristiques statistiques des désordres superficiels du Friolin de 1970 à 1986.....	62
Figure 28 - Site du Friolin : Distribution statistique de la composante verticale des désordres de 1970 à 1986 .....	64
Figure 29 - Site du Friolin : localisation des profils topographiques .....	65
Figure 30 - Site du Friolin : comparaison des profils topographiques n° 2, 5 .....	66
Figure 31 - Site du Friolin : comparaison des profils topographiques n° 10 et 12.....	67

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 - Caractéristiques du MNT et de l'orthophoto obtenus à partir des photographies aériennes .....	17
Tableau 2 - Scénario d'étude d'un grand mouvement de terrain .....	69



## INTRODUCTION

En juillet 1991, sur cofinancement de la délégation aux Risques Majeurs du Ministère de l'Environnement, le BRGM a publié un premier rapport exploratoire sur la caractérisation morphologique numérique de versants instables (GIRAULT et ASTE, 1991). Ce rapport montrait ce que l'on pouvait espérer tirer de l'utilisation de modèles numériques de terrain représentatifs de détail de la morphologie de surface à deux époques différentes. Deux premières applications étaient présentées, l'une au cas du glissement de la Clapière dans les Alpes Maritimes, l'autre au glissement de Boulc, dans la Drôme.

Afin de poursuivre ces premiers résultats encourageants, la DRAEI a accordé au BRGM une subvention (n° 90381, imputée au chapitre 67-20 Article 80 Paragraphe 70), pour affiner la méthode d'analyse par photogrammétrie.

Dans ce présent rapport, nous rappelons, dans la première partie, quelques notions sur les mouvements de terrain et l'utilisation classique des données spatiales ou aériennes pour la reconnaissance des mouvements.

Puis, en deuxième partie, le principe de la méthode d'analyse des instabilités par photogrammétrie est développé. La troisième partie présente quelques détails techniques spécifiques à la méthode.

Dans la quatrième partie, il s'agit de quelques exemples d'application de la méthode au niveau de deux sites, la Clapière et le Friolin.

Enfin, ce rapport conclut sur le développement de la méthode, actuel et futur, et les applications possible.

Conjointement à cette étude, un travail de recherche a pu être développé sur ce sujet (GIRAULT, 1992).

Par ailleurs, on se rapportera au rapport BRGM R37785 pour avoir des détails ou des précisions sur les résultats obtenus au niveau des sites de la Clapière et du Friolin.

# **1. LES MOUVEMENTS DE TERRAIN : DEFINITION ET UTILISATION DES DONNEES SPATIALES OU AERIENNES POUR LEUR RECONNAISSANCE**

## **1.1. NOTION DE MOUVEMENT DE TERRAIN**

### **1.1.1. Définition**

Il est assez difficile de donner, en quelques mots, une définition précise des mouvements de terrain dont la terminologie - que certains auteurs utilisent indifféremment, à tort, pour désigner le processus ou l'accumulation des matériaux qui en résulte - recouvre une grande variété de phénomènes.

On entend, par mouvement de terrain, un déplacement, mesurable, de tous les matériaux (roches, formations superficielles) qui, sur un versant, même à pente très faible, peuvent être mis en mouvement par suite d'une rupture d'équilibre. Ce sont des mouvements de masse dont le moteur est toujours la gravité, et qui se produisent lorsqu'une certaine limite rhéologique du milieu (résistance à la traction, à la compression simple, au cisaillement, limite de liquidité d'Atterberg,...) est dépassée. Ils sont caractérisés par l'existence d'une (ou de plusieurs) surface(s) de rupture, et par un déplacement, rarement observé en temps réel, assez rapide.

### **1.1.2. Les différents types de mouvements de terrain**

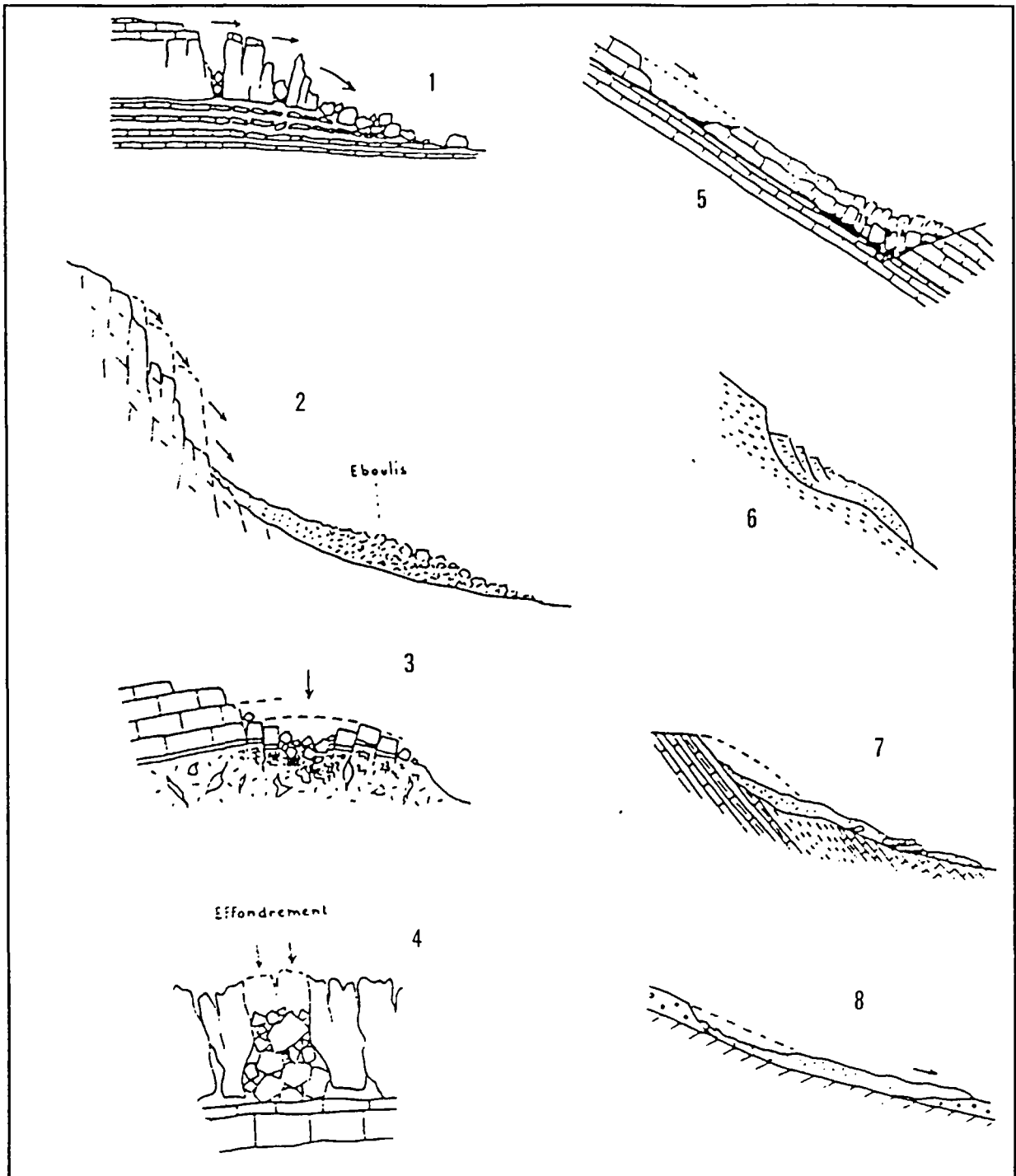
Il existe de très nombreuses classifications des mouvements de terrain (FLAGEOLLET, 1988). Il n'est pas question de les discuter ici. Rappelons simplement que beaucoup d'entre elles sont basées sur des considérations plus ou moins théoriques, mais que peu sont utilisables au stade du lever de terrain (MALATRAIT, 1975).

Les mouvements de terrain peuvent être classés par types d'après leur mode de déplacement et d'après leur complexité. On distingue (figure 1), d'après les critères de déplacements (MALATRAIT, 1975; FILLIAT, 1981) :

- les affaissements, qui sont progressifs, et les effondrements, brusques. Ces phénomènes sont dus à l'existence de vides souterrains dont l'évolution - rupture du toit - provoque l'abaissement topographique des terrains sus-jacents ;

- les écroulements, (ou éboulements) qui se produisent lorsque certaines conditions (en particulier la topographie et la fissuration) favorisent une rupture brutale dans un massif rocheux

- les glissements, qui affectent les matériaux meubles, très souvent argileux, à comportement élasto-plastique, dans lesquels se développe(nt) une (ou plusieurs) surface(s) de rupture. On distingue suivant la forme de cette surface de rupture, les glissement plans, rotationnels ou quelconques ;



- 1, 2 : éboulements (écroulements)
- 3, 4 : effondrements
- 5, 6 : glissements plan (5) et rotationnel (6)
- 7, 8 : coulées

Figure 1 - Représentation schématique des principaux types de mouvements de terrain, d'après les modes de déplacement (MALATRAIT, 1975)

- les mouvements par fluage, dus au comportement visco-plastique des matériaux ; ils se développent essentiellement dans les milieux argileux ;

- les coulées boueuses, écoulements visqueux ou fluides, qui peuvent progresser sur plusieurs centaines de mètres sur des pentes très faibles lorsqu'ils sont canalisés par une dépression topographique.

Par ailleurs, d'après leur complexité, on reconnaît les mouvements dits simples, les mouvements généralisés ou complexes.

## **1.2. RECONNAISSANCE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN : UTILISATION DES DONNEES SPATIALES OU AERIENNES**

### **1.2.1. identification des zones des désordres en surface et évaluation des déplacements**

Les grandes déformations qui traduisent l'évolution des versants se produisent à des rythmes assez différents en fonction de la nature et de l'état des matériaux concernés, des manifestations et de l'intensité des facteurs aggravants de déséquilibre, climatologiques, sismiques, hydrauliques ou anthropiques.

La compréhension des mécanismes qui régissent l'évolution de ces versants passe toujours par l'analyse de leurs déformations. Or, il est nécessaire, pour parvenir à cette compréhension, de connaître avec suffisamment de précision : l'historique des désordres, le contexte géologique et structural du site, sa morphologie, la nature et les propriétés mécaniques des matériaux qui le constituent (lithologie, composition chimique...), les facteurs de déséquilibre qui peuvent survenir (ou qui se sont déjà produits), et bien sûr, le contexte hydrogéologique.

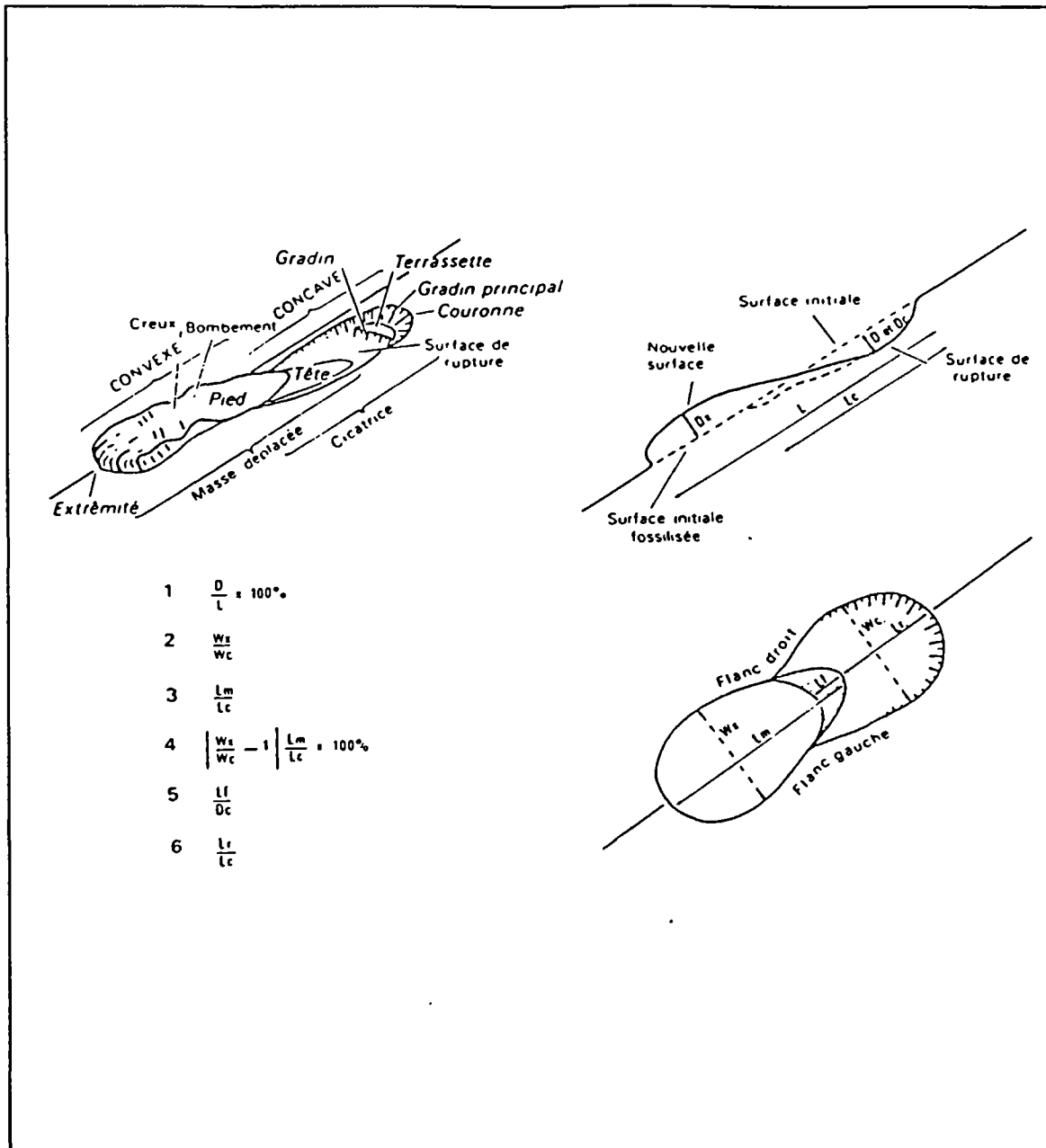
Les premiers éléments remarquables sur un site affecté par un mouvement de terrain sont :

- la morphologie du versant
- la morphologie et l'emprise de la zone de désordres
- la simplicité ou la complexité apparente du mouvement.

Faute de mieux, certaines données, faciles à acquérir, comme les indices morphométriques, qui sont des rapports de longueur (figure 2), peuvent être utilisées pour caractériser, dans un premier temps au moins, un mouvement de terrain.

Toutefois, l'analyse détaillée d'un site commence par l'identification de la zone de désordres et de ses limites apparentes, à l'aide de critères bien spécifiques : présence ou absence de niches d'arrachement, de bourrelets, de ravinements, de crevasses, d'éboulis... Elle comprend aussi un inventaire des sources permanentes ou temporaires, et au minimum, une estimation de leur débit en fonction des saisons.

Les autres critères d'appréciation ne peuvent être dégagés, et éventuellement hiérarchisés, qu'après des investigations géologiques, structurales, hydrologiques, climatologiques, historiques, (...), plus complètes, qui permettent d'avoir une connaissance approfondie du site et des transformations qui ont pu l'affecter.



INDICES MORPHOMETRIQUES :

- 1 : profondeur
- 2 : dilatation
- 3 : ténuité
- 4 : écoulement plastique
- 5 : écoulement visqueux
- 6 : déplacement

Figure 2 - Critères de classification morphométriques des mouvements de terrain (CROZIER, 1973)

Il importe donc, dans un premier temps, de définir correctement :

- la géométrie de la zone perturbée,
- les vitesses de déplacement,
- et dans la mesure du possible, la géométrie de la surface de rupture principale.

La connaissance de ces facteurs, ou au moins des deux premiers, permet d'exercer, si nécessaire, une surveillance du versant basée sur des mesures de distance et de vitesses de déplacement d'un certain nombre de repères, naturels ou non, situés dans la zone de désordres, par rapport à un référentiel fixe.

Les mesures de vitesse ont pour objectif la détection d'une éventuelle accélération ou, au contraire, d'une stabilisation du mouvement.

Les mesures de distance sont destinées au relèvement des vecteurs de déplacement - c'est-à-dire à la détermination du sens des déplacements - et, accessoirement, à la détermination de la géométrie des masses déplacées.

La connaissance de la géométrie de la surface de rupture principale permet, quant à elle, d'évaluer par calcul la stabilité du versant et, donc, de déterminer des solutions confortatives au plus juste prix, en réduisant autant que possible le facteur de sécurité, Fs.

♦ **Reconnaissance de la morphologie du versant et de la zone des désordres par photo-interprétation :**

Comme dans beaucoup de branches de la géologie (cartographie, exploration minière, études hydrogéologiques...), les photographies aériennes sont très précieuses : peu onéreuses lorsqu'elles existent, et d'utilisation facile, elles sont bien adaptées, par leur échelle et leur définition, aux reconnaissances morphologiques et structurales, ainsi qu'à l'identification de zones de désordres.

Par comparaison de plusieurs clichés, pris par exemple à plusieurs années d'intervalle, on peut observer les transformations morphologiques d'un site instable, les limites de la zone de désordres, les secteurs éventuellement menacés. Elles peuvent de plus, comme nous le verrons plus loin, être exploitées par photogrammétrie.

Les photographies aériennes sont donc couramment utilisées pour reconnaître l'extension d'un mouvement de terrain déclaré, sa morphologie, ses caractéristiques, les secteurs éventuellement menacés, etc.

♦ **Deux méthodes traditionnelles permettent de mesurer des déplacements de surface :**

- la topométrie

Cette méthode est basée sur des mesures d'angles et de distances, dont le but est la détermination du sens et de l'amplitude du déplacement d'objets ponctuels. Ces mesures peuvent être directes (chaînage à l'aide de mètre-ruban, pied à coulisse, fissuromètre capteur, distancemètre, espion de roche...) ou indirectes (stadimétrie, distancemétrie).

Dans le cas des mesures directes, la précision (ou erreur relative au kilomètre) requise sera la haute précision (1/100 000, soit +/- 1 cm/km).

Dans le cas des mesures indirectes (mesures électro-optiques, où la mesure de la distance est obtenue par la mesure du déphasage entre les signaux émis et reçus), la précision dépend de la distance mesurée,  $D$ , et peut atteindre  $\pm 1 \text{ cm}$  à  $\pm 2 \cdot 10^{-6} \cdot D$ .

Il est nécessaire de caler les mesures par rapport à un système de référence établi à partir de points supposés fixes. Une triangulation est alors effectuée pour déterminer les distances entre les différents points du réseau. Plusieurs techniques (ou "cheminements") peuvent être utilisées selon la précision recherchée. Celle-ci peut atteindre, en théorie, 0,3 mm.

Il est facile de comprendre que, pour déceler un mouvement, ces observations, longues, ponctuelles et discontinues dans le temps, doivent être renouvelées fréquemment, ce qui augmente le coût de cette méthode, d'autant que ces mesures ne peuvent être effectuées que par du personnel qualifié.

Toutefois, aujourd'hui, il existe certains systèmes d'auscultation automatisés, malheureusement encore trop onéreux pour pouvoir être standardisés, qui complètent maintenant l'arsenal de mesures par topométrie, et effectuent, automatiquement, à la fois la recherche des points de mesure, les mesures et leur enregistrement continu ou semi-continu et, enfin, leur transmission vers un centre de traitement.

#### **- la photogrammétrie**

Celle-ci permet de déterminer, à partir de clichés stéréoscopiques, les coordonnées  $(x,y,z)$  de points aisément identifiables sur les photos. Moins précise que la topométrie, la photogrammétrie a néanmoins l'avantage de permettre d'obtenir un beaucoup plus grand nombre de données. Par ailleurs, c'est une méthode beaucoup moins discontinue, dans l'espace, que la précédente. A partir de ces données, on peut, grâce à l'informatique, calculer des modèles numériques de terrain (MNT), représentations mathématiques continues de la morphologie du versant. En outre, cette méthode a l'avantage d'être nettement moins onéreuse que la précédente, et donc plus facilement applicable ; la notion de photogrammétrie est définie de façon plus détaillée au paragraphe 1.2.3.

### **1.2.2. SURVEILLANCE DES INSTABILITES : LES RESEAUX DE TELESURVEILLANCE**

♦ La surveillance d'un mouvement a pour but la mise en évidence de l'évolution du versant, avec le double objectif d'aider à la compréhension du phénomène, et d'assurer la sécurité des personnes et des biens en cas d'évolution dangereuse.

La mise en place d'un tel système peut-être proposée lorsque :

- les solutions confortatives et l'intérêt de la zone à protéger sont disproportionnées,
- le confortement est impossible à réaliser, ou encore
- c'est une solution d'attente, le confortement devant être différé, voire redéfini, à la suite d'une évolution nouvelle du site.

Assurer la sécurité, suppose que l'on soit capable de détecter et d'interpréter un ou des signes précurseurs d'une évolution catastrophique, c'est-à-dire que l'on puisse mesurer un paramètre significatif (ou mieux, plusieurs) dont la grandeur, en dépassant un seuil de tolérance, sera significative d'une évolution importante, voire alarmante.

Les paramètres habituellement mesurés sont : les déplacements, les tensions et les vitesses de déplacement, qui ont une signification en termes de stabilité. Il est possible d'en imaginer d'autres, en fonction de l'examen des désordres.

La fréquence des mesures, la sensibilité et la précision et la fiabilité du système de mesure, doivent permettre de déclencher l'alerte assez tôt pour "gérer" la crise. Mettre en oeuvre un système fiable reste cependant difficile : il faut avoir trouvé un paramètre significatif et pouvoir suivre son évolution sans déclencher de fausses alertes, tout en disposant d'appareils de mesure suffisamment sensibles.

La surveillance d'un site est d'autant plus efficace que l'on a une bonne compréhension de la pathologie des terrains et des désordres. On réalise, en même temps que la préparation d'un système de surveillance, une cartographie détaillée (à grande échelle) du site, afin de disposer d'un document de référence.

A vrai dire, il pourrait exister autant de méthodes de surveillance que de paramètres à mesurer. Mais, en réalité, peu de paramètres se prêtent à des mesures simples. En général, les dispositifs de surveillance sont donc basés sur des mesures de déplacements faciles à mettre en oeuvre. Mais, les progrès technologiques aidant, ce sont des appareils de plus en plus sophistiqués et performants, mais plus onéreux aussi, qui apparaissent sur le marché. Les mesures sont réalisées automatiquement, traitées par une micro-centrale et transmises par télémétrie à un centre de contrôle.

♦ Des deux sites que nous allons étudier dans les chapitres suivants, seul, pour le moment, celui de la Clapière a été pourvu d'un réseau de télésurveillance (justifié par des contraintes socio-économiques). Ce réseau est basé, depuis 1982, sur la mesure répétitive de distance entre des repères topographiques (ou cibles), placés dans la zone de désordres, et un système de visée (source), situé sur le versant opposé, en rive droite de la Tinée (FOLLACI, 1988).

Dans le détail, il s'agit d'un dispositif électro-optique à infrarouge (système généralement utilisé par les géomètres), qui comprend d'une part deux distance-mètres montés sur théodolite, placés sous abri, face à la Clapière, et, d'autre part, un certain nombre de cibles réfléchissantes disposées dans et autour de la zone de désordres. A l'origine, les mesures étaient effectuées une fois par semaine au moins, plus souvent si nécessaire, et calées, chaque année, par triangulation. En 1991, le système a été entièrement automatisé et complété par des mesures extensiométriques.

Les limites du système sont plus imposées par le site lui-même que par la technologie : plusieurs cibles ont été perdues, détruites par des éboulements venus de plus haut qu'elles, ou par l'effondrement de leur assise.



### **1.2.3. DEFINITION ET APPLICATIONS DE LA PHOTOGRAMMETRIE**

♦ **Définition :**

La photogrammétrie aérienne est une méthode utilisée pour déterminer la forme et les dimensions des ensembles ou des objets visibles soit sur des photographies prises d'avion, ou soit sur des images satellites. C'est une méthode ancienne, mise au point avant 1870 par LAUSSE DAT. Elle est basée sur l'analyse de couples stéréoscopiques, c'est-à-dire de clichés successifs présentant un recouvrement de 55%, et dont l'observation simultanée sous stéréoscope permet la perception du relief.

♦ **Applications :**

La photogrammétrie est utilisée de façon classique pour l'établissement de plans à très grande échelle (1/5 000 à 1/500).

Grâce à un calage sur des points de référence (sur le réseau géodésique par exemple), on peut, par photogrammétrie, calculer les coordonnées (x, y, z) de chaque point identifié sur les photographies. La précision altimétrique atteint :

- 10 à 15 cm pour des documents à l'échelle du 1/1 000,
- 20 à 25 cm pour ceux à l'échelle du 1/2 000,
- 30 à 40 cm pour ceux à l'échelle du 1/5 000.

Très approximativement, il y a un rapport de l'ordre de 1 à 4 ou 5 entre l'échelle de la prise de vue et l'échelle raisonnable du document que l'on veut obtenir. Ainsi, par exemple, fait-on des prises de vue à l'échelle du 1/8 000 pour établir des documents à l'échelle du 1/2 000.

Classiquement, c'est par cette voie, et en effectuant un lissage des données, que l'on détermine les courbes de niveau des cartes topographiques.

Les études relatives aux glissements de terrain font souvent appel à la photogrammétrie pour l'établissement de plans en courbes de niveau.

Avec plusieurs missions étalées dans le temps, il est possible de comparer des plans successifs ; mais cette comparaison est toujours difficile : il faut que soient reportés sur ces plans des points remarquables (escarpements, gros blocs de rochers, constructions, routes...), pour obtenir des mesures significatives. Sinon, la comparaison se réduit à l'examen des courbes de niveau, à la recherche de zones déprimées ou gonflées, à la comparaison des pentes, de sorte que la perception des déformations reste qualitative et peu précise.

