



**HAL**  
open science

# Rôles des héritages géologiques dans les processus d'instabilités gravitaires

Thomas Lebourg

► **To cite this version:**

Thomas Lebourg. Rôles des héritages géologiques dans les processus d'instabilités gravitaires. Géologie appliquée. Université de Nice - Sophia Antipolis, 2008. tel-04923379

**HAL Id: tel-04923379**

**<https://hal.science/tel-04923379v1>**

Submitted on 31 Jan 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

*Rôles des héritages géologiques dans les  
processus d'instabilités gravitaires*

Thomas LEBOURG

Maître de Conférences, 3<sup>ème</sup> section

Habilitation à Diriger des Recherches

Disciplines : Géosciences

Spécialité : Risques Géologiques

Date de soutenance prévue :

4 décembre 2008

**Composition du Jury**

**Rapporteurs :**

**David Amitrano,**

**MdC, HDR,**

**Université de Grenoble**

**Roger Cojean,**

**Professeur,**

**Université de Paris-Est Marne-La-Vallée**

**Michel Jaboyedoff**

**Professeur,**

**Université de Lausanne**

**Examineur :**

**Emmanuel Tric,**

**Professeur,**

**Université de Nice Sophia-Antipolis**

**Richard Fabre,**

**Professeur,**

**Université de Bordeaux**

## Plan du mémoire

1	Introduction.....	5
2	Etat civil.....	8
3	Parcours Scientifique.....	9
3.1	Activités de recherche.....	9
3.1.1	Formation Universitaire.....	9
3.1.2	Responsabilités administratives et représentation scientifique :.....	9
3.1.3	Profil et intérêts Scientifiques.....	10
3.1.4	Animation et participation aux programmes scientifiques.....	10
3.1.5	Développement d'outils liés aux activités de recherches.....	11
3.1.6	Collaborations scientifiques.....	11
3.2	Présentation des thèmes et objets de recherche.....	13
3.2.1	Recherches Doctorales.....	13
3.2.2	Recherche post-doctorale (depuis mon recrutement à Géosciences Azur)......	14
3.3	Enseignement, Encadrement, Collaboration et Représentation Scientifique.....	15
3.3.1	Activités d'enseignement de 2001 à 2008 :.....	15
3.3.2	Encadrement d'étudiants.....	16
4	Rôles des héritages géologiques dans les processus d'instabilités gravitaire.....	20
4.1	Introduction.....	20
4.1.1	Les mouvements de terrain : Histoire d'un héritage.....	20
4.2	Héritage tectonique et identification des limites morphologiques des mouvements de versants à grande échelle :.....	24
4.2.1	Morphologie de mouvements de versant à grande échelle.....	24
4.2.2	Quelles sont les relations qui existent entre les Deep-Seated Gravitational Slope Deformations, les Deep Seated Landslide, canevas structural et topographie ?.....	26
4.2.3	Quelle est la géométrie des déformations en profondeur ?.....	29
4.3	Héritages mécaniques : altérations et lessivages une lutte sans merci.....	33
4.4	L'imagerie géophysique et hydrogéophysique des mouvements de terrain,.....	39
4.4.1	Imagerie par tomographie électrique statique.....	41
4.4.2	Hydro-géophysique passive et active.....	46
4.4.3	Hydro-géophysique permanente (surveillance) ou Time Laps Survey :.....	50
4.5	Perspectives de recherche.....	55
4.5.1	L'évolution temporelle des aléas gravitaires face aux changements climatiques et aux impacts anthropiques.....	56
4.5.2	Les enjeux des prochaines décennies sur la récurrence des instabilités gravitaires...57	
4.5.3	Les enjeux d'une recherche transdisciplinaires.....	58
	Publications.....	60
5	Publications.....	61
5.1	Publications articles (23).....	61
5.2	Communications (41).....	63
5.3	Autres publications et rapports d'étude.....	66
6	Bibliographie.....	67
	Articles publiés.....	75

Annexes 1 à 17 : Principaux papiers publiés depuis la thèse.





## 1 INTRODUCTION

Ce mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) est l'occasion de faire la synthèse de mes activités de recherche depuis mon recrutement à Géosciences Azur (2001), et de poser quelques problèmes majeurs, et quelques avancées en termes de connaissances liés à la recherche et la compréhension des processus rupturels et plus particulièrement les mouvements de terrain et leur histoire. Mon arrivée au sein de Géosciences Azur est associée au démarrage d'une nouvelle thématique de recherche « l'étude des aléas gravitaires ». Elle s'accompagne de l'arrivée d'Yves Guglielmi et de l'implication de plusieurs collègues du laboratoire (Emmanuel Tric et Stéphane Bouissou) dont les compétences transversales vont permettre un développement rapide de cette thématique.

Intégrer un nouveau laboratoire est généralement marqué par une petite période d'adaptation, mais développer une nouvelle thématique, avec les limitations budgétaires inhérentes à toute structure de recherche ne permet pas toujours de cibler avec précision le ou les thèmes les plus importants à développer par un « « jeune » » chercheur. Le travail qui est présenté dans ce mémoire est le fruit de la mise en place d'une stratégie de recherche qui a pour objectif de comprendre les processus rupturels et l'héritage géologique qui déclenchent ou facilitent les mouvements de versant. Cette stratégie de recherche m'a permis d'utiliser de nombreux outils (géomécaniques et géophysiques) qui sont et resteront des outils à des fins d'observation et de quantification et non pas des thèmes de recherche.