L'informatique permet maintenant d'exploiter ces données par l'intermédiaire des MNT (Modèles Numériques de Terrain), représentations mathématiques de la morphologie d'un versant. L'évolution d'une morphologie pourra plus facilement et plus complètement être évaluée par la comparaison de deux MNT, réalisés à partir de deux couples de clichés aériens, dont le plus ancien constituera la référence. Une telle démarche ne pourra toutefois être pertinente que si la variation de la grandeur mesurée (en principe l'altimétrie) est largement supérieure à l'incertitude qui pèse sur sa détermination.

♦ **Le développement des outils de saisie photogramétrique :**

L'IGN et de nombreuses sociétés privées ont développé, depuis une vingtaine d'années, des procédures spécialisées visant à l'établissement de plans détaillés. Mais, avec la puissance des micro-ordinateurs, l'apparition sur le marché de nouveaux logiciels de photogrammétrie (Digital Video Plotter, commercialisé par Leica - par exemple), la vulgarisation des procédures de numérisation de documents par scannérisation, et le développement des SIG, de nombreux bureaux d'études pourront effectuer sans difficulté l'analyse numérique des couples de photographies aériennes, - avec une précision qui reste toutefois à définir -, à des fins diverses (études d'impact, environnement, génie civil...).

## **2. LA METHODOLOGIE D'ANALYSE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN PAR PHOTOGRAMMETRIE**

Au niveau de l'analyse d'un versant instable, pour appréhender le champ de déformation, surtout s'il est complexe, il est nécessaire de pouvoir décrire, dans l'espace et en détail, la morphologie de la zone de désordres de façon aussi continue que possible. La photogrammétrie est la méthode qui peut fournir, à cet effet, le plus grand nombre de points, même si la précision du calage de ces données peut être inférieure à la précision qui serait obtenue par d'autres méthodes. En utilisant les données photogrammétriques, on pourra modéliser de la façon la plus fidèle possible, cette morphologie et suivre, grâce à des répétitions de l'opération, ses transformations dans le temps.

Nous proposons dans ce chapitre une méthode pour traiter des données de type photogrammétrique, afin de réaliser des modèles numériques de terrain et de décrire la morphologie d'une zone instable prise dans sa totalité. Cette méthode permet, à condition de disposer de ces données sur plusieurs dates, d'établir une cartographie du champ de déformation du versant. Nous utilisons également, dans le même but, des modèles numériques de terrain d'un type nouveau, dont nous examinerons l'intérêt.

### **2.1. PRINCIPE**

L'ensemble des moyens utilisés habituellement pour le traitement des images numériques, largement développés ces dernières années, rend désormais possible une approche relativement nouvelle de l'auscultation des versants instables, à condition de disposer de données spécifiques suffisamment précises pour décrire la morphologie d'un versant à un moment donné.

- Les Modèles Numériques de Terrain, MNT, sont des fichiers altimétriques, constitués par un réseau maillé régulier, chaque maille étant repérée par les coordonnées de son centre ( $x$ ,  $y$  et  $z$ ). De l'origine des données dont ils dérivent dépendent leurs qualités, c'est-à-dire leur précision et leur valeur représentative.

Ces données ne peuvent être que de type photogrammétrique (GIRAULT et ASTE, 1991). Actuellement, deux approches permettent d'obtenir des MNT, ce sont :

- la photogrammétrie traditionnelle, qui procède par calcul de coordonnées ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) de plusieurs points identifiés sur les photographies aériennes, jusqu'à obtenir un semis de points cotés suffisamment dense pour pouvoir, à partir d'un lissage des points, calculer des courbes de niveau ; il est aussi possible d'utiliser directement des données lissées, par digitalisation de courbes de niveau ;

- une méthode numérique développée récemment par une société privée (société ISTAR) ; à partir de l'analyse numérique de couple stéréoscopique de photographies aériennes, des Modèles numériques de Terrain sont obtenus, il s'agit de "MNTAERO".

- Les données étant obtenues par l'une quelconque de ces deux approches, le principe de cette méthode est alors le suivant : en disposant de plusieurs modèles numériques de terrain (c'est-à-dire de plusieurs descriptions mathématiques morphologiques) d'un même site, à des dates successives  $T_0, T_1, T_2, T_3, \text{etc.}$ , il est envisageable, moyennant certaines conditions, de mettre en évidence les transformations de la morphologie du site, entre ces différentes dates : celles-ci doivent en effet se traduire par des modifications, locales, des MNT correspondant.

Ces conditions sont liées à la nature et à l'ampleur des désordres survenus pendant l'intervalle de temps considéré, donc, partiellement au moins, à la nature des matériaux mobilisés. Par exemple, il est facile de concevoir que, a priori en tout cas, des affaissements ou des écroulements seront plus facilement révélés que lorsqu'il s'agira d'étudier l'évolution morphologique de coulées de boue. Mais ces conditions sont aussi liées à la résolution en  $x, y$  et  $z$  des modèles numériques utilisés, c'est-à-dire à la taille de la maille ( $x, y$ ). Celle-ci dépend de la densité du semis de points descriptifs de l'état de surface du site (ou de l'équidistance des courbes de niveaux dans le cas où l'on travaille à partir de données digitalisées).

- Pour un site donné, la phase première phase consiste donc à préparer deux MNT espacés dans le temps ; lorsque ces MNT sont prêts, on calcule, dans un deuxième temps, leur différence algébrique, pixel à pixel, pour mettre en évidence l'évolution du site.

Ce calcul ne concerne que la valeur altimétrique de chaque pixel, ceux-ci étant repérés par les coordonnées  $x$  et  $y$  de leur centre. On ne percevra donc que la composante verticale des désordres.

Cependant, il est possible de dépasser cette limitation, en calant par exemple les MNT dans un repère vertical, choisi en fonction de la topographie du versant. Pour ce faire, il y a lieu de calculer les coordonnées  $(x',y',z)$  des points  $(x,y,z)$  dans un nouveau repère  $xOz$ . En se plaçant par exemple, face au versant, par rotation, il est alors possible d'obtenir une image de la composante horizontale (perpendiculaire au plan de référence) des mouvements.

Enfin, l'interprétation de ces différences se fait à la lumière du contexte local (géologique, hydrologique, historique des désordres....).

- Les données ont été traitées sur VAX. La procédure technique détaillée est décrite au chapitre 3. Au cours du développement de cette méthode, de nombreux programmes ont été utilisés, et d'autres ont été écrits spécifiquement.

## **2.2. MISE EN OEUVRE DE LA METHODE**

L'ensemble de la procédure est présentée dans la figure 3. Au total, quatre phases principales la constitue :

- choix et acquisition des données de base,
- traitement des données,
- exploitation des données traitées,
- visualisation et restitution des résultats.

### **2.2.1 Acquisition des données de base**

#### **2.2.1.1. Choix des photographies aériennes**

##### **♦ Les couvertures photographiques de l'IGN**

Ci-après, sont rassemblées quelques informations pratiques générales sur les couvertures photographiques de l'IGN :

- *échelles IGN moyennes de restitution des photographies* : 1/15 000, 1/20 000, 1/25 000, 1/30 000, 1/60 000
- *organisme coordinateur et distributeur* : IGN (Institut Géographique National) ; disponibles à la Photothèque Nationale située à St Mandé, ainsi que dans les unités régionales IGN
- *date* : depuis 1939 à actuel. Dans certaines régions il peut exister plusieurs couvertures aériennes à différentes échelles et/ou dates de prises de vue.
- *délais d'acquisition* : 2 à 4 semaines
- *coûts* : de 80 FF à 30 FF en fonction du nombre de tirages commandés.
- *systèmes de coordonnées* : pour chaque mission aérienne, le découpage de la couverture photographique est situé grossièrement sur un fond topographique IGN à 1/50 000, réduit.

Les photographies aériennes sont acquises de façon systématique sur le territoire français par l'IGN, dans le cadre de travaux financés par l'Etat. La couverture est renouvelée en moyenne tous les 5 ans environ. Ces photographies sont restituées, en général, à des échelles comprises entre le 1/60 000 et le 1/15 000, et exceptionnellement, à des échelles plus grandes. Depuis 1971, elles le sont à l'échelle du 1/30 000. Ces photos sont utilisées pour la préparation et la révision de la carte topographique à 1/25 000, ou à d'autres fins (travaux d'aménagement de génie civil, par exemple).

La photothèque de l'IGN (Photothèque Nationale) est à ce titre particulièrement précieuse, puisqu'elle permet, en quelque sorte, "de remonter le temps" et d'étudier les transformations, naturelles ou anthropiques, des paysages, à partir de documents de référence.

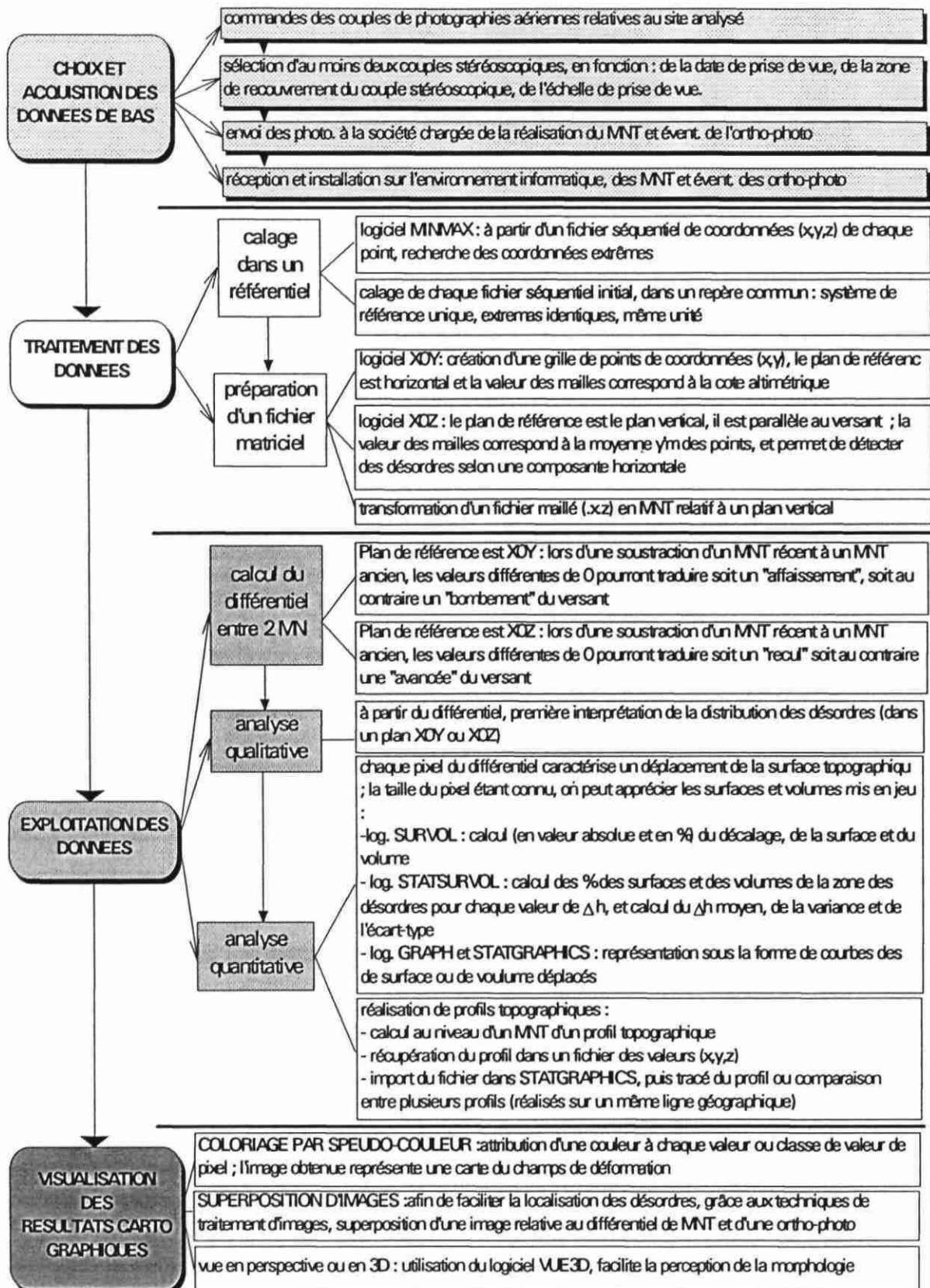


Figure 3 - Procédure d'analyse par photogrammétrie des mouvements de terrain

Ces photographies sont habituellement restituées sur émulsions panchromatiques (Noir et Blanc), mais la tendance est maintenant à la réalisation de clichés en couleurs. Il existe également des missions en infrarouge (couleurs ou Noir et Blanc), en général effectuées pour des besoins spécifiques.

Par ailleurs, l'IGN commercialise, depuis peu, des photographies et ortho-photographies numérisées.

♦ **Les couvertures photographiques particulières**

Dans le cadre de l'Inventaire Forestier National, coordonné avec des programmes départementaux, l'IGN réalise une couverture à des échelles comprises entre le 1/14 500 et le 1/20 000, avec une période de renouvellement voisine de 10 ans.

Lorsque les missions classiques de l'IGN s'avèrent inadaptées (échelles insuffisantes par exemple), il est possible d'effectuer des missions spécifiques afin de répondre à des demandes particulières.

De telles missions sont ainsi réalisées pour les études de tracés linéaires (voies ferrées - TGV par exemple -, autoroutes, lignes électriques...), pour les études de barrages, pour les inventaires forestiers, etc. La loi française impose d'ailleurs, dans le cadre des études d'impact, l'établissement d'un état des lieux avant travaux ; ce constat est souvent établi à l'aide de photographies aériennes.

### **2.2.1.2 Les MNT calculés par l'IGN**

♦ **Les MNT calculés à partir de courbes de niveau**

Il s'agit de MNT réalisés à partir de courbes de niveau digitalisées, du type de ceux, par exemple, que commercialise l'IGN : ils dérivent dans ce cas de cartes à l'échelle du 1/25 000, et sont éventuellement améliorés par des analyses photogrammétriques de photographies aériennes à l'échelle du 1/60 000, en zone de fort relief.

La qualité de ces MNT dépend de l'espacement des courbes de niveau et du mode d'interpolation entre les points. Ceux de l'IGN ont une maille de 75 m ou de 50 m; ils sont faciles à manipuler et couvrent une surface assez grande, ce qui permet de les utiliser conjointement avec les images de satellites (Landsat MSS ou TM, SPOT). La résolution dans le plan horizontal est cependant assez faible et n'est pas compatible pour une exploitation géotechnique: les données altimétriques ne permettent pas d'identifier de phénomènes évolutifs comme les mouvements de terrain. Ces MNT sont par contre utiles pour l'appréhension globale du relief.

Il est bien évidemment possible de numériser (par digitalisation) les courbes de plans à grande échelle, et décrire ainsi assez précisément la morphologie d'un site. Ce mode opératoire a été utilisé pour une étude concernant le site de Boule dans la Drôme, où des coulées de boues se sont produites (GIRAULT et ASTE, 1991).

♦ **Les semis de points photogrammétriques**

Selon une procédure plus rarement mise en oeuvre, les clichés aériens sont exploités suivant une maille. Dans un système de référence donné, l'opérateur se déplace, suivant y ou x, d'une longueur déterminée et, pour chaque point de la file sélectionnée, mesure l'altitude. Le résultat obtenu est un semis de points régulier à partir duquel il est possible de préparer un MNT à maille fine (du type de ceux que nous avons utilisés sur la Clapière, chapitre 4).

**2.2.1.3 Produits dérivés des photographies aériennes : les MNT et les orthophotos calculés par ISTAR**

♦ **Principe de réalisation des MNT ISTAR**

A partir de chaque couple de photographies aériennes sélectionnées, on peut procéder au calcul du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et de l'orthophoto ; notons que pour cela il est préférable de disposer de contre-type pour chacune des photographies aériennes, plutôt que des photographies restituées sur support papier classique.

Ces MNT sont calculés à partir de couples stéréoscopiques d'images numériques, selon une méthodologie mise au point pour l'exploitation d'images SPOT ; le principe est basé sur la recherche, par auto corrélation, des points homologues entre les deux images du couple. Cette méthodologie a été étendue, depuis peu, aux photographies aériennes.

Les produits livrés sous forme numérique par la société ISTAR sont :

- le MNT de la zone de recouvrement des photographies (16 km<sup>2</sup> dans le cas des missions classiques à l'échelle du 1/30 000),
- les orthophotos correspondantes (en option),
- une notice technique, descriptive des fichiers livrés et de la qualité des MNT.

♦ **Caractéristiques des MNT et des orthophotos**

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) est un fichier altimétrique présentant le réseau régulier des altitudes d'un domaine géographique. Le MNT est calculé à partir d'un couple stéréoscopique de photographies aériennes, puis il est recalé par rapport à une carte. Le recalage utilise des points d'appui au sol dont les coordonnées et l'altitude sont relevées sur une carte.

L'orthophoto est l'image numérique noir et blanc ou couleur d'un domaine géographique. L'orthophoto est superposable à la carte de référence où ont été relevées les coordonnées de la fenêtre géographique. Il s'agit d'un produit géocodé, corrigé des déformations géométriques au moyen des MNT.

Les produits MNT et orthophotos sont des images raster, c'est-à-dire représentées par une grille. Chaque pixel de la grille est repéré par ses coordonnées image. Les formules de transformations coordonnées image en coordonnées cartographiques sont fournies avec les images numériques par l'organisme qui a effectué le calcul (en l'occurrence ISTAR, pour ce qui concerne ce présent travail). Le système de projection cartographique doit être l'un des systèmes de projection figurant sur les cartes. La valeur du pixel du fichier MNT représente l'altitude moyenne du pixel.

♦ **Calcul du MNT et de l'orthophoto**

A partir de photographies aériennes fournies par le client, ISTAR fabrique le MNT et l'orthophoto.

Avant leur traitement, les photographies aériennes font l'objet d'une validation par ISTAR. Les photographies aériennes validées sont ensuite scannées pour une exploitation numérique. Les caractéristiques du MNT et de l'orthophoto obtenus à partir des photographies aériennes sont résumées dans le tableau 1:

• **Procédure et coûts (H.T.) d'acquisition des photographies aériennes puis du MNT (pixel = 2m ou 4m) et de l'orthophoto (pixel = 1m ou 2m) :**

1) sélection et commande d'un couple de photographies aériennes à l'IGN :

- coût moyen : 100 FF
- délais : 2 semaines

Notons qu'il est cependant préférable d'utiliser des contretypes (ou négatifs) des clichés ; le prix unitaire d'un contretypage étant de 450F

2) commande de la coupure topographique à 1/25 000, à l'IGN :

- coût moyen : 50FF
- délais : 1 semaine

3) envoi des photographies aériennes et de la coupure topographique à ISTAR, puis commande d'un MNT et d'une orthophoto :

pour un couple de photographies aériennes noir et blanc

- MNT, résolution : 17 500FF
- orthophoto (noir et blanc) avec traitement radiométrique, résolution de 2m : 9 000FF
- restitution des données sur support magnétique
- délais : 3 semaines

4) transformation des données au format souhaité, par le département télédétection du BRGM

- coût moyen : 1 journée d'ingénieur
- délais : 1 à 2 semaines



DONNEES  CARACTERIS- TIQUES	PHOTO. AERIENNES Scènes entières noir et blanc (SE - NB) pour des clichés au 1/8.000 - 1/30 000  MNT et Ortho. compatible à l'échelle 1/10 000	PHOTO. AERIENNES Scènes entières noir et blanc (SE - NB) pour des clichés au 1/15 000 - 1/60 000  MNT et Ortho. compatible à l'échelle 1/10 000
Surface en km <sup>2</sup>	pour un couple à 1/15 000 : 4,4 km <sup>2</sup> (ou 2,7 km x 1,6 km) pour un couple de 1/20 000 : 8 km <sup>2</sup> (ou 3.6 km x 2.2 km) pour un couple de 1/30 000 : 18 km <sup>2</sup> (ou 5.5 km x 3.3 km)	
Pas du MNT en mètre	2 m	4 m
Pas en mètre de orthophoto	1	2
Nombre de canaux de orthophoto	1	1
Echelle des cartes pour la saisie des points d'appui	1/25 000	1/25 000
Précision en (x,y), écart quadratique moyen en mètre	1	2
Précision en z, écart quadratique moyen en mètre	< 2m	< 4m

Tableau 1 - Caractéristiques du MNT et de l'orthophoto obtenus à partir des photographies aériennes

## **2.2.2. Traitement des données**

### **2.2.2.1. Calage dans un référentiel de points photogrammétriques**

Les coordonnées (x,y,z) de chaque point, à une date T sont enregistrées sous forme numérique, dans un fichier séquentiel.

Il y a lieu, dans un premier temps, de "classer" ces données dans une matrice à maille carrée, dont l'opérateur détermine le pas.

La méthodologie étant basée sur la comparaison de MNT, il est évidemment indispensable de caler ceux-ci dans un repère commun. Il faut donc rechercher, auparavant, les extrêmes des coordonnées des points photogrammétriques.

#### *Le logiciel MINMAX*

Nous avons ainsi été amené à écrire le logiciel MINMAX pour rechercher les points Xmin, Xmax, Ymin, Ymax, Zmin et Zmax. Pour chaque fichier de coordonnées, le programme parcourt le fichier séquentiel et compare entre eux les x, les y et les z, en sélectionnant les minima et maxima.

### **2.2.2.2. Préparation d'un fichier matriciel**

Lorsque ces extrêmes ont été reconnus, il devient possible de caler chacun des fichiers séquentiels dans le même référentiel et de calculer pour chaque fichier les matrices dont les mailles auront pour coordonnées celles du milieu des pixels. Cette opération est réalisée avec le logiciel XOY si l'on recherche des différences altimétriques, ou avec le logiciel XOZ, dérivé du précédent, si l'on se place face à plan vertical pour rechercher la composante horizontale des désordres.

#### *Le logiciel XOY*

"XOY", qui existait en version BASIC ("EPUR") a été adapté pour la circonstance au FORTRAN. Il crée une grille de points (x,y), lit les coordonnées (x,y,z) contenues dans les fichiers (nom XYZ), et "range" chaque point dans la maille de la grille lui correspondant (les données étant alors référencées dans le plan xOy). Le programme attribue ensuite à chacune de ces mailles la cote altimétrique z, moyenne des cotes des points reconnus comme lui appartenant. Les mailles de la grille non renseignées ont pour cote 0. Le fichier obtenu est appelé (nom XOY).

#### *Le logiciel XOZ*

"XOZ", dérivé de XOY, est utilisé pour projeter les données dans un plan vertical, afin d'autoriser la détection de composantes horizontales des désordres. La projection des données dans le plan vertical n'ayant de sens que si l'on se place face au versant, le programme propose d'effectuer la rotation nécessaire et calcule, dans ce cas, les coordonnées x' et y' des triplets (x,y,z). Le programme crée donc des mailles (x',y), et attribue à chaque maille la moyenne  $y'_m$  des points lui appartenant.

### **2.2.2.3. Transformation d'un fichier maillé (.XOZ) en MNT**

Le fichier maillé (.XOZ) est ensuite transformé en MNT, codé sur 16 bits ; chaque pixel a pour valeur une cote altimétrique ; les pixels non renseignés reçoivent la valeur 0. Il est alors nécessaire d'attribuer, par interpolation, une cote "probable" à tous les pixels du MNT, ce qui est réalisé par des filtrages successifs. Le résultat est vérifié par contrôle visuel, en affichant l'image résultat sur moniteur.

### **2.2.3. Exploitation des MNT**

#### **2.2.3.1. Calcul du différentiel**

Le calcul de la différence entre deux MNT, simple soustraction arithmétique effectuée sur les valeurs des pixels se correspondant, donne la valeur de la composante des désordres perpendiculaire au plan de référence.

Pour conserver le maximum de précision, l'opération est effectuée sur les fichiers codés en 16 bits.

Le résultat, converti en image - codée sur 8 bits (256 niveaux de gris) - met en évidence la distribution et l'intensité des désordres.

Le mode opératoire est précisé plus loin (chapitre 3.2) ; dans ce calcul intervient une constante additive qui détermine la valeur (IPIXN) du pixel pour laquelle le différentiel est nul.

Les différentiels sont calculés en soustrayant un MNT récent à un MNT ancien pris comme référence, de sorte que les valeurs positives (auxquelles correspondent des pixels compris entre l'invariant IPIXN - exclu - et 255) traduisent un affaissement (quand le plan de référence est XOY, donc horizontal) ; les valeurs négatives (pixels compris entre 0 et IPIXN) traduisent des bombements.

#### **2.2.3.2. Analyse qualitative**

Sans se préoccuper, dans un premier temps, des valeurs propres à chaque pixel, on peut déjà, à ce stade de l'étude, observer l'image du différentiel.

Cette image montre la distribution des désordres selon une composante normale au plan de référence ; il est donc possible d'effectuer une première analyse qualitative, et une interprétation de l'évolution du site, en discriminant les zones dont la morphologie a beaucoup évolué de celles où elle est restée plus stable.

Nous verrons plus loin que l'on peut, pour préciser la localisation des désordres, surimposer à cette image des informations numérisées, cartographiques ou photographiques, géoréférencées.

### **2.2.3.3. Analyse quantitative**

Comme il a déjà été précisé, l'un des atouts de cette méthodologie est son caractère numérique, qui autorise une approche quantitative.

Chaque pixel du différentiel caractérise un déplacement de la surface topographique ; on peut donc en déduire, connaissant la taille du pixel, les surfaces et les volumes mis en jeu dans l'évolution du versant.

Le détail technique concernant la saisie de cette information est donné plus loin (chapitre 3.2) ; pour accéder à cette phase quantitative de l'analyse des désordres, quelques logiciels (SURVOL, STATSURVOL, GRAF) ont été développés (chapitre 3.3).

#### *Le logiciel SURVOL*

Ce logiciel détermine la pente de la droite qui représente le changement du codage (16 bits/8 bits) et calcule la valeur du pixel correspondant à la valeur 0 de la différence entre les 2 MNT.

Il calcule ensuite, pour chaque valeur de pixel de l'image du différentiel, le décalage (ou dénivelée, ou  $\Delta h$ ) entre les deux MNT.

SURVOL donne, par valeur de pixel, le décalage, la surface, et le volume trouvés, en valeur absolue et en pourcentages par rapport à une unité de référence et par rapport à l'ensemble du versant.

#### *Les logiciels STATSURVOL et GRAF*

STATSURVOL est un logiciel destiné à l'exploitation des données quantitatives issues de SURVOL, et fournit les pourcentages des surfaces et des volumes de la zone de désordres pour chaque valeur de  $\Delta h$  (ou  $\Delta z$ ), ainsi que l'effectif cumulé ; ce programme donne également les statistiques élémentaires ( $\Delta h$  moyen, variance et écart-type).

Pour représenter sous forme de courbes les surfaces et les volumes déplacés, on extrait du fichier délivré par STATSURVOL, le  $\Delta h$  (qui sera utilisé en abscisse), et les valeurs, exprimées en pourcentage, de la surface et du volume (représentés en ordonnée) correspondant ; cette extraction est effectuée par le programme GRAF qui crée un fichier exploitable par STATGRAPHICS.

### **2.2.3.4. Réalisation de profils topographiques**

Les profils topographiques sont un moyen simple et efficace de visualiser la morphologie d'un versant. Réalisés ordinairement à partir de cartes topographiques ou de plans en courbes de niveau, ils peuvent aussi être extraits des MNT, beaucoup plus rapidement et de façon numérique.

Nous avons utilisé, dans le cadre de cette étude, une fonction particulière du système 600 (M75'PROFILE), qui permet d'afficher, sur l'écran d'un moniteur vidéo, un profil sélectionné par l'opérateur ; mais, d'une part, cette fonction n'est pas adaptée à la comparaison de profils (on ne peut pas superposer deux profils), et d'autre part, il est difficile d'obtenir, pour un profil déterminé, un repère orthonormé, cette fonction optimisant l'affichage. Il s'est donc avéré

nécessaire d'adapter ce logiciel à nos besoins, en lui ajoutant quelques instructions pour récupérer, dans un fichier ASCII, les valeurs x et y et z des profils réalisés.

Ce fichier est ensuite traité sur STATGRAPHICS, ou sur tout autre logiciel de calcul de statistiques, pour tracer et comparer les profils voulus.

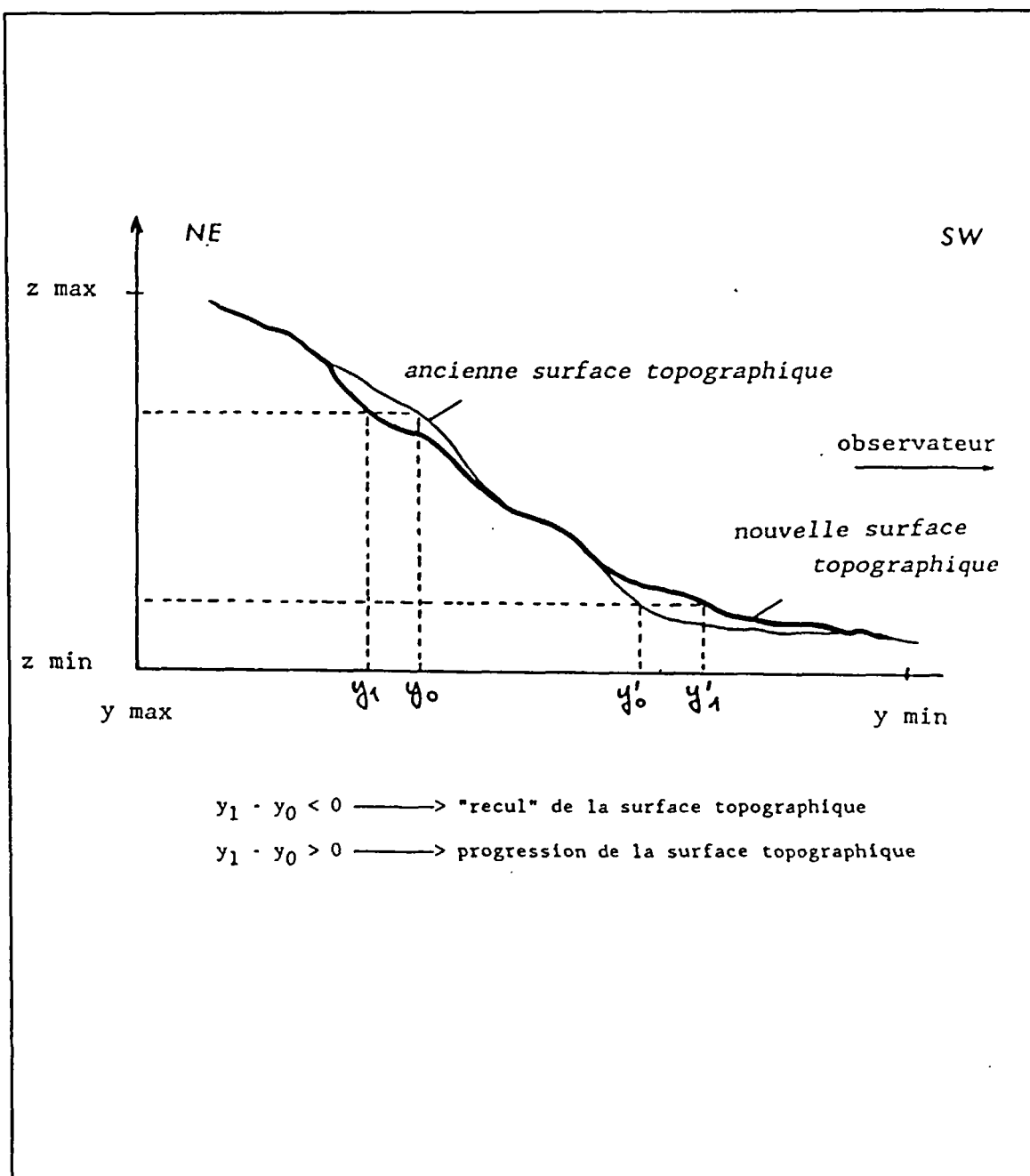


Figure 4 - Projection d'un MNT dans un plan vertical NW-SE et principe de mesure de la composante horizontale des désordres (perpendiculairement à ce plan)

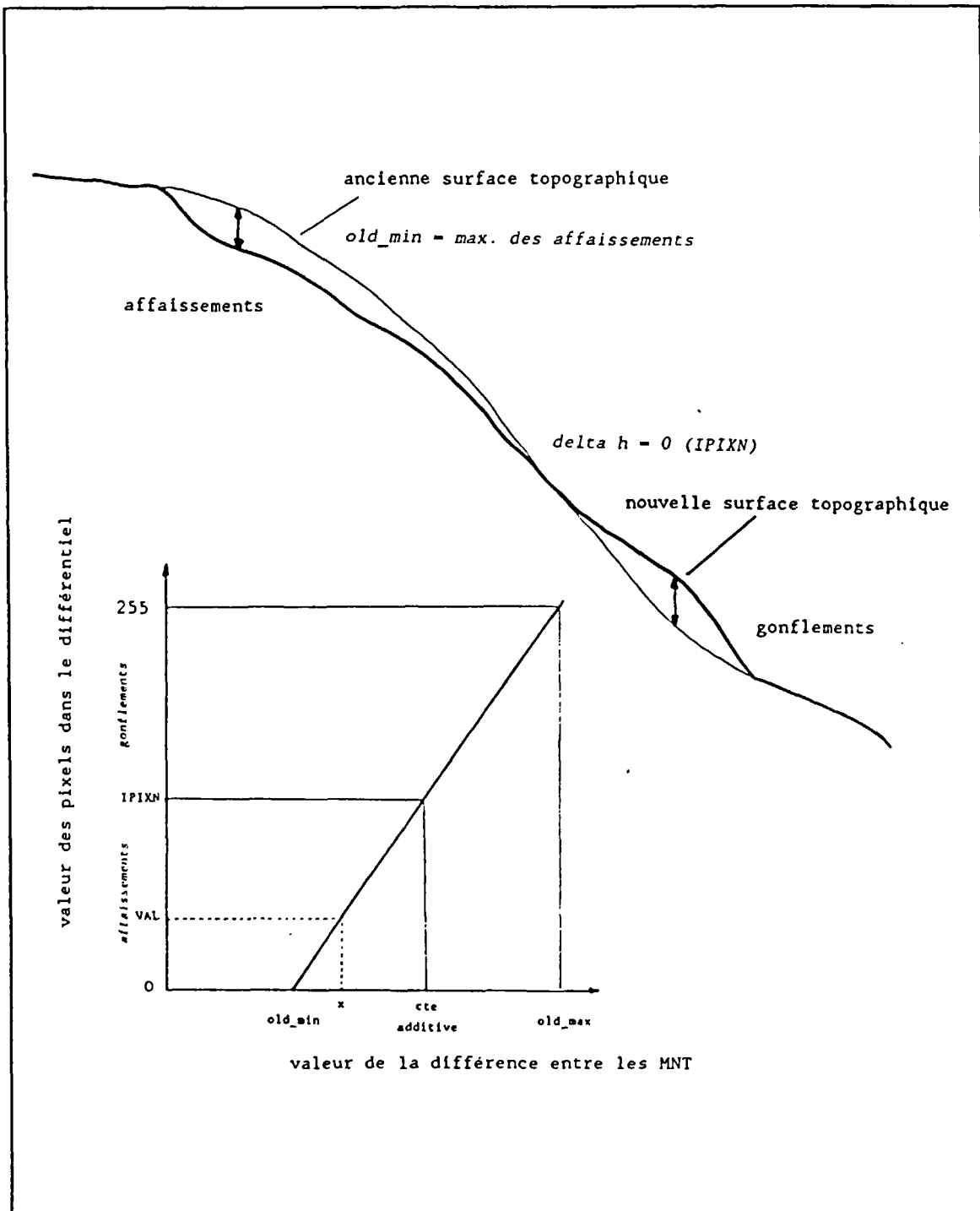


Figure 5 - Correspondance entre valeur du pixel et amplitude du décalage altimétrique entre 2 MNT

## **2.2.4. Visualisation des résultats : l'établissement de cartes colorées**

### **2.2.4.1. But et techniques de coloriage**

Le coloriage est destiné à faciliter la perception des informations que contient une image en noir et blanc, l'oeil distinguant plus aisément les nuances de couleurs que celles des gris.

Il existe deux techniques principales de coloriage :

- le coloriage par pseudo-couleurs,
- le coloriage par "Intensité-Teinte-Saturation".

Le coloriage par pseudo-couleurs est facile à mettre en oeuvre, si l'on utilise un logiciel bien conçu et très souple d'emploi. L'opérateur a le choix des couleurs et peut en modifier à loisir la teinte, l'intensité ou la saturation, ce qui offre des perspectives illimitées, la seule contrainte étant de pouvoir distinguer toutes les nuances sélectionnées.

Par contre, la seconde méthode est relativement difficile à mettre en oeuvre, et ne semble intéressante que dans certains cas particuliers. Elle est, de surcroît, peu souple - l'opérateur maîtrise difficilement le choix des couleurs - et surtout consommatrice de temps calcul.

### **2.2.4.2. Le coloriage par pseudo-couleurs**

Le principe consiste à attribuer à chaque pixel une couleur, que l'opérateur détermine, afin de réaliser, ici, une carte du champs de déformation.

Cette attribution est effectuée, pour chaque niveau ou classe de niveaux de gris des pixels, en appelant le programme PK, développé pour les besoins du département de télédétection du BRGM (MALON, 1985). Avec ce logiciel, l'opérateur choisit une couleur prédéterminée - sélectionnée dans une table de référence - ou la détermine par modulation interactive des trois paramètres qui caractérisent une couleur: teinte, intensité et saturation. L'effet obtenu est directement visualisé sur moniteur et peut-être modifié à volonté.

A partir d'une image monochromatique, on obtient donc une image trichromique en "à plat" de couleurs.

### **2.2.4.3 Le "mélange" des images et des pseudo-couleurs**

Les techniques de traitement d'image permettent de "mélanger" ou de "superposer" différents fichiers. Il est ainsi possible de faire apparaître, par "transparence", une image sous une autre.

En superposant, par exemple, deux images stéréoscopiques, et en leur attribuant à chacune une couleur différente (en général le rouge, et le vert ou le bleu), on obtient un anaglyphe, image dont on perçoit le relief à l'aide de lunettes dont un verre est rouge et l'autre vert (ou bleu).

Par addition, dans les proportions de 50%, de la différence entre deux MNT coloriée par pseudo-couleurs et de la photo aérienne numérisée correspondante, ou d'une orthophoto, on obtient un document de synthèse qui permet de localiser avec beaucoup plus de précision les désordres.

Ce document offre à l'utilisateur une information à deux niveaux (géographique et qualitative), très " parlante " et immédiatement utilisable.

#### 2.2.4.4. Les vues en perspectives

Les moyens de la télédétection permettent d'élaborer des documents de communication, comme les vues en perspectives ou vues 3D, qui s'ils n'apportent pas toujours, par eux-mêmes, d'information particulière, permettent de présenter à un public non averti des résultats qui peuvent favoriser les prises de décision. Dans ce travail, les vues en perspectives sont réalisées avec le logiciel VUE3D. Ce logiciel a été développé par la société ISTAR. Il offre la possibilité de choisir un point de visualisation quelconque, et de pouvoir superposer au MNT ou à l'image de référence, d'autre fichiers (images ou couvertures).

### 2.3. EVALUATION DES COUTS ET DES DELAIS

Les différentes méthodes que l'ingénieur peut mettre en oeuvre pour ausculter un versant instable ne sont pas exclusives les unes des autres, bien au contraire : elles apportent des résultats complémentaires. Mais, les budgets sont limités. Aussi convient-il de faire un point sur les coûts de leur mise en oeuvre.

Les chiffres donnés ici indiquent des ordres de grandeur, et ne sauraient avoir une signification contractuelle. Ils dépendent de nombreux facteurs (surface étudiée, difficultés d'accès, type de données...) ; aussi nous sommes nous basés sur les coûts d'études relatives aux travaux qui ont été au moins envisagés sur les sites présentés dans ce mémoire.

Pour bien saisir l'importance de ces coûts et la part de chaque opération dans un budget général, nous donnons pour chacune d'elle une valeur exprimée en KF :

#### 1) Réalisation d'une étude photogrammétrique de type IGN avec survol aérien spécifique.

a - réalisation d'une prise de vue aérienne :

1 couple stéréoscopique à l'échelle	du 15 à 20 KF
1/8 000.....	selon l'étendue du site ou l'échelle des clichés

b - stéréo préparation (pré balisage terrestre)..... 25 KF

c - aérotriangulation + stéréo restitution analytique..... 3 KF

d - saisie numérique fixée en fonction du nombre de points

Par exemple, les fichiers relatifs au site de la Clapière ont une précision en X,Y de 0,20 m, en Z de 0,15 m, ils comportent plus de 50 000 points, dont 23 000 à 24 000 "utiles"

le tarifs de ces fichiers est au minimum de..... 25KF

e - comparaison multodate avec reprise de données anciennes :

reprise des points d'appuis antérieurs..... 10KF



Délais : quelques semaines à partir de la réception des données

## 2) Réalisation de MNT par l'IGN

<b>f</b> - réalisation de plans en courbes de niveau (équidistance 10 m) à l'échelle du 1: 5 000	
pour 80 ha .....	30KF
pour 50 ha.....	25KF
<b>g</b> - réalisation de MNT au pas de 10 m.....	5 KF

Délais : quelques semaines à partir de la réception des données

## 3) Réalisation de "MNTAERO" (ISTAR)

<b>h</b> - le "MNTAERO" (16 km <sup>2</sup> environ), au pas de 4 m.....	13KF
l'orthophoto (en option).....	10KF
(précision en X,Y : 1 m, en Z : +- 3 m)	

Délais : environ trois semaines à partir de la réception des données

## 4) Préparation de MNT à partir de semis de points de données photogrammétriques (BRGM)

N.B. cette procédure n'est réalisable que si le nombre de données est suffisamment grand et le réseau de points assez dense.

calcul de 2 MNT sur un même site.....	2 KF
---------------------------------------	------

Délais environ 2 semaines à partir de la réception des données

## 5) Traitements numériques d'images

calcul d'une différence de MNT, transformation en image 8 bits, et coloriage par pseudo-couleurs.....	2 KF
redressement d'une photo aérienne numérisée.....	15 KF

N.B. Il ne sera délivré, dans ce cas, qu'une photo aérienne géométriquement conforme à un fond topographique, et non une orthophoto proprement dite ;

mélange d'une orthophoto (ou d'une photo redressée) et des images en pseudo-couleurs, réalisation de vues en perspective.....	1 KF
--	------

analyse quantitative (par unité 0,5 KF structurale).....	
---	--

Délais : 2 à 3 semaines à partir de la réception des données

### 3. CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DE LA METHODOLOGIE DEVELOPPEE

#### 3.1. CONFIGURATION DU SYSTEME DE TRAITEMENT D'IMAGE DU DEPARTEMENT DE TELEDETECTION DU BRGM (1991)

##### 3.1.1. Matériel

Toutes les données sont traitées par un calculateur VAX 8200, à 24 mégabytes de mémoire centrale, équipé d'un logiciel de base VMS, multitâches et multi-utilisateurs ; les données sont stockées sur disques pour les traitements (quatre disques durs d'une capacité de 456 Mégaoctets chacun sont disponibles), et conservées sur bandes CCT.

On dispose de deux processeurs d'images de type "Model 75", spécialisés dans le traitement interactif des images et optimisés par un "warper" pour certains types de traitement (tels que mises en conformité géométriques). Chaque processeur comprend 16 plans mémoires d'images (512 colonnes x 512 lignes), sources d'un flux de données modifiées au travers d'un "*pipeline processing channel*" avant transformation en signal analogique et affichage sur moniteur vidéo.

Un troisième processeur, de type IVAS, moins performant dans sa configuration actuelle pour le traitement interactifs d'images, mais possédant un écran de visualisation de 1024 colonnes et 1024 lignes et un éditeur graphique, complète la chaîne.

##### 3.1.2. Logiciels

Le système 600 de la société IIS représente un ensemble de logiciels de traitements d'images sur le VAX du Département SGN/TED du BRGM. Pour répondre à des besoins spécifiques, ou pour accroître les performances de certains traitements ou de fonctions particulières, d'autres logiciels ont été et peuvent être développés par un informaticien.

Une liste, non exhaustive, mais qui comprend une bonne part des logiciels et fonctions nécessaires au traitement des données de télédétection, est présentée au paragraphe 3.2.

##### 3.1.3. Restitution des données

Un OPTRONICS C4300 permet de restituer les images en mode analogique, sur film photographique (couleur ou Noir & Blanc) ; le pinceau lumineux qui impressionne les films peut avoir une largeur de 25, 50, 100 ou 200 microns ; le développement et le tirage des films sont sous-traités à des laboratoires extérieurs.

## 3.2. METHODE DE PREPARATION ET DE TRAITEMENT DES MODELES NUMERIQUES DE TERRAIN

Les données sont traitées sur le VAX.

### 3.2.1. Condensation des données

La procédure décrite ici concerne des points de coordonnées (x,y,z) dérivés d'analyses photogrammétriques, stockés dans des fichiers numériques séquentiels.

Ces fichiers sont lus par un programme qui les range dans une matrice dont on définit au préalable la maille, celle-ci correspondant à la taille du pixel du MNT (ou de l'image) que l'on veut créer. Lorsque plusieurs points sont reconnus comme appartenant à une même maille, le z attribué à celle-ci est la moyenne des z des points de la maille. Cette phase est appelée "condensation" des données et est réalisée par le programme XOY. On convertit ensuite les fichiers épurés en images numériques 16 bits, c'est-à-dire en modèle numérique de terrain à mailles non interpolées.

### 3.2.2. Lissage des données

On traite les images non interpolées par des boites mobiles, sans altérer les valeurs z déjà attribuées aux mailles (*fonction LPFZ du programme LPF avec minimum à 1 et maximum supérieur ou égal à la valeur z maximum du MNT*) ; les filtres utilisés, et agrandis successivement (3x3, puis 5x5, 15x15, 51x51, etc.) jusqu'à l'obtention d'une image satisfaisante ("lissée"), réalisent l'interpolation du modèle.

### 3.2.3. Calcul du différentiel

Pour cela, il faut réaliser plusieurs fonctions successives :

- appeler le logiciel C'ADD qui effectue la différence algébrique des images (appliquer les coefficients +1 et -1, ajouter une constante CONS) ;
- activer la fonction C'STAT pour rechercher les cotes minimum et maximum de la différence des MNT;
- transformer l'image 16 bits en image 8 bits à l'aide du logiciel C'SCALE, dans lequel le minimum 16 bit est appelé "old\_min" et le maximum "old\_max" (valeurs à conserver pour une utilisation ultérieure) ;
- définir, sous DE, un système de coordonnées utilisateur en appelant le logiciel UCS\_CALC ;
- afficher l'image des différences sur l'écran de visualisation du système IVAS. La procédure décrite ci-dessous utilise les fonctions de ce système.
  - 1 - afficher l'image 8 bits sur l'IVAS ;
  - 2 - activer (dans "screen management") la fonction *usr'coord syst* et sélectionner (*select*) le système de référence ;

- 3 - activer successivement les fonctions :
  - graphics*
  - draw*
  - init colors*
  - edit*
  - add polygon*et tracer, à l'aide de la souris, les contours des formations ou ensembles dont on veut obtenir les statistiques ;
- 4 - sortir en activant la poubelle de l'icône et la fonction *write* ;
- 5 - donner un nom au polygone (.GRPH).

On peut saisir plusieurs polygones en les différenciant par une couleur.

- éditer les histogrammes des polygones sélectionnés en appelant le programme *usr'histogramme*, qui demande le nom du système de coordonnées utilisateur ; faire "GOLD CTRL P" pour stocker ces histogrammes dans un fichier ASCII (*DEOUTPUT.LIS*).
- appeler le programme SURVOL pour calculer les surfaces et les volumes de chaque polygone.

### 3.2.4. Calcul de volumes sur différentiel de MNT

Le programme SURVOL lit les données dont il a besoin (nombre N de pixels de valeur V) dans le fichier DEOUTPUT.LIS contenant les histogrammes des surfaces sélectionnées sur l'IVAS.

Le programme demande :

- le nom du site,
- les dates correspondant aux deux MNT,
- la taille du pixel (x,y),
- le seuil qui détermine les pixels invariants ( $\Delta h$  considérés comme nuls),
- les paramètres de conversion du fichier en 8 bits (old\_min et old\_max),
- le nom du fichier DEOUTPUT.LIS à lire.

Les résultats - surfaces et volumes correspondant à chaque valeur de  $\Delta h$  et à chaque polygone - sont stockés dans un fichier ASCII (SURVOL.PRT).

Ce fichier peut être repris pour une analyse statistique : le programme STATSURVOL donne, en pourcentages, les valeurs des surfaces et volumes affectés par les désordres en fonction de l'amplitude de la différence altimétrique entre les deux MNT ; les résultats sont stockés dans le fichier STATISTIQUES.PRT.

Le logiciel GRAF extrait de ce dernier fichier les valeurs nécessaires au tracé des courbes représentatives de cette distribution et les conserve dans le fichier RESULT.DAT. Celui-ci est alors traité sur le logiciel du commerce STATGRAPHICS.

### **3.2.5. Extraction de profils topographiques**

Le logiciel d'IIS M75'PROFIL est destiné à l'affichage d'un profil sur l'écran des consoles de visualisation ; il est donc optimisé pour cela, ce qui fait qu'il est difficile d'obtenir un profil établi dans un repère normé.

Pour obtenir des profils comparables, il faut :

- se loger sous USERDE sur DUA1 : [DIR1.DIR2],
- allouer une console M'75,
- afficher le MNT (8 bits) sur lequel on veut prendre le profil,
- activer la fonction M75'PROFIL, et tracer le trait de coupe.

Les valeurs nécessaires à l'établissement du profil sont stockées dans un fichier (séquentiel) DEOUTPUT.LIS ; elles comprennent le numéro du pixel et sa valeur.

- activer le programme PROFILTOPO qui demande en entrée :
  - le nom du fichier à lire,
  - old\_min et old\_max,
  - la taille du pixel.

Le logiciel crée un fichier ASCII (PROFIL.PRT) qui donne la distance du point par rapport à l'origine (dans les unités du système de référence) et sa valeur altimétrique.

### **3.3. PRINCIPAUX PROGRAMMES ET FONCTIONS UTILISES**

Ces programmes sont installés sur le VAX et sur le système IIS ; un \* signale les logiciels qui nécessitent l'allocation d'une console de visualisation.

#### **Programmes de lecture de données**

TAPE'ENTER lecture d'images stockées sous la forme de fichiers séquentiels ("BSQ")

TAPE'MNT lecture de MNT SIGN, ISTAR, ...)

TAPE'LG lecture d'images Landsat TM

TAPE'SPOT ou SUPPORT lecture d'images SPOT

#### **Programmes de saisie de données**

DIGITAL, TABLE numérisation d'informations par digitalisation

ARC/INFO pc, système d'informations géographiques

**Programmes de traitement de la géométrie des images**

- \* (GCP'BY'H+) CPWARP transforme la géométrie des images ; utilisé pour projeter les données dans un référentiel cartographique ;

**Programmes d'affichage et de traitements interactifs de la dynamique**

- \* DISPLAY logiciel d'affichage d'images sur moniteur
- \* PIECE, STR programmes interactifs d'étalement de dynamique d'image ("stretch") ; le logiciel STR, plus performant que PIECE, a été développé au BRGM (SGN/TED)
- \* PK sélection de couleurs (pré définies ou en mode interactif) pour un coloriage d'image par pseudocouleur
- \* PROCESS logiciels d'applications d'un "STRETCH" à une image
- \* STASH sauvegarde sur disque la fonction d'étalement de dynamique

**Opérations logiques sur les fichiers**

CPU'ADD opérations arithmétiques (+,-) sur les images

CPU'CLASS'OR logiciel de substitution des pixels nuls d'une image de référence, par les pixels correspondants d'une autre image (utilisé pour des "incrustations")

CPU'MULTIPLY opération arithmétique (\*, /) sur les images

CPU'SCALE conversion d'une image 16-bits en image 8-bits (ou inversement)

UCS\_CALCULATE permet à l'utilisateur de définir, pour une image, un système de coordonnées (géographique ou autre), et de connaître la position, dans ce système, de n'importe quel pixel de l'image

\*M75'PERSPECTIVE calcul de vues perspectives (3D) ; ce programme a un équivalent plus rapide et plus performant sur station SUN ; (programme ISTAR : VUE3D, géré sous UNIX) mais l'utilisation de celle-ci nécessite un changement de format (IISTOISTAR) et un transfert des données du VAX vers la station, puis leur rapatriement vers le VAX (ISTARTOIV).