Risques gravitaires, aléas gravitaires, mouvements de terrain, de versants, glissements, processus rupturels.... bien des termes sont nécessaires pour décrire et comprendre ce qui est à l'origine d'un des plus importants processus de la morphogenèse. Sans les mouvements de terrain, il n'y aurait pas de montagnes, pas de talus continentaux... la Terre serait plate, karstifiée ou arénisée... sans aller jusqu'à cette vision extrême, fausse et beaucoup trop simpliste, les 4 dernières décennies ont vu apparaître une nouvelle thématique de recherche, principalement orientée sur les risques naturels et plus particulièrement pour notre communauté, les risques gravitaires. Les recherches actuelles s'orientent soit vers une approche de type géotechnique (gestions du risque), soit vers une approche plus fondamentale sur la compréhension des processus rupturels et des différents héritages géologiques au sens large.... mais aussi de la dynamique et la cinématique qui aboutissent inévitablement à la prise en compte du temps dans certaines de ces composantes : l'altération, les circulations de fluides et l'évolution des climats.



# 1<sup>er</sup> Partie

**Etat Civil**

**et**

**Parcours scientifique et présentation des  
thèmes de recherche**



## **2 ETAT CIVIL**

**Prénoms, Nom :** Thomas Grégory LEBOURG

**Date et lieu de naissance :** Né le 18 juin 1971 à Suresnes (92)

**Nationalité :** Française

**Situation familiale :** Marié (à Geneviève), 3 enfants, nés en 2001 (Marie), 2003 (Vincent) et 2006 (Gabriel).

**Situation professionnelle :** Maître de Conférences à l'Université de Nice Sophia-Antipolis

**Adresse personnelle :**

Les Lucioles, chemin du Plateau St Hilaire, 06130 Grasse  
04 92 60 93 55

**Adresse professionnelle :**

Laboratoire Géosciences Azur – UMR 6526  
250, rue Albert Einstein  
Sophia-Antipolis 06560 Valbonne.  
Tél : 04 92 94 26 70, Mél : [lebourg@geoazur.unice.fr](mailto:lebourg@geoazur.unice.fr)  
<http://geoazur.unice.fr/PERSO/lebourg/index.htm>

### 3 PARCOURS SCIENTIFIQUE

#### 3.1 Activités de recherche

##### 3.1.1 Formation Universitaire

<b>Année</b>	<b>Diplômes</b>	<b>Mention</b>
2000	Doctorat d'Université Géologie Appliquée – Université Bordeaux I Analyse géologique et mécanique de glissements de terrain dans des moraines des Pyrénées centrales et occidentales (France)	<i>Très honorable</i>
1997	DEA Mécanique des Sols et Ouvrages dans leur Environnement, École Centrale Paris	<i>AB</i>

Rq : Qualifié aux fonctions de Maître de Conférence en 35<sup>ème</sup> et 36<sup>ème</sup> section en 2001

##### 3.1.2 Responsabilités administratives et représentation scientifique :

*Depuis Septembre 2005* : Coordonnateur de la première année de licence 1

*De mars 2002 à juin 2008* : Membre élu du conseil de Laboratoire Géosciences Azur

*Depuis septembre 2006* : membre élu du conseil d'UFR Sciences, UNS (Université Nice-Sophia-Antipolis).

**Depuis janvier 2008** : Co-coordonnateur de l'animation du thème Risques Géologiques du Laboratoire Géosciences Azur.

**Depuis octobre 2006** : Titulaire de la prime d'encadrement doctoral et de recherche (PEDR)

**Depuis décembre 2008** : représentant du CNRS au Pôle de Compétitivité Risques

##### **Expertise :**

- Consultant auprès du Plan Bleu (ONU) sur des questions d'expertises de l'impact des changements climatiques sur la récurrence des risques géologiques sur le pourtour Méditerranéen (conférences et documents),
- Expert scientifique auprès du Fond National Suisse de la Recherche scientifique,
- Expert scientifique auprès de la Région Rhône-Alpes,
- "Reviewer" pour la revue *Mathematical Geology et Engineering Geology*,

### **3.1.3 Profil et intérêts Scientifiques**

Mon profil de recherche actuel est le fruit d'une longue maturation depuis la fin de la thèse au CDGA (Centre de Développement des Géosciences Appliquées de l'Université de Bordeaux) et mon intégration au laboratoire Géosciences Azur. En effet, mon projet de recherche s'inscrit dans une des thématiques du laboratoire Géosciences Azur et qui est abordé sur une triple complémentarité de travail : une approche observationnelle de terrain appuyée par des approches d'imagerie géophysique et d'une caractérisation rhéologique. La partie du projet de recherche que j'aborde tente de répondre à des préoccupations scientifiques, liées aux problèmes de la reconnaissance de zones de cisaillement, de l'alimentation en eau des versants instables et pour partie de la quantification du degré d'altération des massifs.