USR'HISTOGRAMMES calcule l'histogramme d'une surface définie par un polygone

### **3.4. LES DIFFERENTS PROGRAMMES DEVELOPPES DANS LE CADRE DE CETTE ETUDE**

**MINMAX** lit des séquences de coordonnées (x,y,z) et en recherche les minima et maxima

**PIXALTI** permet de connaître la cote altimétrique d'un pixel pris sur un MNT en 16 bits, ou inversement, d'attribuer à une cote quelconque sa valeur en pixel

**XOY** traite des fichiers de points (x,y,z) pour construire un MNT (16 bits) référencé dans un plan XOY; calcule, pour chaque pixel la moyenne z des points reconnus comme appartenant à ce pixel.

*fichier (.XYZ) ⇒ fichier (.XOY)*

**SURVOL** programme de quantification des surfaces et des volumes des différences observées entre 2 MNT sur un même site. Ce programme donne, pour chaque zone sélectionnée, les surfaces (en m<sup>2</sup> et en %) affectées par les désordres, et les volumes correspondants.

*fichier DEOUTPUT.LIS ⇒ fichier SURVOL.PRT*

**STATSURVOL** logiciel de calcul de la distribution statistique des désordres ; travaille à partir du fichier *survol.prt*, et délivre les valeurs de la moyenne, de la variance et de l'écart-type de la série analysée.

*fichier SURVOL.PRT ⇒ fichier STATISTIQUES.PRT*

**CLUSTER** calcule les pourcentages des surfaces et des volumes par valeur de  $\Delta z$ , selon un pas défini par l'utilisateur.

*fichier SURVOL.PRT ⇒ fichier CLUSTER..PRT*

**PROFILTOPO** dérive du logiciel M75'PROFILE du "système 600", pour la construction d'un profil topographique à partir des valeurs de pixel MNT prises le long d'un trait de coupe sur un MNT ; fonctionne sous USERDE.

*fichier DEOUTPUT.LIS ⇒ fichier PROFIL.PRT*

**GRPHCOOR** lit un fichier (.GRPH) obtenu après digitalisation de points ou de courbes de niveau, en extrait les coordonnées (x,y,z) des points digitalisés.

Les données issues de "STATSURVOL" ou de "PROFILTOPO" peuvent être traitées sur Pc à l'aide du logiciel STATGRAPHICS pour obtenir des graphiques, après avoir été mises au format "adéquat" par "GRAF".

### 3.5. LE PROGRAMME XOY

```

C PROGRAMME D'APPAUVRISSEMENT DE DONNEES (X,Y,Z) DIGITALISEES DESTINEES A UNE
C INTERPOLATION. LE PROGRAMME RECHERCHE TOUS LES POINTS PRESENTS SUR
C L'EMPRISE D'UNE MAILLE, EN FAIT LA MOYENNE ZM ET RETOURNE UN TRIPLET
C (XM, YM, ZM), OU XM ET YM SONT LES COORDONNEES DU CENTRE DE LA MAILLE.
C
C DEVELOPPEMENT: NE PAS FAIRE LA MOYENNE, MAIS UNE INTERPOLATION PAR
C RAPPORT AU CENTRE DE LA MAILLE.
C
C LIRE AUPARAVANT XMIN,XMAX,YMIN,YMAX (ET ZMIN ET MAX)
C AVEC LE PROGRAMME "MINMAX"
C
C LE FICHER S'APPELLE: XXXXXX.XYZ
C LE FICHER EN SORTIE DOIT S'APPELER: XXXXXX.XOY
C
C ***ATTENTION CE PROGRAMME TRAITE DES FICHIERS (MAXCOL X MAXLIG) MAXI***
C
C -----
C DECLARATIONS
C -----
C
C   PARAMETER (MAXCOL=600,MAXLIG=600)
C   LOGICAL ZEXIST
C   CHARACTER ENTREE*80, SORTIE*80, CHOIX*1, O, N
C   INTEGER ICOL, ILIG, NBCOL, NBLIG, ICOLN, ILIGN, K, NBCL, NBLG, ICPT, J, L
C   INTEGER IDIV, IL, NN, IZ
C   REAL DX, DY, X, Y, Z, XMIN, XMAX, YMIN, YMAX, XM, YM, ZM, POURCENT, XX, YY
C   DIMENSION ZM(MAXCOL, MAXLIG), NBZ(MAXCOL, MAXLIG)
C   DIMENSION IZ(MAXCOL, MAXLIG)
C   K=0
C   J=0
C -----
C LECTURE DES NOMS DE FICHIERS
C -----
C
C   5 WRITE (*,*) 'DONNER LE NOM DU FICHER (.XYZ) A APPAUVRIR: '
C   READ (*,10,ERR=5) ENTREE
C   10 FORMAT (A)
C   INQUIRE (FILE=ENTREE,EXIST=ZEXIST)
C   IF (.NOT.ZEXIST) THEN
C     WRITE(*,*) 'FICHER NON TROUVE !'
C     GOTO 5
C   ENDIF
C   WRITE (*,*) 'DONNER LE NOM (.EPU) DU FICHER EN SORTIE: '
C   READ (*,10) SORTIE
C -----
C OUVERTURE ET LECTURE SUR FICHER ENTREE
C -----
C
C   WRITE (*,*) ' ENTREER XMIN ET XMAX (XMIN,XMAX): '
C   READ (*,*) XMIN,XMAX
C   WRITE (*,*) ' ENTREER YMIN ET YMAX (YMIN,YMAX): '
C   READ (*,*) YMIN,YMAX
C   22 WRITE (*,*) ' ENTREER LA TAILLE DE LA MAILLE (PIXEL: XXX,XXX): '
C   READ (*,*) DX,DY
C -----
C DETERMINATION DU NB DE COLONNES ET DE LIGNES
C -----
C
C   25 NBCOL = (XMAX - XMIN) / DX
C   NBLIG = (YMAX - YMIN) / DY

```



```
WRITE (*,*) ' IL Y A: ',NBCOL,' COLONNES ET ' ,NBLIG,' LIGNES'  
IF (NBCOL .GT. MAXCOL .OR. NBLIG .GT. MAXLIG) THEN  
  WRITE(*,*) ' LES CAPACITES DE EPURDIG SONT INSUFFISANTES !'  
  GOTO 22  
ENDIF  
WRITE(*,30)  
30 FORMAT (/)  
C -----  
C INITIALISATION DES TABLEAUX ZM ET NBZ A ZERO  
C -----  
C (INUTILE SUR VAX: LES TABLEAUX SONT DEJA INITIALISES)  
  DO 50 ILIG=1,NBLIG  
  DO 50 ICOL=1,NBCOL  
  ZM(ICOL,ILIG)=0  
  NBZ(ICOL,ILIG)=0  
50 CONTINUE  
C -----  
C ATTRIBUTION D'UNE COLONNE ET D'UNE LIGNE A CHAQUE ENREGISTREMENT  
C (+ PB. DES LIMITES A DROITE ET A GAUCHE) ET CUMUL DES Z.  
C -----  
  OPEN (UNIT=1, FILE=ENTREE, STATUS='OLD', ACCESS='SEQUENTIAL')  
  WRITE (*,60)  
  60 FORMAT (/)  
  100 READ (1,*,END=200) X,Y,Z  
  NN = NN + 1  
  WRITE (*,110) X,Y,Z  
  110 FORMAT ('+',F9.2,2X,F9.2,2X,F6.1)  
  ICOL = (X + DX - XMIN) / DX  
  IF (ICOL .EQ. 0) THEN  
    ICOL=1  
  ENDIF  
  IF (ICOL .GT. NBCOL) THEN  
    ICOL=NBCOL  
  ENDIF  
  ILIG = (Y + DY - YMIN) / DY  
  IF (ILIG .EQ. 0) THEN  
    ILIG=1  
  ENDIF  
  IF (ILIG .GT. NBLIG) THEN  
    ILIG=NBLIG  
  ENDIF  
  ZM(ICOL,ILIG) = ZM(ICOL,ILIG) + Z  
  NBZ(ICOL,ILIG) = NBZ(ICOL,ILIG) + 1  
  GOTO 100  
200 CONTINUE  
  OPEN (UNIT=2, FILE=SORTIE, STATUS='NEW', ACCESS='SEQUENTIAL')  
C -----  
C CALCUL DU Z MOYEN ET DU X ET Y DU CENTRE DE LA MAILLE  
C -----  
  WRITE(*,*) ' ON FAIT LES MOYENNES ET ON ECRIT LE TABLEAU...'  
  WRITE(*,210)  
  210 FORMAT (/)  
  ICPT=0  
  DO 300 ILIG=1,NBLIG  
  DO 300 ICOL=1,NBCOL  
  C   XM = XMIN + (DX * (ICOL-1)) + (DX / 2)  
  C   YM = YMIN + (DY * (ILIG-1)) + (DY / 2)  
  IF (NBZ(ICOL,ILIG) .GT. 0) THEN  
    ZM(ICOL,ILIG) = ZM(ICOL,ILIG) / NBZ(ICOL,ILIG)  
    ICPT=ICPT+1
```

```

        ELSE
          ZM(ICOL, ILIG)=0
        ENDIF
        IZ(ICOL, ILIG)=NINT(ZM(ICOL, ILIG))
300 CONTINUE
C -----
C OUVERTURE ET ECRITURE SUR FICHER SORTIE
C -----
        IL=0
        IDIV = (NBCOL-1)/10 +1
        WRITE (2,220) NBCOL,NBLIG
220 FORMAT (2(1X,I4))
        DO 510 ILIG=1,NBLIG
          N1=0
          DO 500 J=1, IDIV
            N1=N1+1
            IF (J .NE. IDIV) THEN
              N2=N1+9
            ELSE
              N2=NBCOL
            ENDIF
            WRITE (2,230) (IZ(IL,NBLIG+1-ILIG), IL=N1,N2)
230 FORMAT (10(1X,I4))
            WRITE (*,235) (IZ(IL,NBLIG+1-ILIG), IL=N1,N2)
235 FORMAT ('+',10(1X,I4))
            N1=N2
          500 CONTINUE
        510 CONTINUE
        WRITE (*,*) ' ON A TRAITE ',NN, ' POINTS ET RENSEIGNE '
        1 , ICPT, ' PIXELS'
        IF (ICPT .NE. NBCOL*NBLIG) THEN
          POURCENT=(100*ICPT)/(NBCOL*NBLIG)
          WRITE (*,*) ' COEFFICIENT DE REMPLISSAGE: ', POURCENT, ' %'
        ENDIF
        CLOSE (UNIT=1)
        CLOSE (UNIT=2)
        STOP
C -----
C TRAITEMENT DES ERREURS
C -----
999 CONTINUE
        WRITE(*,*) 'FICHER CERTAINEMENT TROP GRAND...'
        END
```

## **4. EXEMPLES D'APPLICATION**

### **4.1. LES SITES RETENUS ET LES DONNEES DE BASE TRAITÉES**

Deux sites, l'un dans les Alpes Maritimes (la Clapière) et l'autre en Vanoise (le Friolin), ont été étudiés en mettant en oeuvre la méthodologie décrite dans le rapport.

Le site de la Clapière, dans les Alpes Maritimes, représentait pour cette étude un exemple parfait, tant du point de vue de la qualité et de la densité des données disponibles que du point de vue de l'ampleur des mouvements. Ce site fait de plus l'objet d'un suivi depuis plus de 15 ans, et est équipé d'un système de surveillance. De nombreuses données étant disponibles, nous nous sommes appuyés sur ce cas pour développer cette méthodologie.

Afin de tester les modèles numériques de terrain d'ISTAR (les "MNTAERO"), nous avons utilisé, sur un exemple moins connu, pour lequel existaient peu de données, deux MNT de ce type. Il s'agit d'un mouvement de terrain qui affecte la face Est de la pointe du Friolin, dans le massif de Bellecote, en Vanoise.

Sur chaque site, les différences entre MNT ont été calculées, et l'évolution des désordres visualisée, en plan, sous forme de cartes en pseudo-couleurs. Les techniques de traitement d'image permettent également de visualiser les résultats obtenus en trois dimensions (3D ou vues en perspectives), sous une forme à la fois plus familière (donc plus parlante) et spectaculaire.

#### **4.1.1. Les sites étudiés : situation géographique et état des connaissances**

- **La Clapière**

La Clapière, dans la vallée de la Tinée est un versant de 700 m de hauteur et de 1 000 m de longueur (soit près de 90 ha), affecté depuis 1977 par des désordres importants, figures 6, 7 et 8. Bien que la désorganisation du versant ait paru limitée à quelques secteurs particuliers, des mesures inclinométriques, effectuées régulièrement entre 1979 et 1985, ont montré que l'évolution était généralisée et que l'intensité des mouvements est corrélée avec les conditions hydro-météorologiques.

Depuis 1982, le glissement est suivi par un système de mesures électro-optiques de distance, récemment automatisé, et complété depuis 1991 par des mesures extensiométriques.

La connaissance de son évolution repose en grande partie sur des résultats de mesures topométriques.

- **Le Friolin**

La Pointe de Friolin, dans le massif de la Vanoise, est un plateau triangulaire culminant vers 2 700 m d'altitude. Son versant, de 600 m de longueur et 400 m de hauteur, a été affecté par un mouvement de grande ampleur en 1982, figures 9 , 10 et 11. Il ne fait, actuellement, l'objet d'aucune surveillance. D'ailleurs, peu de données le concernant sont disponibles : il n'en existe qu'une description détaillée et une relation des événements de 1982 donnée par GOGUEL (1989). La connaissance de l'évolution de la face est du Friolin ne repose que sur l'analyse d'une collection privée de clichés effectués au fil des ans.

#### **4.1.2. Les données**

##### **Les données photogrammétriques traditionnelles : exemple de la Clapière**

Trois fichiers, comprenant environ 50 000 points repérés par leurs coordonnées (x,y,z) et décrivant la morphologie de La Clapière en 1970, 1987 et 1989 ont été traités.

La maille des MNT retenue est de 5 m x 5 m, pour décrire un versant de près de 90 ha (1 km de longueur pour 700 m de hauteur), affecté par des désordres dont l'amplitude atteint 30 m.

##### **Les modèles numériques de terrain de l'ISTAR : exemple du Friolin**

Il s'agit dans ce cas de fichiers acquis par sous-traitance. L'ISTAR assure la préparation de MNT à partir de couples de photographies aériennes qui lui sont remis par le demandeur. La méthode utilisée est une recherche par auto corrélation de points homologues sur les deux images ; elle a été développée pour la réalisation de MNT dérivés de couple stéréoscopiques d'images SPOT, puis adaptée à l'exploitation de photographies aériennes.

Deux séries de clichés aériens stéréographiques de l'IGN (missions de 1970 et de 1986) à l'échelle du 1/30 000 ont été traitées par la société ISTAR pour l'extraction de modèles numériques de terrain du type "MNTAERO". Ceux-ci ont un pas de 4 m et sont définis, en altimétrie et en coordonnées absolues, à +/- 3 m.

#### **4.1.3. Calcul des différences altimétriques et estimation de l'incertitude**

##### **Site de la Clapière**

Sur la Clapière, la différence entre les MNT de 1989 et de 1970 représente une dénivelée totale de 66 m, avec un maximum d'une trentaine de mètres pour les mouvements positifs, et de 32 m, en valeur absolue, pour les mouvements négatifs (affaissements).

Les décalages altimétriques les plus petits décelés entre les deux MNT sont de 1 m, compte tenu de la définition ( $25 \text{ m}^2$ ) de la maille. Théoriquement, mais cela exigerait un réseau de points très dense et une maille très petite, on pourrait décrire cette dénivelée par pas de 0,25 m (65 m / 256 valeurs de pixels).

Mais, compte tenu de l'erreur de positionnement des points dans les zones de fortes pentes (+/- 2,5 m), et de la relation qui exprime l'erreur de positionnement en z d'un pixel :

$$\Delta h = 1/2 L_p \times \sin(\delta)$$

$L_p$  : largeur du pixel,  
 $\delta$  : pente

On en déduit que l'incertitude commise sur la détermination de la cote est :

- pour une pente moyenne de 40°, de 1,78 m,
- ou, pour une pente moyenne de 30°, de 1,25 m.

### Site du Friolin

En ce qui concerne les différentiels relatifs à ce site, en raison de l'indétermination qui pèse sur le calage altimétrique absolu des pixels, il n'est pas possible de préciser la valeur du plus petit décalage altimétrique détecté. Les calculs montrent que cette valeur serait de 5 m, c'est-à-dire qu'elle correspondrait, au mètre près, à l'incertitude sur la mesure altimétrique. En fait, seul un étalonnage, réalisé à partir de points identifiés au sol avant et après l'événement, pourrait permettre de déterminer l'amplitude minimale détectée ; mais il y n'a pas de raison de penser que celle-ci ne soit pas, comme pour la Clapière, de l'ordre du mètre.

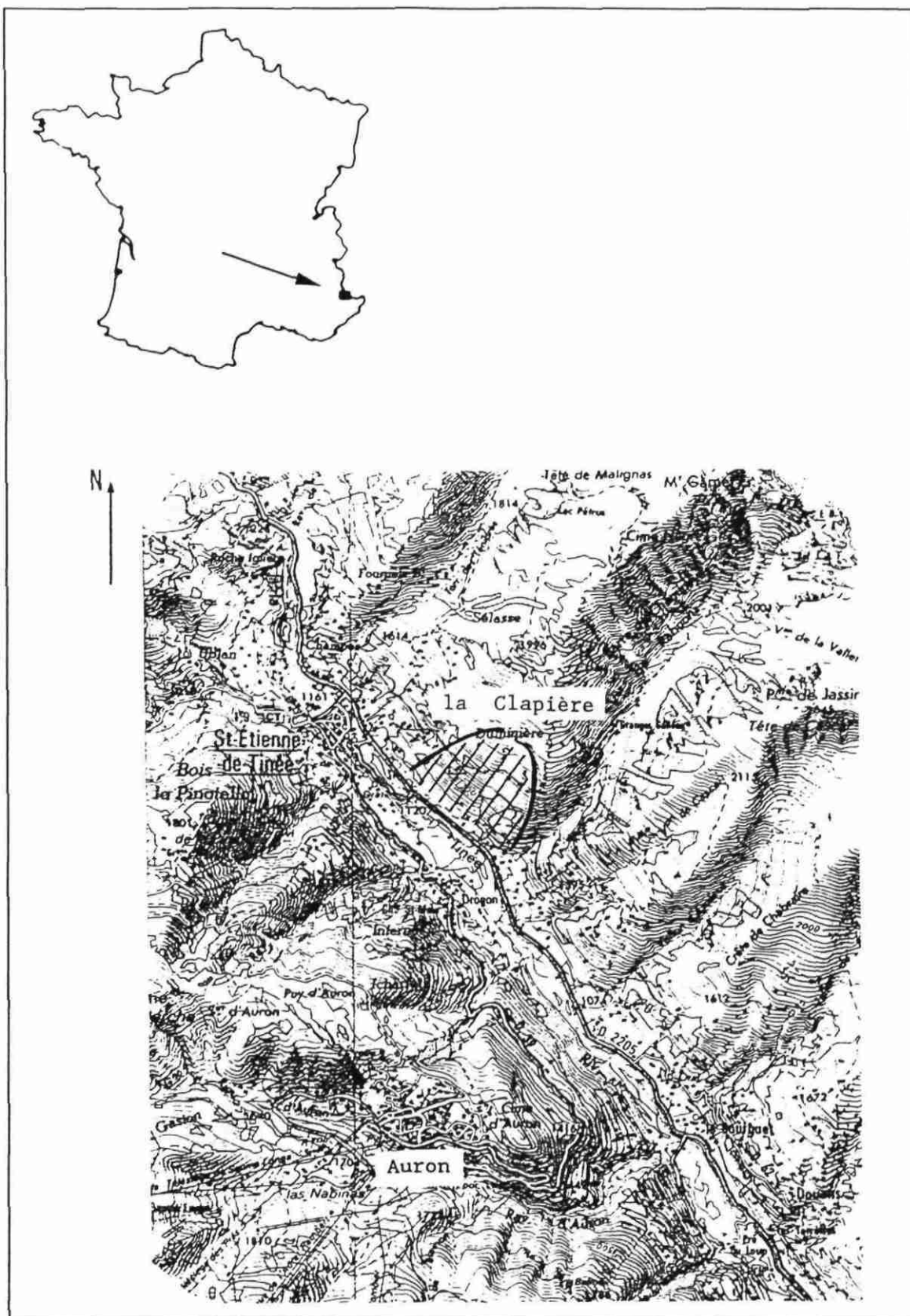


Figure 6 - Carte de situation géographique de la Clapière  
(sur fond topographique IGN, carte à 1/50 000)

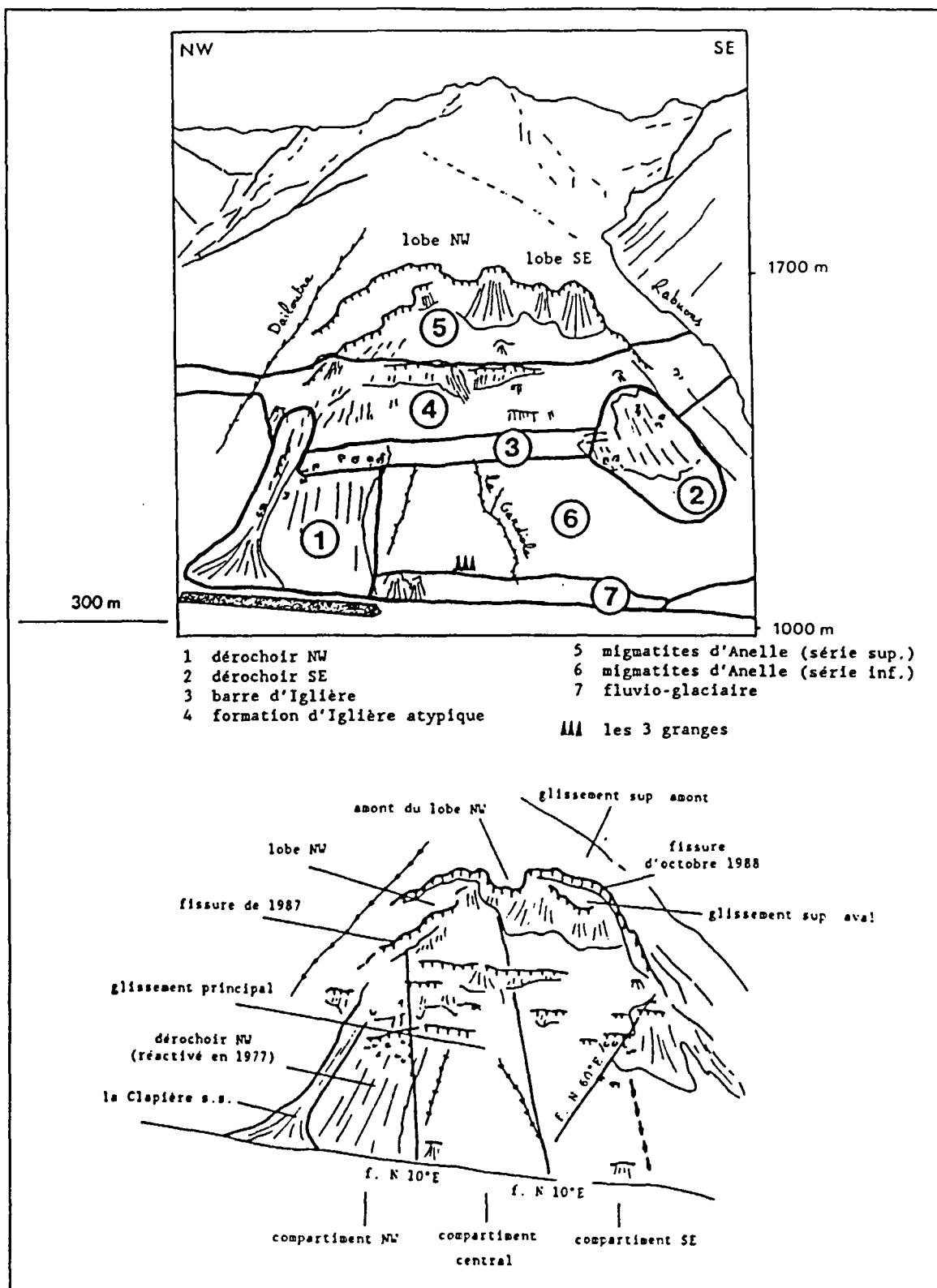
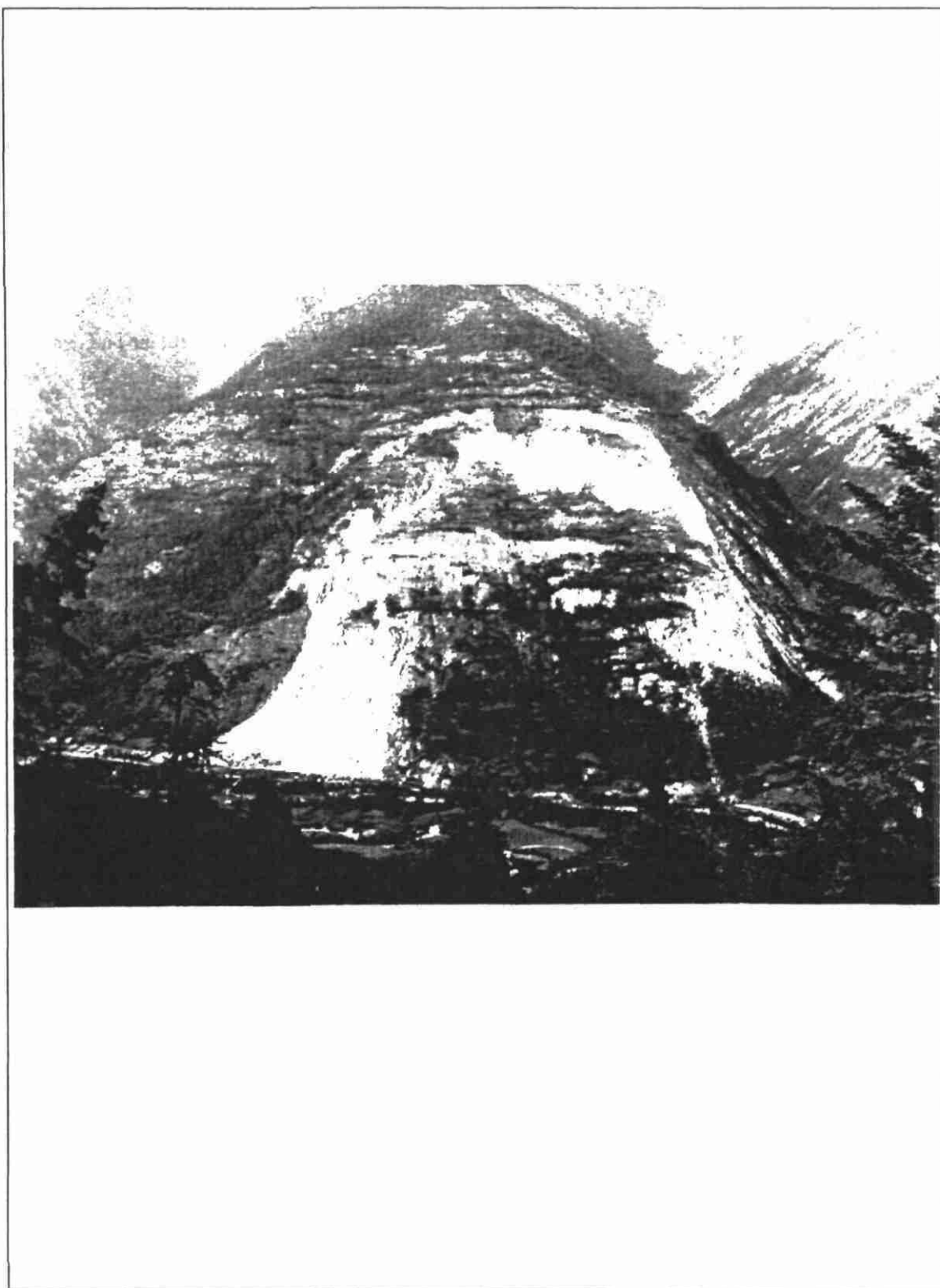


Figure 7 - Schéma morpholithologique de la Clapière (d'après un cliché de 1988, et la carte géologique du LRPC de Nice)



**Figure 8 - Glissement de la Clapière : aspect du versant en 1991**



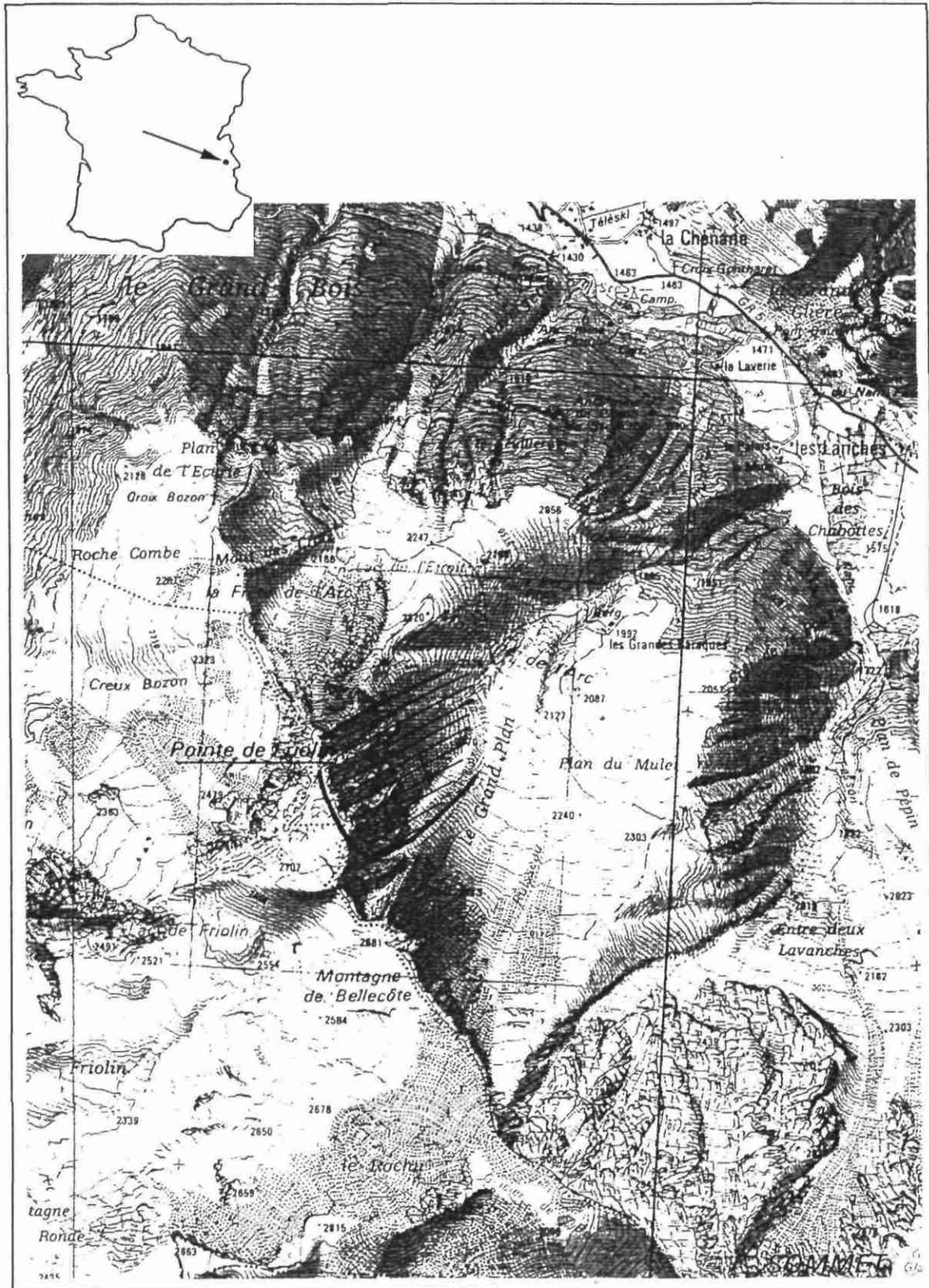


Figure 9 - Carte topographique de la Pointe du Friolin (sur fond topographique IGN à 1/25 000)

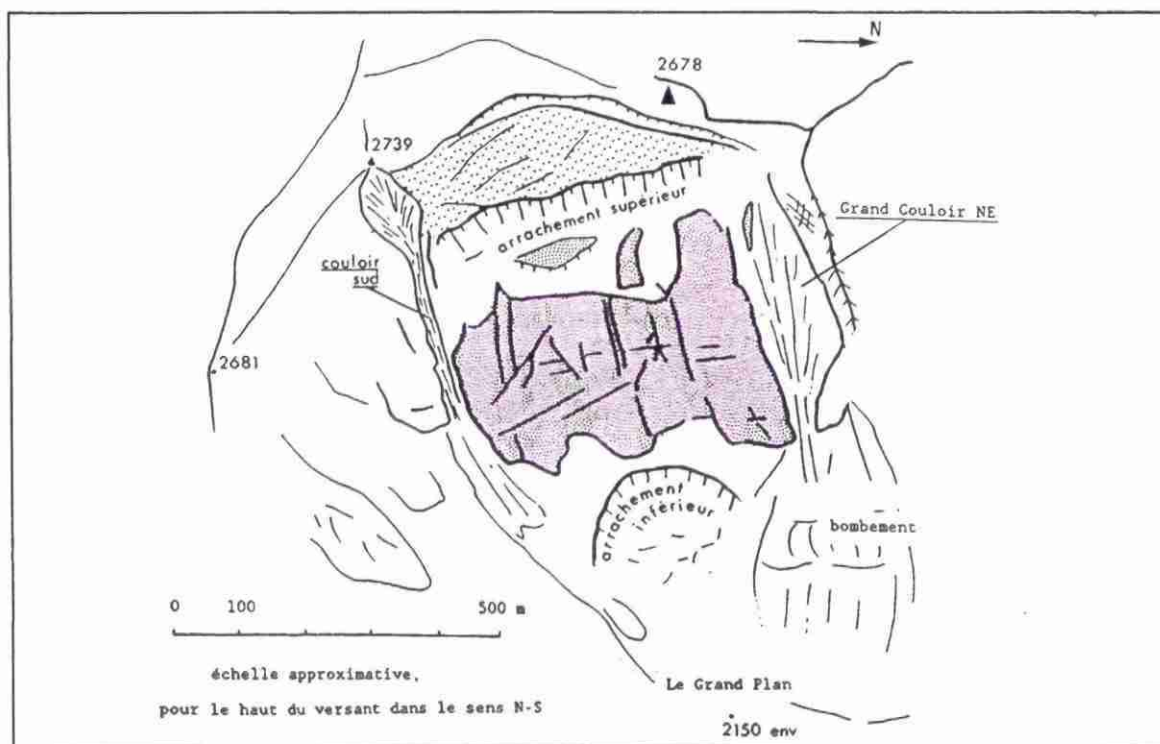


Figure 10 -Croquis de la face Est du Friolin, d'après un croquis original de GOGUEL (1988)

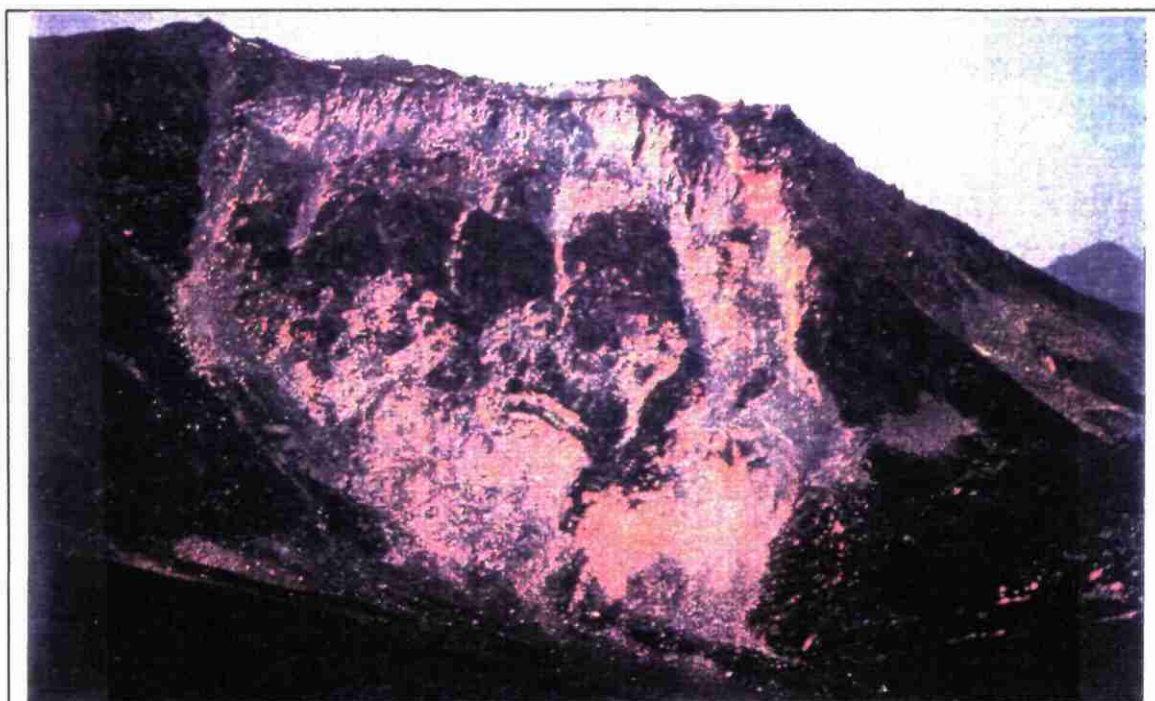


Figure 11 -La Pointe du Friolin, face Est (cliché GOGUEL, 1989)

## **4.2. RESULTATS OBTENUS AU NIVEAU DU SITE DE LA CLAPIERE (EVOLUTION DE 1970 A 1989)**

Les figures 12 à 22 illustrent les différents types de résultats obtenus à partir de la méthode présentée plus haut (chapitre 3).

La figure 12 correspond au MNT 1987.

Les figures 13 et 14 présentent les différentiels de MNT (1989 - 1970) et (1989 - 1987) restitués en pseudo-couleurs et superposés à l'orthophoto du site.

La figure 15 montre une vue en perspective du différentiel (1989 - 1970), superposé à orthophoto (coloriage par pseudocouleur, superposition de l'image orthophoto et utilisation du logiciel VUE3D).

Tandis que la figure 16 correspond à une image en pseudocouleur de la carte des désordres dans un plan vertical (1989 - 1987).

A partir des logiciels SURVOL, STATSURVOL, GRAF et STATGRAPH, la distribution statistique des désordres a pu être calculée ; elle est illustrée par les figures 17 à 19.

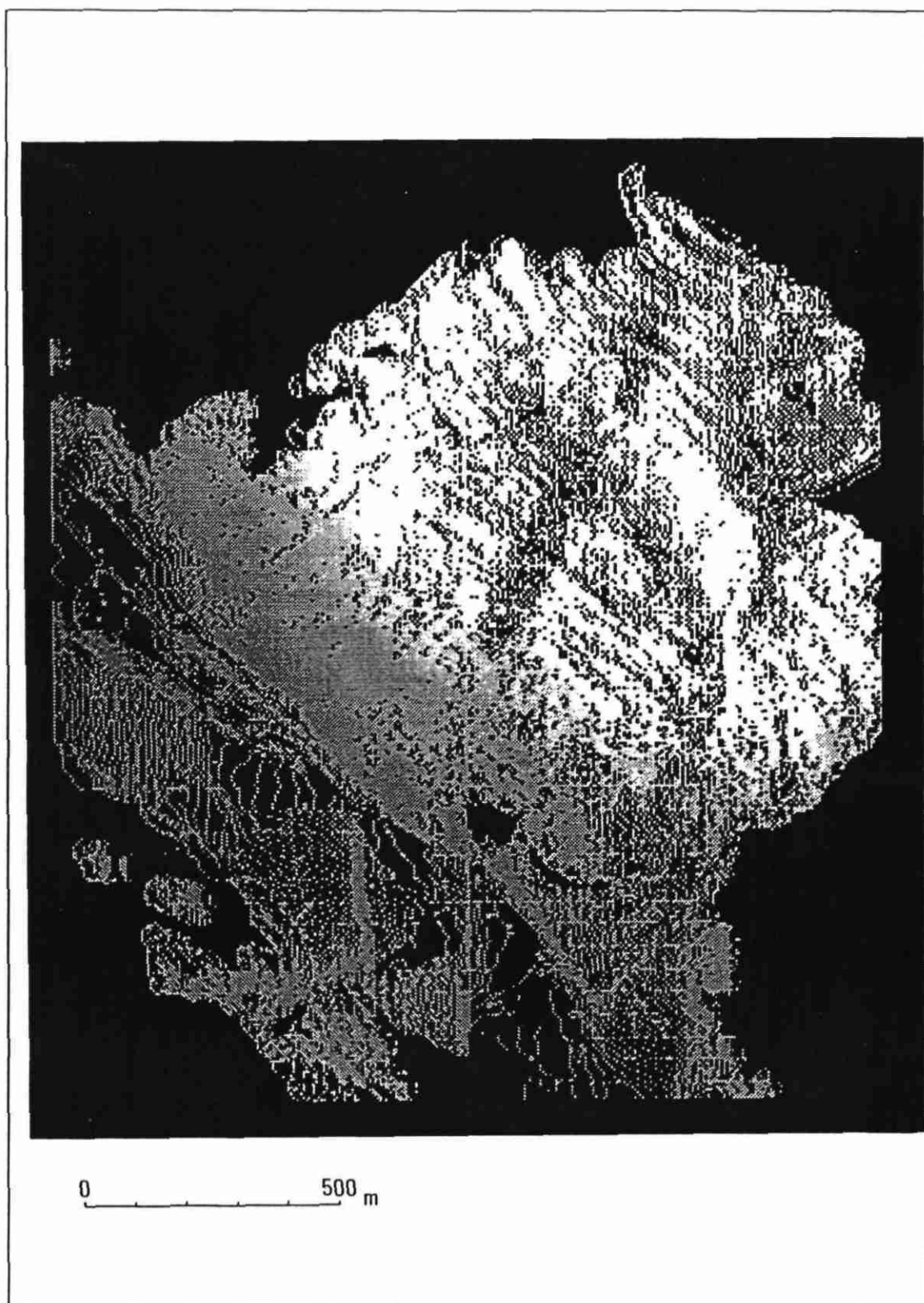
Enfin, les figures 20, 21 et 22 présentent des profils topographiques effectués à partir des MNT de 1970 et 1989.

### **4.2.1. Analyse qualitative**

L'image de la composante verticale des désordres, obtenue par le calcul de la différence des MNT (vues en plan), coloriée par pseudo-couleurs (figures 13 et 14), met en évidence le découpage du versant par la fracturation N 10 - N 20°E et N 60°E et l'individualisation des trois compartiments NW, central et SE. Les déformations qui s'exercent le long de ces fractures révèlent le rôle que jouent ces dernières dans l'évolution du versant, et l'indépendance relative des différents compartiment les uns par rapport aux autres.

Les maxima des affaissements s'inscrivent en contrebas de l'escarpement sommital du lobe SE et de la fissure de 1987, décrivant un large demi-cercle à concavité tournée vers l'aval. Les maxima des gonflements se produisent en pied de versant dans le compartiment central, et dans le compartiment SE. La limite entre les mouvements positifs, limités à la partie inférieure du versant, et les mouvements négatifs (situés dans la partie supérieure) est située à la hauteur de la partie supérieure de la Barre d'Iglière, sur toute la largeur de la zone de désordres. Ces premières constatations suggèrent que l'évolution de la Clapière est due à un glissement de type rotationnel.

En résumé, l'image de la différence entre les MNT fait apparaître, sur la Clapière, une certaine symétrie dans la distribution des mouvements négatifs et des mouvements positifs, par rapport à un axe situé dans la Formation atypique d'Iglière, ou dans la Barre d'Iglière (figure 7). Ce document permet de mieux appréhender les rôles respectifs de la pétrographie et des accidents structuraux sur la distribution des désordres, et donc sur l'évolution de la Clapière.



**Figure 12 - Image du Modèle Numérique de Terrain (non interpolé) de la Clapière (1987) - pixel à 5m x 5m -**

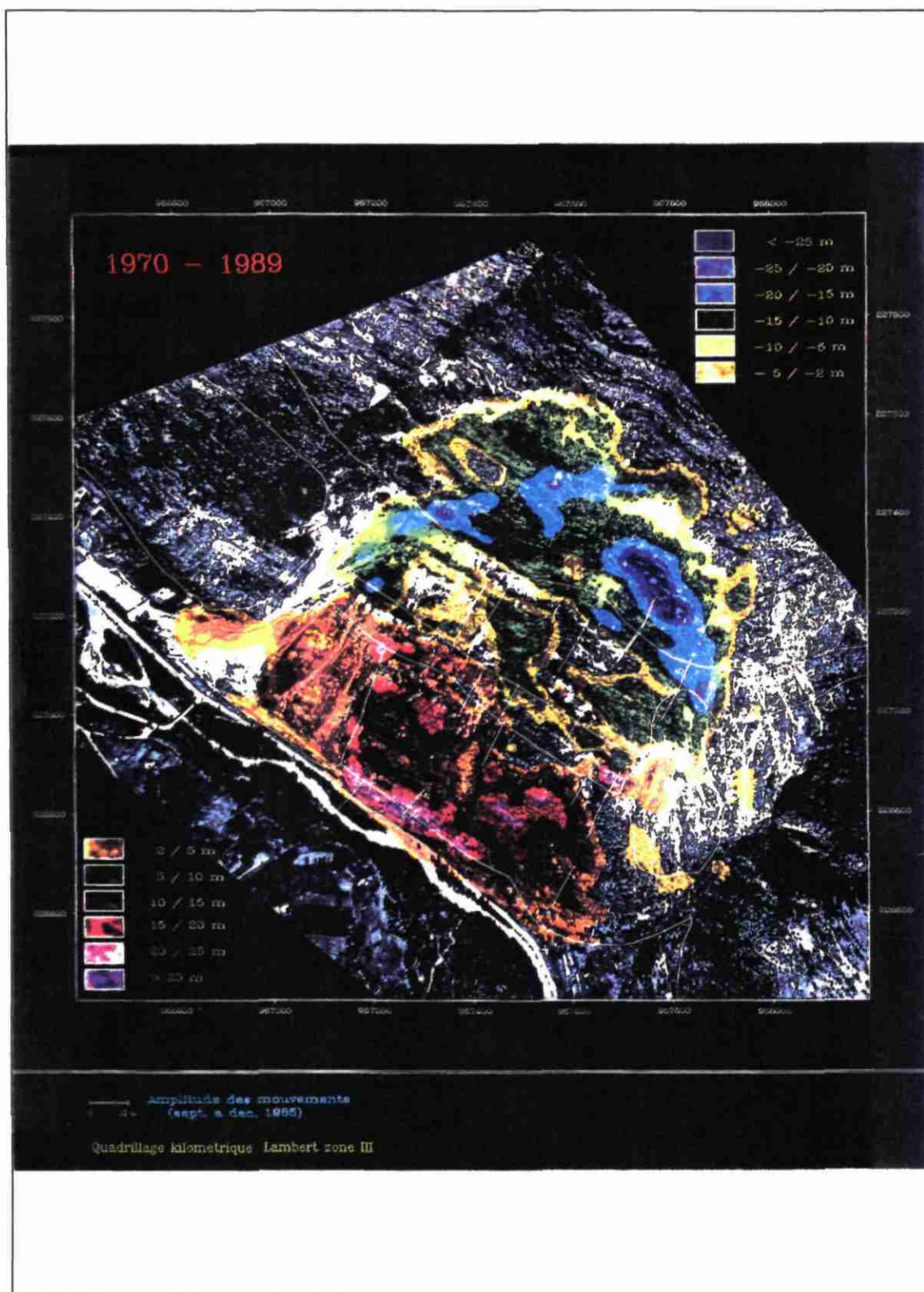


Figure 13 - Carte de l'évolution de la composante verticale des désordres, obtenues par calcul de la différence entre les données MNT de 1970 et 1989

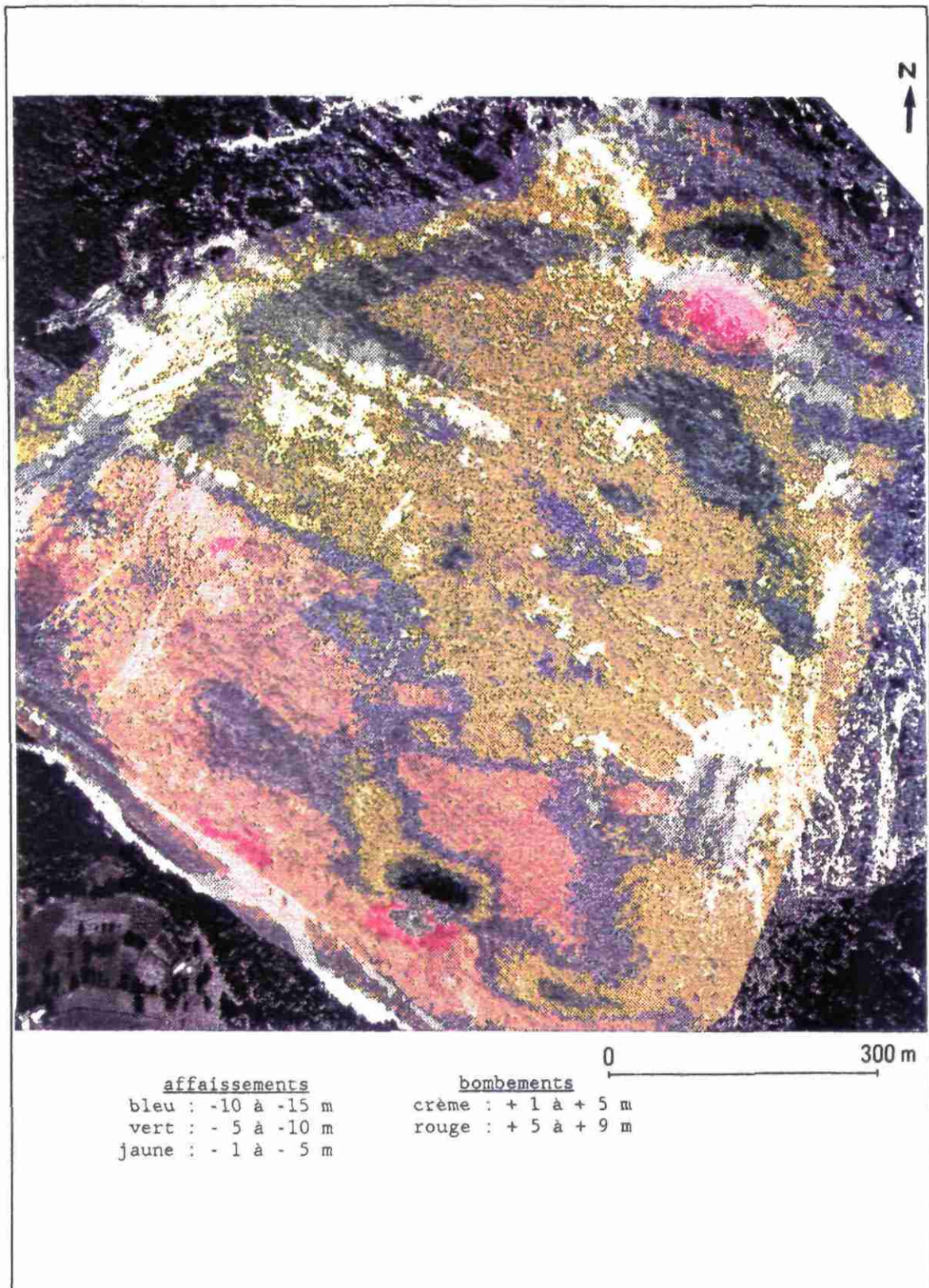


Figure 14 - Carte de l'évolution de la composante verticale des désordres de 1987 à 1989

Cette évolution est bien perçue sur les vues "en perspective". En particulier, les images vues suivant l'axe de la vallée (figure 15) montrent : le rôle stabilisateur de la barre d'Iglière et l'inertie (relative) de la Formation atypique d'Iglière d'une part, et l'importance des déformations en pied de versant et dans les séries supérieures d'autre part. Ce type de document, s'il n'est pas indispensable pour les géologues avertis (il n'apporte pas d'information nouvelle par lui-même), concrétise, pour un public moins familiarisé avec les techniques de télédétection ou de surveillance d'un mouvement de terrain, les résultats obtenus, ou les propositions d'études ponctuelles qui peuvent être faites.

#### **4.2.2. Analyse quantitative**

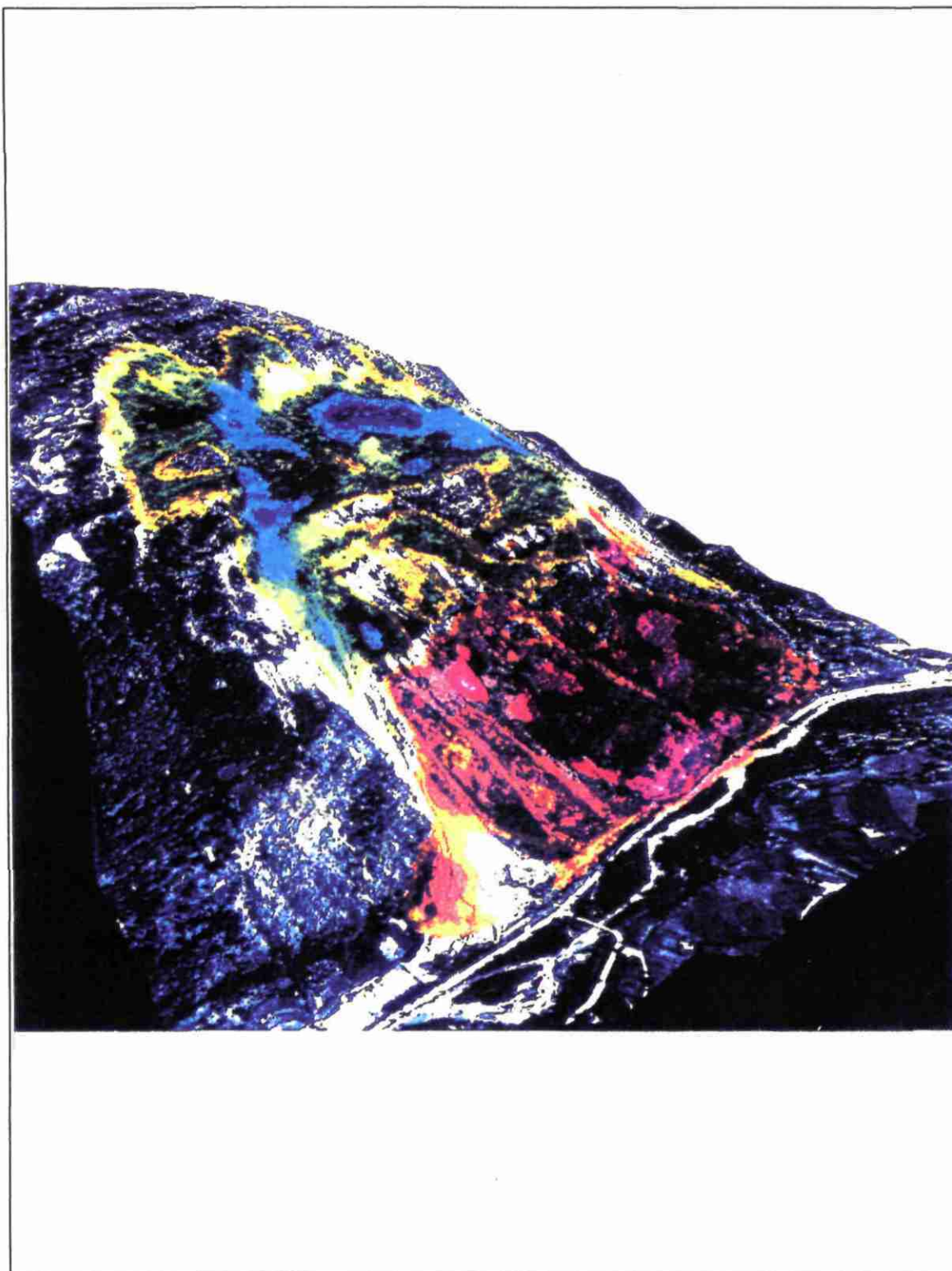
Les chiffres obtenus ne sont bien sûr pas à prendre à l'unité près. En l'absence de référence, il est difficile de préciser l'erreur commise sur les mesures, qui dépendent elles-mêmes des erreurs liées au repérage en x, y et z du pixel. Cependant, ces chiffres donnent une idée de l'ordre de grandeur des déformations. Les résultats sont basés sur des mesures qui leur confèrent un certain poids face aux estimations, toujours approximatives et parfois basées sur des "a priori". Il s'agit bien entendu d'une détermination de mouvements superficiels, et non de résultats portant sur la masse totale mise en mouvement dans l'ensemble du versant.

Deux modes de représentation de la distribution de la composante verticale des mouvements nous ont paru intéressants. Ce sont, d'une part la représentation des surfaces S et des volumes V (exprimés en %) des masses déplacées en fonction de l'amplitude de la composante verticale des désordres (figure 17), et d'autre part la variation du rapport V/S en fonction de ce même  $\Delta h$  (figure 18) ; ce rapport correspond à une "quantité déplacée", et a évidemment la dimension d'une longueur.

Les ruptures de pente visibles sur la figure 18 traduisent des phénomènes particuliers : une quantité de mouvement supérieure à 3 semble correspondre, de façon assez systématique, à des éboulements (mouvements négatifs) ou à des déplacements latéraux (mouvements positifs). Les pentes faibles correspondent à des mouvements plus réguliers ou progressifs, comme les tassements ou la formation de bourrelets, qui sont caractérisés, de plus, par une "quantité déplacée" faible.

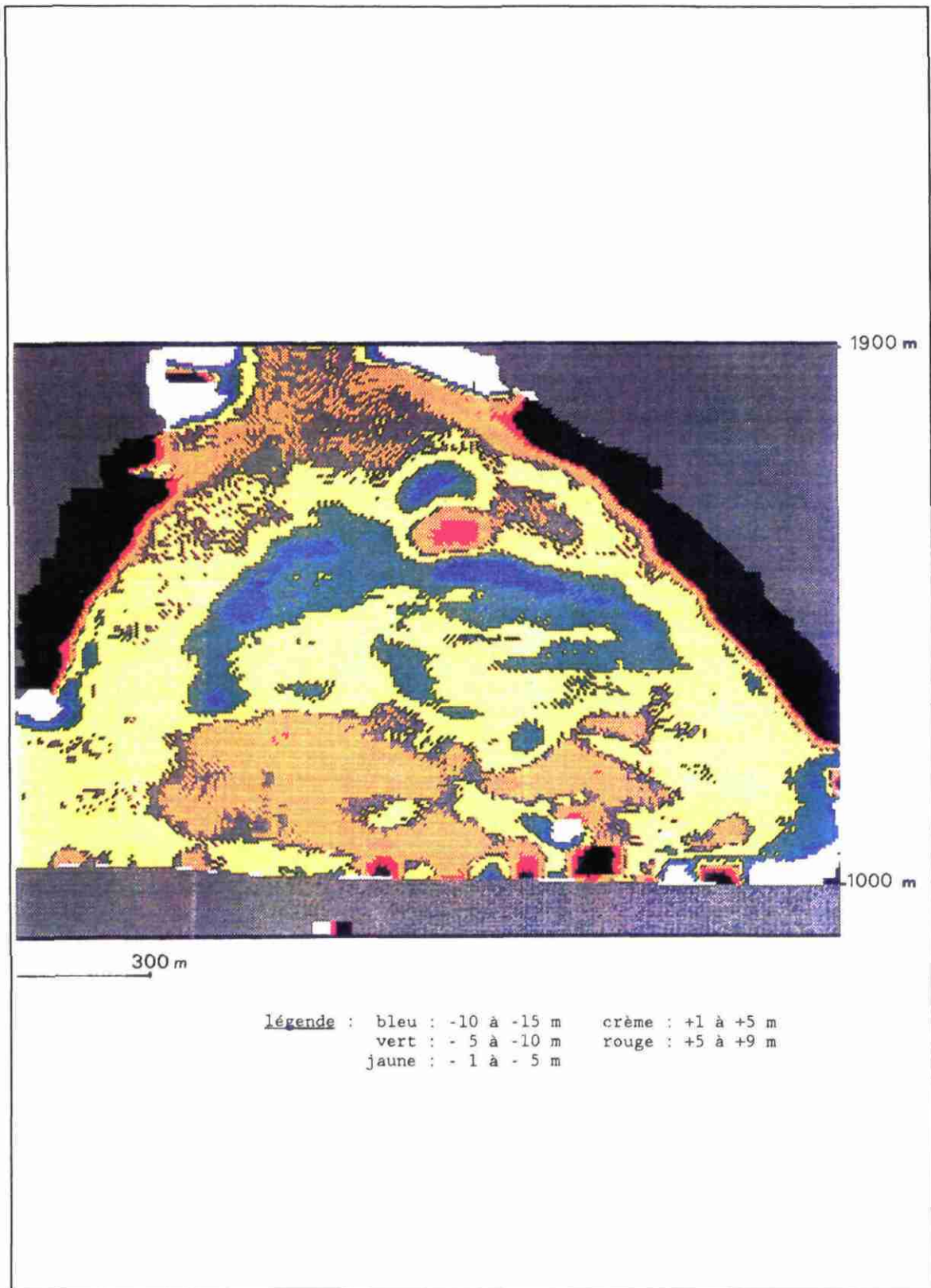
Ce type de représentation a l'avantage de mettre en évidence la part, dans l'évolution des versants, des phénomènes brusques ou de grande ampleur (écroulements, progression du pied de versant) et celle des phénomènes progressifs ou continus (tassements, bourrelets...). Ils montrent en même temps la proportion des mouvements positifs et des mouvements négatifs. On peut ainsi constater que, sur l'ensemble du versant, ou dans chaque compartiment structural, les mouvements positifs sont bien prépondérants par rapports aux mouvements négatifs, si l'on exclu les phénomènes de grande ampleur.

Les logiciels SURVOL et STATSURVOL, pour une unité pétrographique distincte du site de la Clapière, ou pour l'ensemble du site. Ces logiciels permettent le calcul de la surface des désordres, du volume mis en jeu, de la moyenne générale du mouvement et de l'écart type, aussi bien pour l'ensemble de la zone des désordres que pour chaque unité structurale ou pétrographique. Ces résultats, résumés au niveau de la figure 19, ne sont toutefois pas développés au niveau de ce travail.



**Figure 15 - Vue en perspective du versant de l'W.NW vers l'E.SE (ou de l'amont vers l'aval), avec cartographie de la composante verticale des désordres de 1970 à 1989**





**Figure 16 - Image en pseudocouleurs de la différence (1989 - 1987) calculée par rapport à un plan vertical NW-SE (mesure de l'évolution des désordres dans un plan horizontal)**

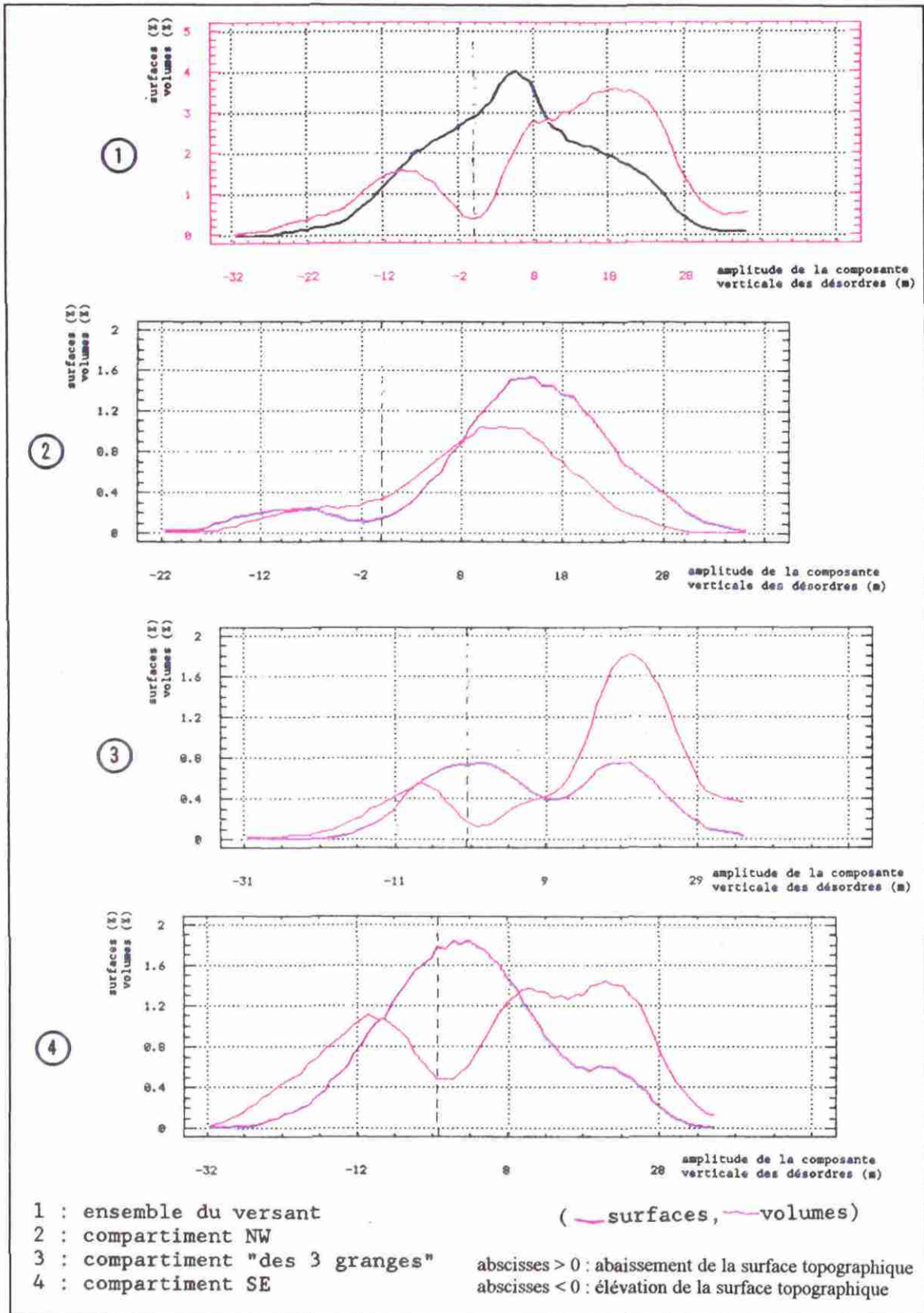


Figure 17 - Distribution statistique de la composante verticale des désordres dans les trois principaux compartiments structuraux (cf. figure 7)

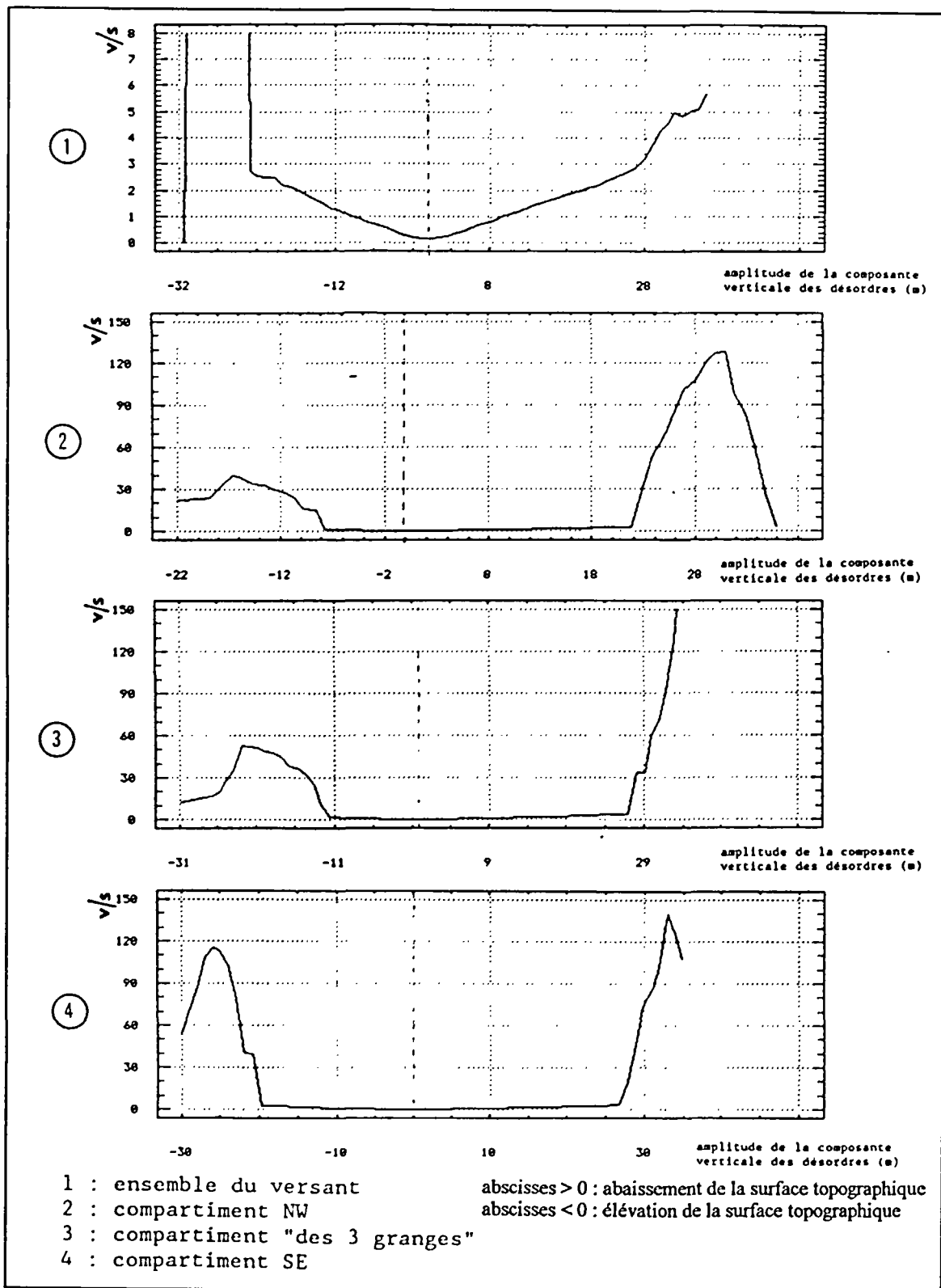


Figure 18 - Distribution statistique de la "quantité déplacée" dans les trois principaux compartiments structuraux (cf. figure 7)

I Indices morphométriques

- 1 Profondeur:  $6^{(*)} / 1\ 300 \times 100 = 0,46$  (\*) moyenne
- 2 Dilatation: env. 1
- 3 Ténuité: 1
- 4 Ecoulement plastique: 0

II Caractéristiques principales

ensemble du versant:  $S^-/S^+ = 520\ 650 / 271\ 675 = 1,92$   
 $V^-/V^+ = 6\ 219\ 080 / 1\ 975\ 944 = 3,14$

mvt. moyen - = -11,9 m  
mvt. moyen + = +7,3 m

compartiment SE:  $S^-/S^+ = 137\ 850 / 69\ 775 = 1,9$   
 $V^-/V^+ = 2\ 379\ 070 / 1\ 314\ 216 = 1,8$

mvt. moyen - = -17,3 m  
mvt. moyen + = +18,8,3 m

compartiment central:  $S^-/S^+ = 151\ 275 / 31\ 700 = 4,8$   
 $V^-/V^+ = 1\ 979\ 893 / 452\ 112 = 4,3$

mvt. moyen - = -13,1 m  
mvt. moyen + = +14,3 m

compartiment NW:  $S^-/S^+ = 231\ 525 / 170\ 200 = 1,4$   
 $V^-/V^+ = 1\ 860\ 117 / 209\ 616 = 8,8$

mvt. moyen - = -8,0 m  
mvt. moyen + = +1,2 m

**Figure 19 - Caractéristiques statistiques des désordres superficiels de la Clapière de 1970 à 1989**

#### **4.2.3. Analyse des profils topographiques**

Deux profils comparatifs ont été effectués sur les MNT de 1970 et de 1989 pour améliorer la perception de l'évolution de la Clapière (figures 20 à 22). Les profils réalisés montrent de façon très nette l'affaissement de toute la partie supérieure du versant, où l'on peut mesurer un déplacement vertical et un recul d'une trentaine de mètres. La progression du bourrelet de pied est également parfaitement mise en évidence. Mais ces profils font surtout apparaître une augmentation, de l'amont vers l'aval, à partir de 1 310 et 1 220 m d'altitude, de la progression de la base du versant.

#### **4.3. RESULTATS OBTENUS SUR LE FRIOLIN (EVOLUTION DE 1970 A 1986)**

La figure 23 présente une vue en perspective d'un MNT.

Le différentiel de MNT superposé à orthophoto est présenté dans la figure 24.

Les figures 25 et 26 montrent le versant du Friolin vu en perspective.

Par ailleurs, les figures 27 et 28 présentent quelques résultats obtenus lors de l'analyse statistique des données.

Tandis que les figures 29 à 31 correspondent à des profils topographiques obtenues au niveau du site.

##### **4.3.1 Analyse qualitative**

Il s'est avéré indispensable de seuiller les valeurs faibles de l'image des différences entre les deux MNT pour obtenir un résultat "vraisemblable" ; en d'autres termes, il a fallu effacer "le bruit de fond" dû à l'incertitude du calage altimétrique de chaque MNT.

Comme le montre la légende de la figure 24, les valeurs comprises entre -5 m et +5 m correspondent à ce "bruit". A l'extérieur de cet intervalle, l'image paraît refléter des transformations bien réelles et met en évidence de façon très nette la zone de désordres, tandis qu'il ne subsiste plus, localement, que quelques "artefacts".

Il conviendrait d'ailleurs de vérifier que ces "artefacts" ne signalent pas, ici ou là, quelques transformations bien réelles, parfois ponctuelles qui peuvent correspondre à des mouvements de terrains ou à une évolution par dissolution de gypse. On remarque en effet que les artefacts se situent plus particulièrement près (ou sur) des lignes de crêtes, où les pentes sont fortes, dans les zones boisées.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ces anomalies ou artefacts :

- on peut facilement invoquer, pour une période de 16 ans, l'évolution, naturelle ou non, de la forêt : effets de coupes, pousse des arbres.
- dans les escarpements, il faut sans doute y voir des anomalies inhérentes à la procédure de calcul des MNT : la différence d'azimut et d'élévation solaire, d'un couple stéréographique à l'autre, conjuguée à l'erreur sur le calage des images (1/2 pixel), peuvent expliquer des divergences locales des valeurs de MNT.

Compte tenu de ces observations, nous avons préféré conserver les valeurs brutes fournies par les calculs, plutôt que de les remplacer par des valeurs "corrigées".

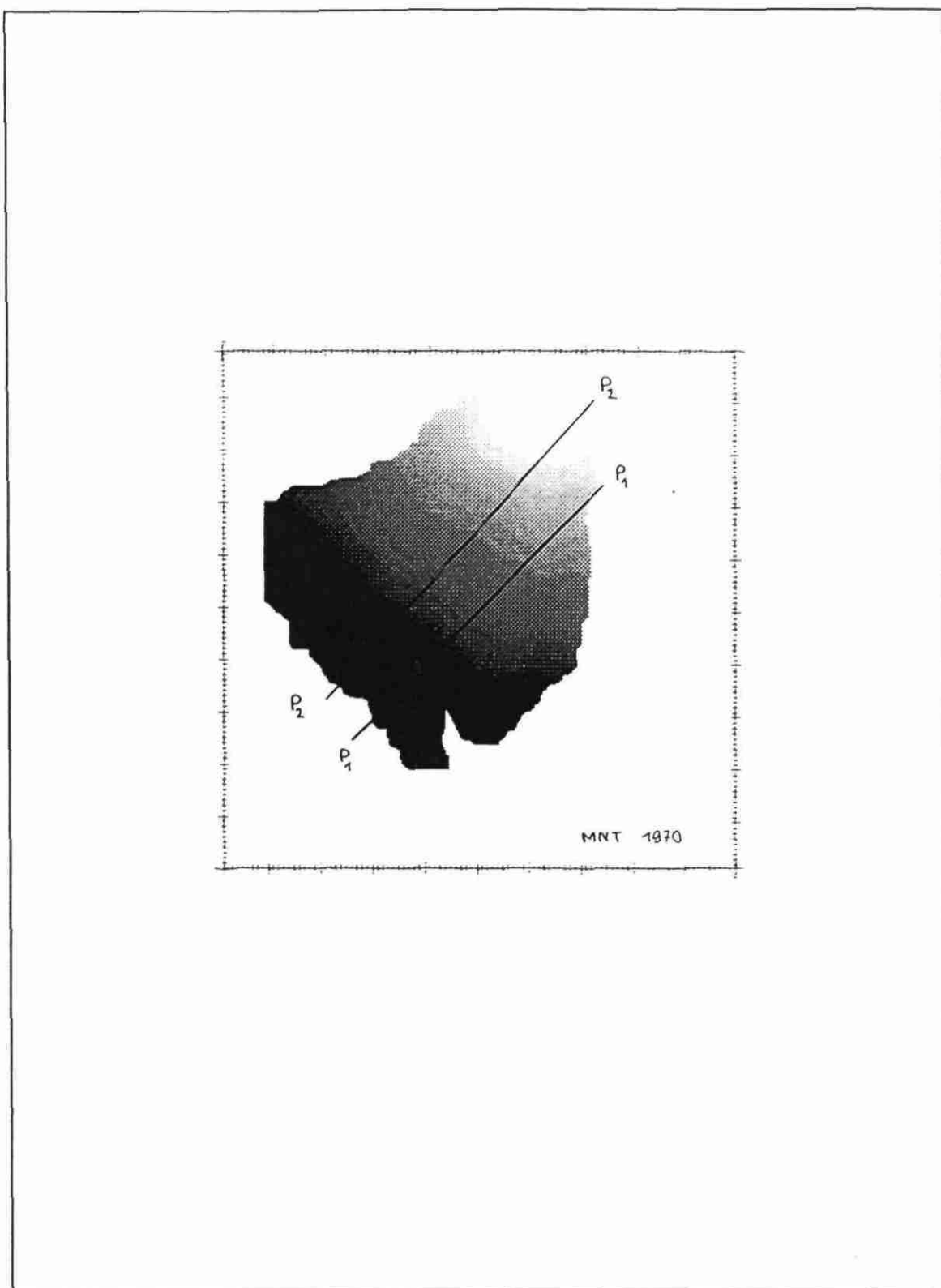


Figure 20 - Localisation des profils topographiques réalisés sur le site de la Clapière, extraits des MNT de 1970 et 1989

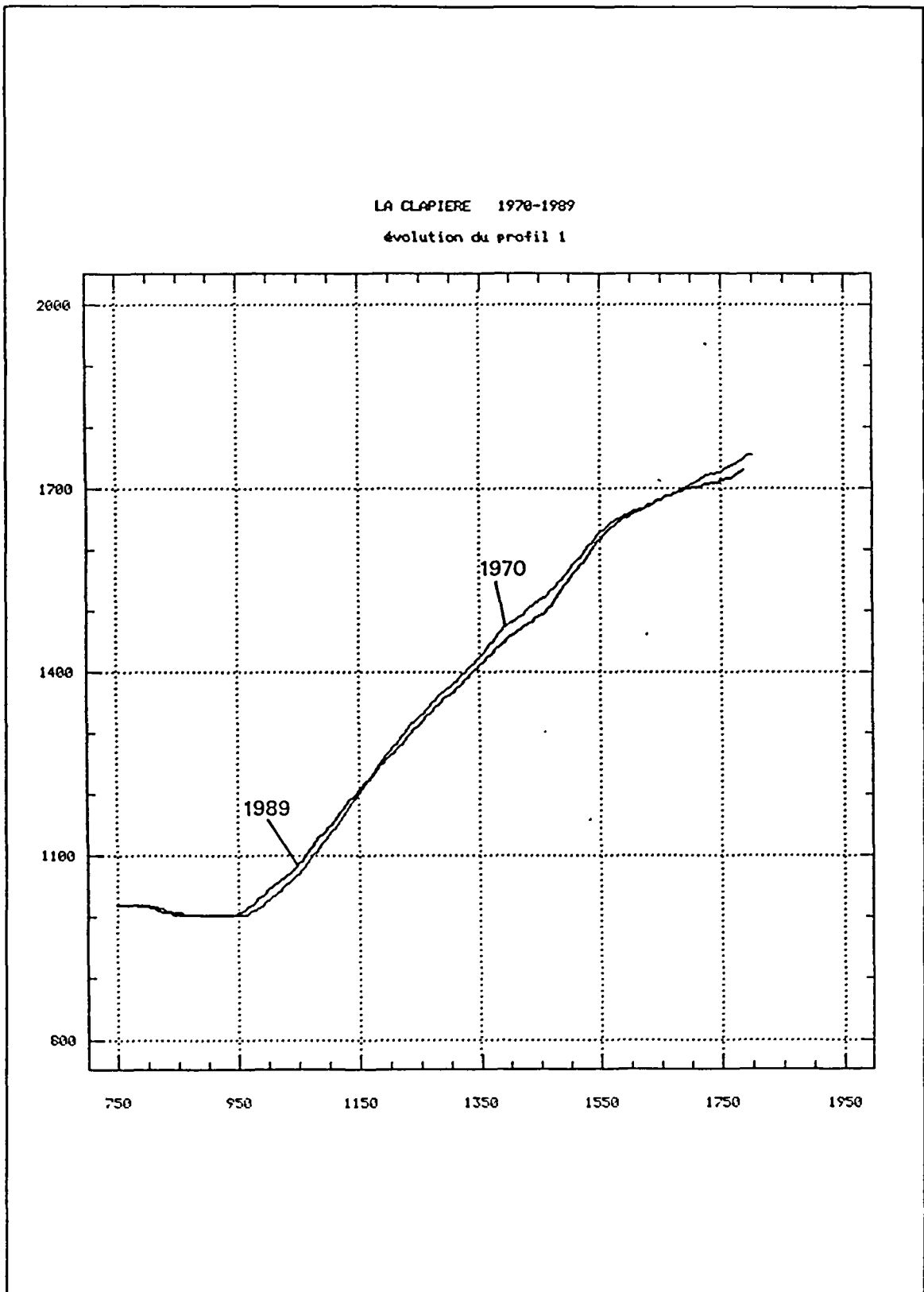


Figure 21 - Site de la Clapière : profil topographique 1, extrait des MNT de 1970 et 1989

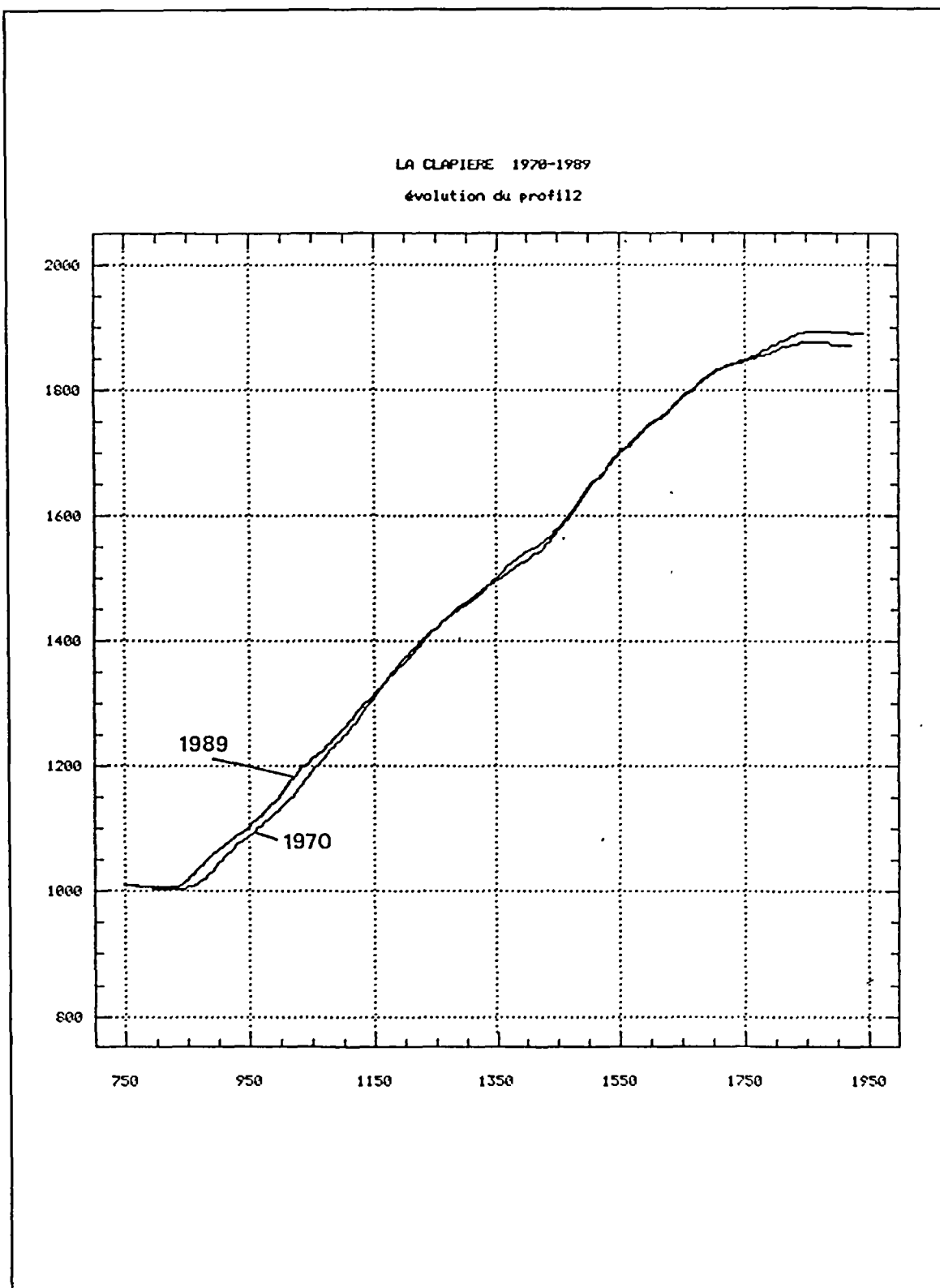
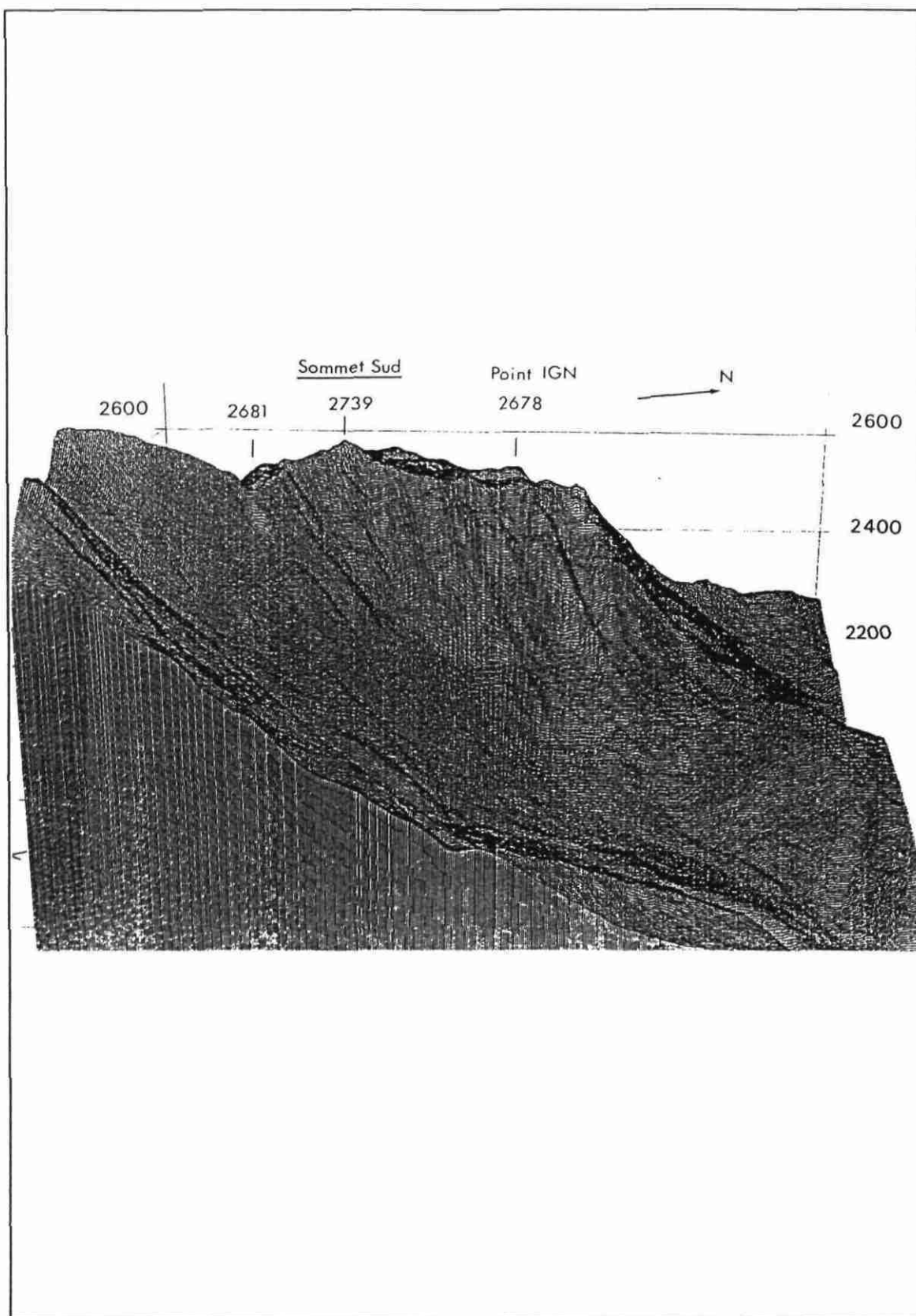


Figure 22 - Site de la Clapière : profil topographique 2, extrait des MNT de 1970 et 1989





**Figure 23 - Modèle Numérique de Terrain (MNTAERO) de type ISTAR, vue en perspective de la face Est**

L'images en pseudo-couleurs - carte de l'évolution du versant entre 1970 et 1986 -, présente quelques caractéristiques intéressantes (figures 24 à 26) ; elle révèle en effet :

- une discrimination franche des mouvements négatifs (affaissements) et des mouvements positifs,
- la présence d'un "axe de symétrie" situé vers 2 500 m d'altitude, parallèle à la bordure du plateau sommital ; cet axe s'abaisse très légèrement vers le nord,
- une orientation de la zone de désordres vers le NE, selon la ligne de plus grande pente.

Dans la partie supérieure de la face Est de la pointe du Friolin, toute la zone d'arrachement est nettement mise en évidence.

La partie inférieure de la zone de désordres, comprise entre 2 200 m et 2 500 m, est caractérisée par plusieurs maxima d'intensité que l'on peut remarquer à la base des éperons rocheux (vers 2 300 - 2 350 m), et un autre vers 2 250 m, correspondant à "l'arrachement inférieur".

Cet arrachement apparaît ici comme résultant d'une déformation "positive", c'est-à-dire plutôt comme un bombement, plus ou moins circulaire, que comme une zone d'arrachement à proprement parler.

#### **4.3.2. Analyse quantitative**

L'analyse quantitative des désordres a été réalisées à partir des résultats bruts de la différence altimétrique entre les deux MNT.

Les valeurs les plus grandes obtenues sur la différence des MNT sont :

- pour les affaissements, - 49 m,
- pour les mouvements positifs, + 52 m.

Ces résultats sont en parfaite concordance avec les chiffres avancés par GOGUEL (1989). Nous en déduisons que l'incertitude qui pèse sur la détermination de la valeur altimétrique des pixels n'est pas trop pénalisante, du moins lorsque la différence d'altitude entre deux pixels de même coordonnées x et y est suffisamment grande. On peut alors accorder une certaine confiance aux résultats obtenus.

L'analyse statistique de la distribution des désordres donne les rapports suivants :

- surface des mouvements négatifs : 14,7 ha (38,6%)
- surface des mouvements positifs : 23,5 ha (61,4%)
- volume des mouvements négatifs : 2 472 296 m<sup>3</sup> (43,7%)
- volume des mouvements positifs : 3 183 629 m<sup>3</sup> (56,3%)

Ce qui donne un mouvement moyen de 16,7 m pour les affaissements et de 13,5 m pour les gonflements.

Les désordres "négatifs" sont donc compensés par les désordres "positifs", le rapport des surfaces étant de 1,6, celui des volumes de 1,3. Ces résultats sont résumés au niveau de la figure 27.



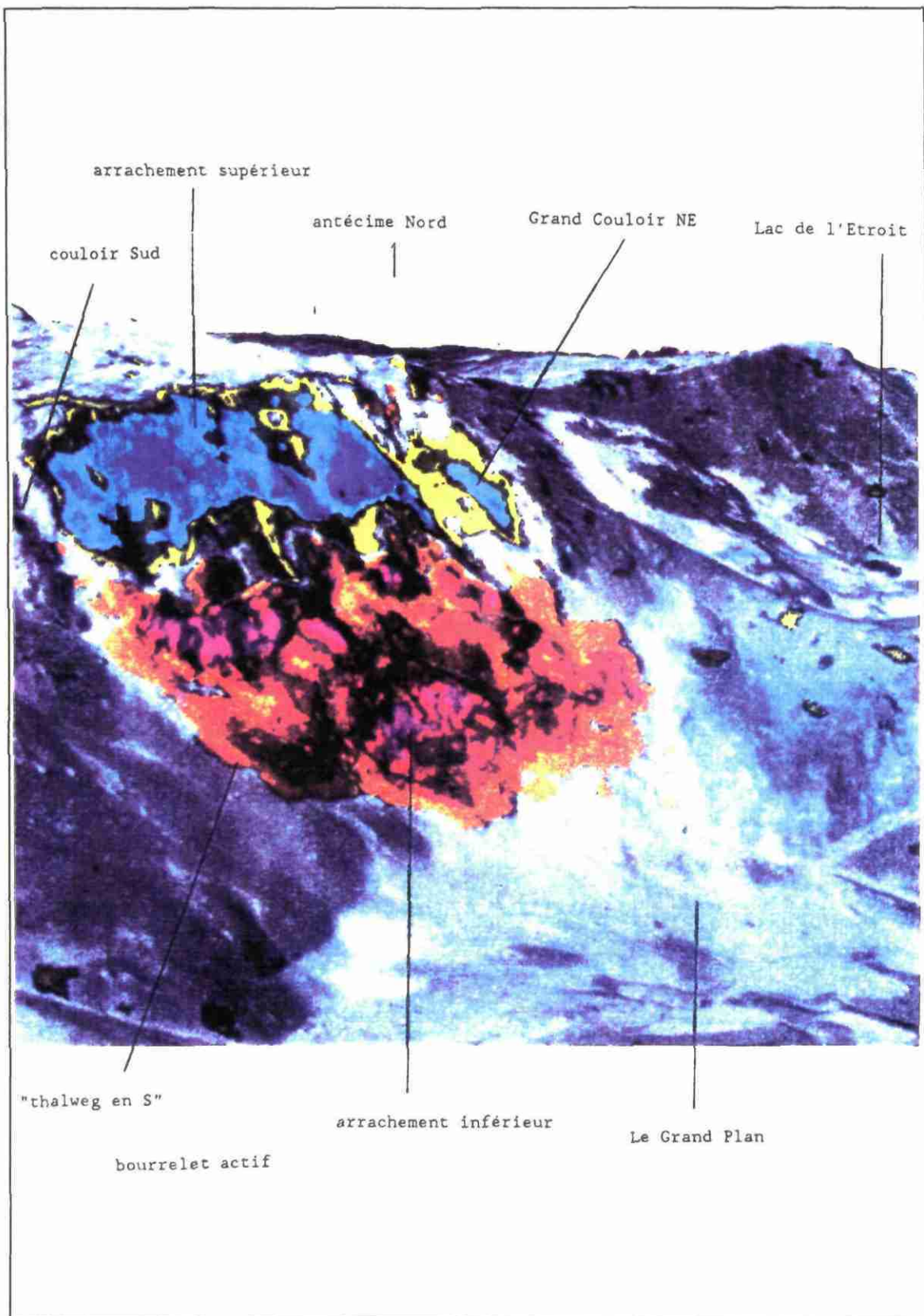


Figure 25 - Vue en perspective SE - NW de la face Est du Friolin

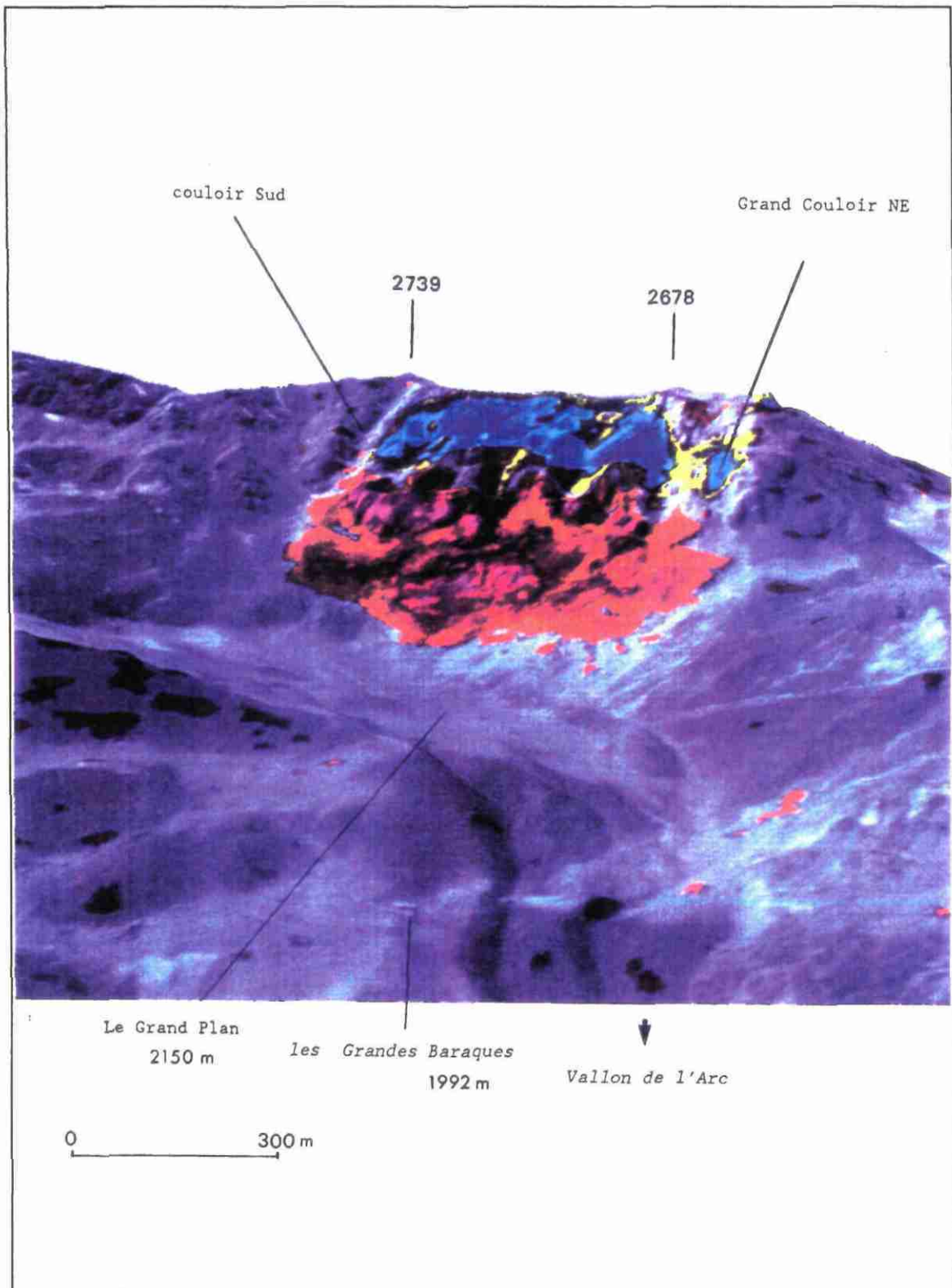


Figure 26 - Vue en perspective E-W de la face Est du Friolin

Indices morphométriques

Déplacement : (D estimé à 50)  $50 : 700 \times 100\% = 7\%$

Dilatation : env. 1

Ténuité : 3

Ecoulement plastique : 0

Caractéristiques statistiques

$$S^+/S^- = 235000 : 147000 = 1,6$$

$$V^+/V^- = 3\,183\,629 / 2\,472\,296 = 1,3$$

mouvement moyen + = +13,5 m

mouvement moyen - = -16,7 m

**Figure 27 - Caractéristiques statistiques des désordres superficiels du  
Friolin  
de 1970 à 1986**

Compte tenu des remarques qui ont été faites plus haut, les chiffres concernant le volume des désordres ne sont pas à prendre "à la virgule près". Ils donnent cependant un ordre de grandeur relativement fiable et représentent plus qu'une estimation de l'ampleur des transformations morphologiques (de surface) du versant.

Le diagramme de la figure 28 montre la quantité de mouvement mise en jeu dans ce mouvement et l'importance des mouvements positifs. Cette constatation ne paraît pas compatible avec l'hypothèse d'un affaissement dans des vides de dissolution du gypse ; en effet, on pourrait s'attendre, dans ce cas, à un équilibre, voire une prédominance des mouvements négatifs, ce qui n'est pas observé.

### **4.3.3 Analyse des profils topographiques**

Une vingtaine de profils topographiques ont été extraits le long de la face Est de la pointe du Friolin. Tous montrent un basculement de la surface topographique, ce qui peut s'interpréter comme le résultat d'un glissement de type rotationnel. Ceci explique l'amplitude maximum observée à la base du ressaut rocheux, qui correspond évidemment au déplacement "en bloc" de cet escarpement. Les déformations observées à la base de la face peuvent ainsi être considérées comme des conséquences de cette évolution, c'est-à-dire comme une adaptation des terrains sous-jacents aux nouvelles conditions d'équilibre. Les figures 29 à 31 présentent cinq des profils topographiques réalisés au niveau du site du Friolin.

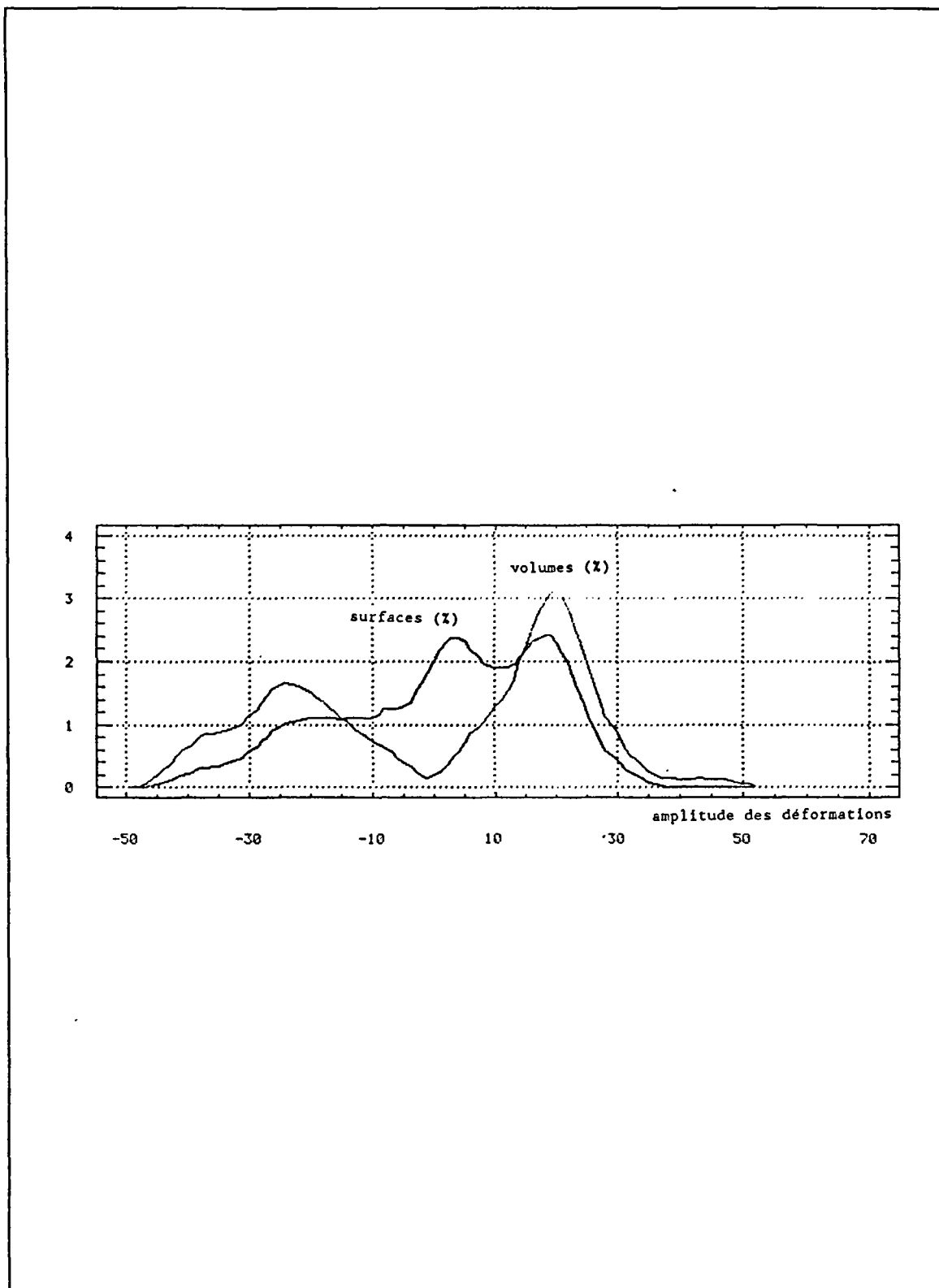
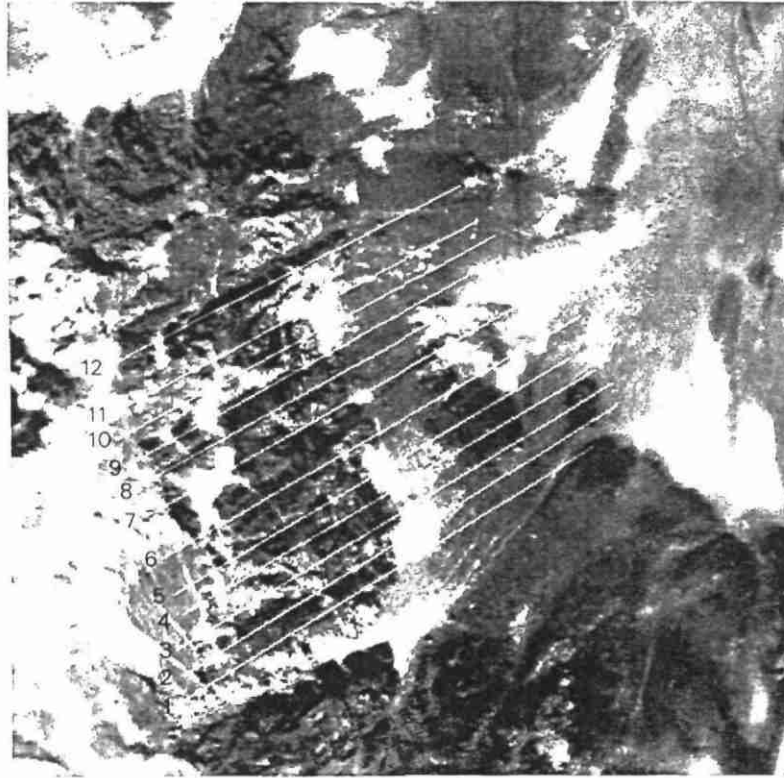


Figure 28 - Site du Friolin : Distribution statistique de la composante verticale des désordres de 1970 à 1986





**Figure 29 - Site du Friolin : localisation des profils topographiques**

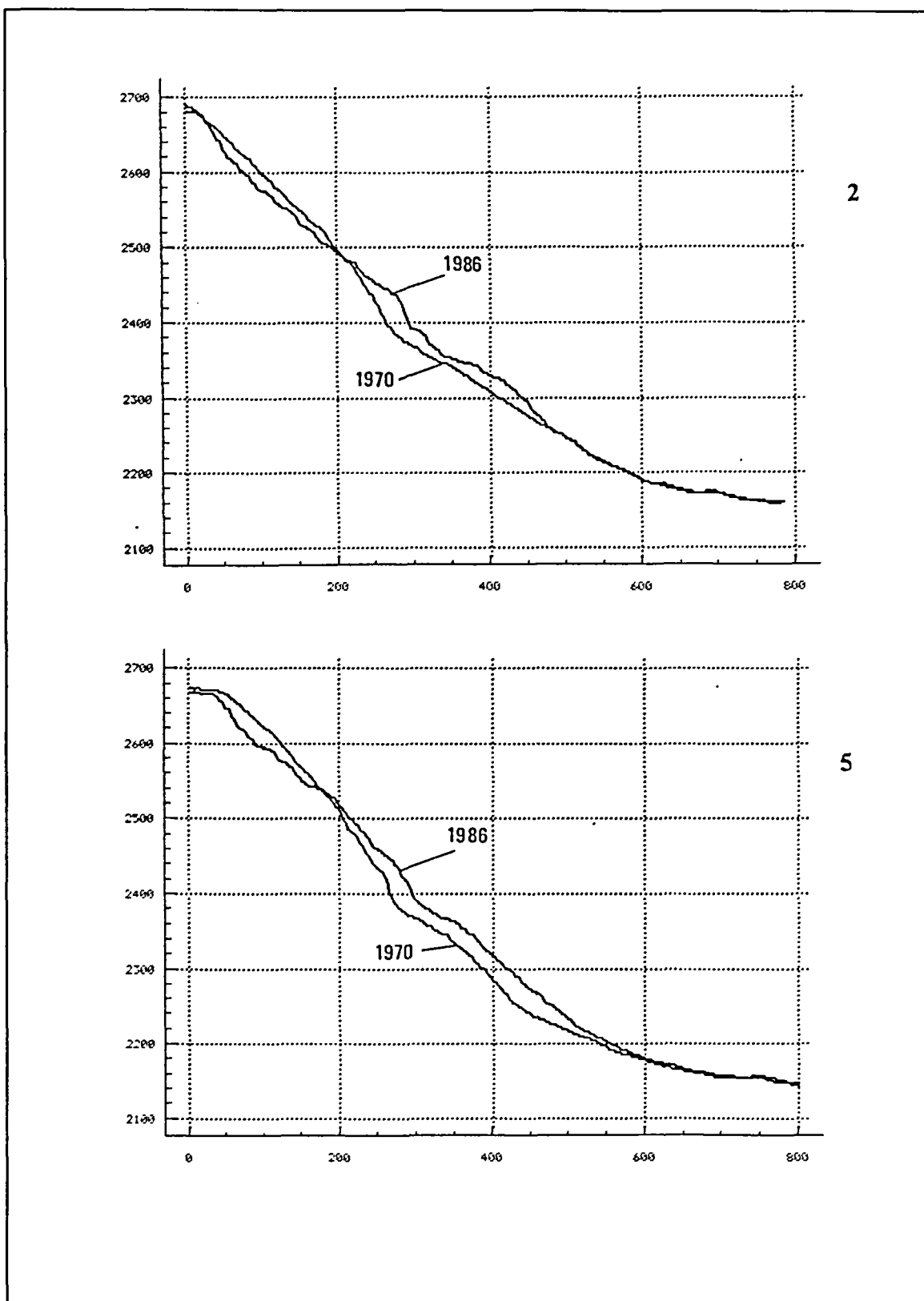


Figure 30 - Site du Friolin : comparaison des profils topographiques n° 2 et 5  
(cf. figure 29)

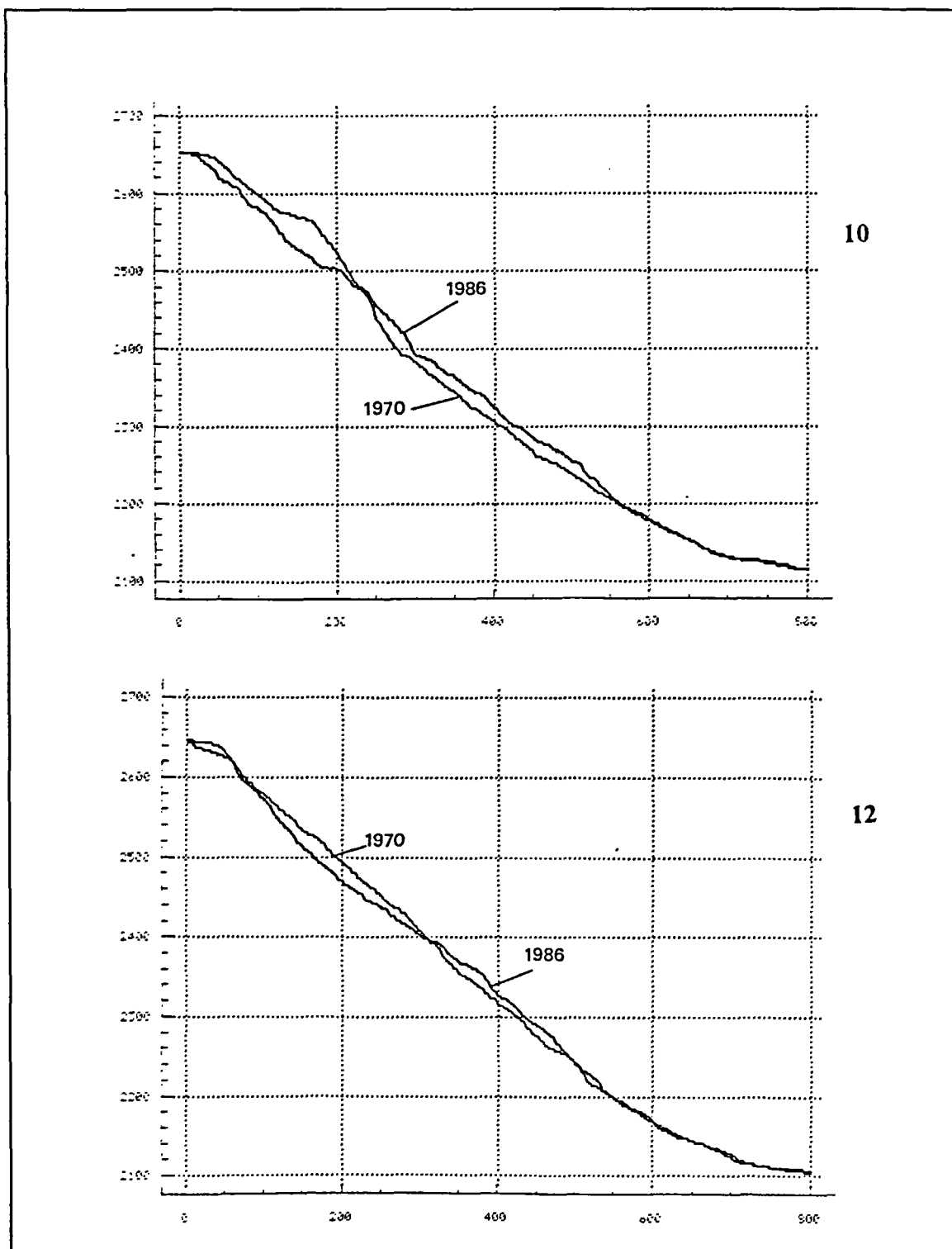


Figure 31 - Site du Friolin : comparaison des profils topographiques n° 10 et 12 (cf. figure 29)

## 5. CONCLUSIONS

### La méthodologie actuelle

La méthode d'analyse des mouvements de terrain à l'aide de la photogrammétrie présentée dans ce rapport montre que les techniques de traitement d'images permettent d'utiliser aussi bien des données photogrammétriques classiques, que des MNTAERO, tels que ceux calculés par ISTAR. Ces données doivent être exploitées en se basant sur le calcul de modèles numériques de terrain qui décrivent, de façon continue dans l'espace, la surface topographique du site, à des dates successives  $T_0, T_1, \dots, T_n$ .

La comparaison, au moyen des techniques de traitement d'images, de ces MNT permet d'établir rapidement des cartes de déformations du site, déformations induites par des phénomènes plus ou moins profonds que l'on peut dès lors tenter de décrire.

L'analyse qualitative de ces déformations révèle, avec d'autant plus de précision qu'elle s'appuie sur des critères géologiques (lithologie, pétrographie...), les éléments suivants:

- l'extension de la zone de désordres,
- les différents secteurs caractérisés par des intensités variables de déformation,
- les structures tectoniques et les unités charnières qui contrôlent l'évolution des désordres.

Elle est complétée par une analyse quantitative à partir de laquelle les désordres sont caractérisés, dans chaque unité structurale, par des valeurs numériques de déplacement vertical et/ou horizontal.

Le géologue, l'ingénieur et l'expert disposent ainsi d'un outil qui les guide dans:

- la détermination du type et du nombre de mesures à effectuer pour améliorer leur connaissance de la pathologie des terrains,
- le choix d'un système de surveillance, et l'optimisation de son installation,
- la sélection des solutions confortatives les plus appropriées.

Relativement peu onéreuse comparée à un budget général de surveillance ou d'aménagement d'un site, la méthode proposée, bien que consommatrice de données, paraît génératrice d'économies de temps et de moyens, comme le suggère le tableau présenté ci-après (tableau 2).

Elle permet en outre de valoriser des données parfois anciennes - d'autant plus utiles que les informations concernant l'évolution d'un site sont rares - et, le cas échéant, de contrôler l'efficacité des solutions de confortement, des travaux d'assainissement (drainage) ou des aménagements déjà effectués sur le site.

Bien entendu, il ne s'agit pas d'une méthode d'alerte, les délais de réalisation et la précision des mesures ne s'y prêtant pas.

L'utilisation de la méthode devrait pouvoir se généraliser dans l'avenir, tant par la banalisation des systèmes de traitement d'images que par l'accessibilité et le nombre toujours plus grand de données.

Délais d'étude	Option proposée	Méthode classique
T1 (T0 + quelques jours)	sélection de clichés anciens	reconnaissance préliminaire : évaluation des risques, mesures d'urgence, <u>survol</u> aérien éventuel ...
T2 (T0 + quelques semaines)	↓	reconnaissance détaillée (enquête, cartographie, analyse géologique et hydrogéologique, analyse des causes probables, recherche de clichés anciens, ...)
T3 (T0 + 1 mois)	Analyse photogrammétrique de 2 séries de clichés ← ↓	mission photographique aérienne spécifique ; analyse photogrammétrique éventuelle pour l'établissement de plan en courbe de niveau.
T4 (T0 + 2 mois)	Cartographie numérique de la zone de désordres Analyse détaillée de l'évolution Optimisation de l'auscultation	Etude d'un dispositif de surveillance ou des sondages à effectuer
T5 (T0 + 3 à 4 mois)	↓ Installation pilotée d'un système de surveillance ; reconnaissance par instrumentation optimisée	Surveillance ou reconnaissance par instrumentation "à vue"
T6 (T0 + 6 mois)		Premières analyses de la dynamique des désordres

Tableau 2 - Scénario d'étude d'un grand mouvement de terrain

### Les perspectives

Le besoin de traiter, selon cette méthodologie, des clichés non plus aériens, mais terrestres, doit être envisagé. En effet, l'utilisation de tels clichés pourrait ainsi permettre par exemple :

- de calculer ou tout au moins d'appréhender dans le cas des glissements rotationnels, un angle de basculement,
- ou bien, d'une façon plus générale, d'apporter des éléments intéressants dans le cas d'une auscultation dans un massif rocheux, sur le comportement d'escarpements ou de falaises.

La clef de ce problème, encore non résolu, est la restitution, à partir de photographies prises du sol, de modèles numériques de ces escarpements.

A plus court terme, des améliorations devront être recherchées quant au calcul et au traitement des MNT, de façon à pouvoir les intégrer dans les logiciels de calculs de stabilité de pente, ou les inclure dans la modélisation de l'évolution des mouvements de terrain.

Les méthodes d'évaluation et de cartographie de l'aléa mouvement de terrain s'en trouveraient ainsi sensiblement améliorées.

On a vu le rôle important de l'eau vis-à-vis des instabilités de versant. Or, certains logiciels permettent de modéliser l'écoulement des eaux superficielles à partir de MNT ; une nouvelle approche de l'évolution des versants pourrait être basée sur la caractérisation des anomalies du réseau d'écoulement et la mise en évidence de zones potentielles d'infiltrations ou de rétention d'eau.

Plusieurs perspectives semblent donc s'ouvrir quant aux applications de cette méthode de travail. Par exemple, la cartographie de l'évolution de terrains particulièrement sensibles devrait s'en trouver facilitée. Celle des terrains gypseux, dont les transformations, bien qu'imperceptible à l'œil nu, sont souvent très rapide (quelques années) et peuvent poser de graves problèmes économiques - peut notamment être citée.

Des applications en glaciologie peuvent également être envisagées, comme l'estimation et le suivi de l'évolution du stock de glace (à petite échelle, sur un glacier, ou à plus grande échelle, sur les inlandsis), avec toutes les conséquences possibles en climatologie ou micro climatologie.

Dans un autre domaine, la cartographie de l'évolution des côtes paraît être un sujet porteur, pour lequel la méthodologie définie dans ce mémoire semble bien adaptée.

### **Etudes en cours développées grâce à la méthodologie d'analyse par photogrammétrie des mouvements de terrain**

D'ores et déjà, cette méthodologie est mise en oeuvre sur plusieurs sites français. Ces sites ont pu être analysés soit dans le cadre d'opérations menées en parallèles avec la mise au point de la méthodologie (GIRAULT, 1992 ; GIRAULT et TERRIER, 1993), soit dans le cadre d'études relatives au service public. Parmi ces différents sites étudiés, il s'agit :

*- du site de Boulc, dans le département de la Drôme :*

Ce site est actuellement affecté par des glissements et coulées de boue.

Trois MNT ont à ce jour pu être analysés, ils concernent les années 1980, 1988 et 1991. En outre, une campagne de photographies aériennes spéciale a été effectuée au printemps 1993, afin d'obtenir des données photogrammétriques précises du site.

Ainsi, grâce à la méthodologie développée dans la présente étude, ce site fait l'objet actuellement d'un suivi et d'une analyse régulière de son évolution.

Il sert par ailleurs de zone test pour d'autres investigations ou techniques particulières pour l'analyse des mouvements de terrain, telles que l'exploitation des données du système DORIS.

*- du site de l'Harmalière et du Mas, dans le département de l'Isère :*

Ce site correspond en fait à deux combes voisines caractérisées : la première, par un glissement de terrain et des coulées de boue, la phase paroxysmale du glissement ayant eu lieu en mars 1981; la seconde, par un glissement dont l'activité paraît relativement plus faible aujourd'hui ; toutefois,

compte tenu de la proximité et des similitudes morphologiques ou géologiques entre les deux combes, l'hypothèse d'une réactivation brutale du glissement au niveau du Mas n'est pas exclue. Les MNT, dont nous disposons aujourd'hui pour analyser ce site, correspondent aux missions photographiques IGN 1948 et 1989.

*- du site des Eaux Bonnes, dans les Pyrénées Atlantiques*

Ce site est affecté par un glissement important dont la phase paroxysmale a eu lieu entre octobre 1982 et mars 1983. Actuellement, nous disposons de trois MNT, relatifs à 1978, 1983 et 1989, ce qui nous permet d'analyser le site sur trois périodes spécifiques par rapport à la phase paroxysmale du mouvement : pour le MNT 1970, configuration de la surface topographique avant le déclenchement du glissement ; MNT 1983, configuration juste après le mouvement principal ; MNT 1989, configuration sub-actuelle du site. Le différentiel entre les MNT de 1983 et 1989 devrait permettre d'observer si le mouvement évolue toujours aujourd'hui, et comment, ou si au contraire, le mouvement semble actuellement stabilisé.

*- du site de la Côte des Basques, dans le département des Pyrénées Atlantiques*

Ce site présente des problèmes d'effondrements importants au niveau de la falaise maritime, dans un secteur particulièrement vulnérable, puisque cette zone est actuellement urbanisée ou en voie de l'être, et correspond à une zone d'intérêt touristique non négligeable pour la commune de Biarritz.

L'utilisation de la méthode d'analyse par photogrammétrie doit permettre dans ce cas d'analyser l'évolution de la falaise. Pour cela, nous disposons actuellement de trois MNT, relatifs à 1968, 1982 et 1989. L'acquisition de ces données doit permettre d'estimer la quantité des terrains effondrés entre chacune de ces trois dates, et éventuellement de localiser les secteurs les plus sensibles aux effondrements de la falaise côtière.

Les résultats de traitement et d'analyse des sites de Boulc, de l'Harmalière et du Mas, ainsi que des sites de la Clapière et du Friolin, sont repris en détail dans le rapport GIRAULT et TERRIER (1993). L'analyse des données photogrammétriques des sites de Boulc (résultats 1993), des Eaux Bonnes, et de la côte des Basques est représentée dans le rapport TERRIER et LEROI (1993).

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARD Y., MENEROUD J.P., DURVILLE J.L., MOUROUX P. (1987)- Microzonage sismique : application aux Plans d'Exposition aux Risques. *Bull. Labo. P. et Ch.*, n° 150 - 151

CROZIER ( 1973) - Techniques for the morphometric analysis of landslips. *Z. Geomorphol.*, vol. 17, n° 1, p. 78-101.

FILLIAT G. (1981) - La pratique des sols de fondations. Paris, Ed. du Moniteur, 1392 p.

FLAGEOLLET J.C. (1988) - Les mouvements de terrain et leur prévention. Ed. Masson, Paris, 224 p.

FOLLACI J.P. (1988) - Rapport de synthèse du Laboratoire des Ponts et Chaussées de Nice : mouvements du versant de la Clapière, St Etienne de Tinée.

FOLLACI J.P., PEREZ J.L., JULIAN M. (1984) - Crêtes doubles et perturbations de versants dans un domaine de montagne alpine (Mercantour et ses bordures). Communications du Colloque de Caen "Mouvements de terrain", 22-24 mars 1984. *Doc. du BRGM*, n° 83, p. 533-542.

GIRAULT F. (1992) - Auscultation par imagerie numérique de quelques versants instables. *Doc. du BRGM*, n°217.

GIRAULT F., ASTE J.P. (1991) - Caractérisation morphologique numérique de quelques versants instables. Rapport BRGM R 33096 ENV 4S 91.

GIRAULT F., TERRIER M. (1993) - Analyse par photogrammétrie des mouvements de terrain : applications aux sites de la Clapière (06), du Friolin (73), de Boulc (26), de l'Harmalière et du Mas (38) - Rapport BRGM n°37785 GEO-SGN-RNG-93

GOGUEL B. (1989) - Le glissement du Friolin, en Savoie : un mouvement majeur révélé par les photographies. *Rev. fr. Géotech.*, n° 48, p. 55-64.

LAINE C. (1989) - Etude de l'influence de la zone non saturée sur l'équilibre des pentes instables. Thèse doct. Génie civil, 89 ISAL 0092, INSA Lyon.

MALATRAIT A.M. (1975) - Analyse et classement des mouvements gravitaires, feuille St. Jean de Maurienne à 1/50 000. Thèse de 3ème cycle.

MALON J.F. (1984) - Principaux traitements des images satellitaires et associées : point 1984. Rapport BRGM 84 SGN 396 GEO.

RIVET (1993)- Projet de Recherche CCE/EPOCH/RIVET, thème 2 "Les instabilités de versant"

TERRIER M., LEROI E. (1993, à paraître) - Analyse par photogrammétrie des mouvements de terrain : applications aux sites de Boulc (26), des Eaux Bonnes (64) et de la Côte des Basques (64) - Rapport BRGM-GEO-RNG-93