Ces thèmes seront largement développés tout au long de ce mémoire.

### **3.1.4 Animation et participation aux programmes scientifiques**

- 2008 Coordonnateur et demandeur de financement à l'Appel à projet de l'ANR Jeunes Chercheurs ANR MIRACLE,
- 2008 Coordonnateur du programme et demandeur de financement aux programmes INTERREGIII projet ALCOTRA MASSA,
- 2007 Participation à l'ANR MAXWELL (Labo LEAT),
- 2006/2007 : Programme Européen 3HAZ, Coordonnateur du WP5 (aléas gravitaires). Golfe de Corinthe (coordonnateur du programme P. Bernard, IPGP),
- 2004/2005 GIS CURARE : Animateur adjoint de l'axe I (Instabilités Gravitaires Terrestres) du GIS Curare (coordonné par J. Virieux),
- 2004 GDR MARGE: Participation au GDR Marges (Instabilités marines) avec J.Y. Collot et S. Migeon,
- 2004 : participation au projet Passerelle financé par le MEDD (animateur du volet 5 sur les risques gravitaires), (coordonné par F. Courboulex),,
- 2003/2004 : participation au programme Relief INSU, programme dirigé par Didier Bourles, CEREGE),
- 2002/2004 : ACI Prévention des Catastrophes Naturelles, SAMOA : Surveillance et Auscultation de Mouvements Gravitaires Alpains'. Coordination : C. Delacourt, D. Amitrano, O. Maquaire,
- 2001/2002 : Participation au PNRN.

### 3.1.5 Développement d'outils liés aux activités de recherche

Au sein de l'UMR 6526, j'ai développé deux pôles "outils" pour la caractérisation et la reconnaissance des instabilités gravitaires et des facteurs d'instabilités.

2004 : développement d'un pôle étude des matériaux "sols et roches altérés" grâce à l'acquisition d'une presse Triaxiale (Wykeham Farrance).

Depuis 2001 : développement d'une pôle de géophysique électrique (3 résistivimètres Syscal Switch 48 R1+, 96 Pro et 48 pro, et depuis 2002, conception de dispositifs 3D et d'une approche 4D pour une reconnaissance temporelle de l'évolution des résistivités dans les zones instrumentées instables.

### 3.1.6 Collaborations scientifiques

Les collaborations scientifiques que j'ai eu le plaisir d'avoir depuis mon recrutement à Géosciences Azur ont été de deux ordres ; soit des rencontres dans le cadre de programmes et d'actions scientifiques portés par le laboratoire, soit lors de rencontres scientifiques (congrès, symposium). Parmi l'ensemble de ces collaborations, certaines sont terminées, mais d'autres persistent avec de nombreux projets en réflexion et aussi en cours (les collaborations identifiées ci-dessous sont celles qui sont effectives actuellement).

#### En France

- **INERIS**, l'Institut National de l'Environnement industriel et des RISques (INERIS) participe à de nombreuses collaborations avec le laboratoire Géosciences Azur et dans le cadre de nouveaux programmes essentiellement liés à l'instrumentation de sites instables (projet MIRACLE, projet Pra de Julian, GIS CURARE, Projet Corinthe...) avec Arnaud Charmoille, Clémence Dunner, Pascal Bigarre et Christian Franck.
- **L'EDYTEM** (Environnement DYnamiques des TErritoires de Montagne) avec une collaboration depuis 2005 avec Françoise Allignol et Jean Jacques Delanoy, sur les méthodes de cartographie des aléas et du risque en zone urbaine (projet MIRACLE, et thèse en codirection).
- Richard Fabre du **CDGA** maintenant **Ghymac** (Centre de développement des Géosciences Appliquées, Bordeaux I). la collaboration est réalisée dans le cadre de travaux qui ont suivi la thèse au CDGA et continue essentiellement sur les instabilités gravitaires dans la chaîne Pyrénéenne.
- **IPGP** avec Pascal Bernard dans le cadre de programmes de recherches dans le Golfe de Corinthe.

#### Depuis peu

- le laboratoire **GAME-CNRM** (CNRS & Météo-France) dans le cadre d'un projet sur la mesure de l'influence des changements climatiques et de l'évolution des processus d'altération et de facteurs déclenchants...avec Véronique Ducrocq.

- Le Plan Bleu avec Patrice Miran sur la même thématique de l'influence des changements climatiques et le zonage des instabilités gravitaires. Actuellement nous rédigeons un projet transméditerranéen sur ce thème.

#### **A l'International :**

- L'Université de Christchurch en Nouvelle-Zélande, avec une collaboration de recherche sur des méthodologies de tomographie électrique et de prospection de la subsurface par GPR. Collaboration avec David Nobes (PR),
- L'Université de Bari, avec Mario Parise sur les processus d'altération,
- L'Université de Lausanne, avec Michel Jaboyedoff, sur les grands mouvements de versants et sur les héritages géologiques...,
- Le Pérou et l'Equateur : projet PréFalc coordonné par F. Michau et E. Tric (UNS Nice),
- Le Vietnam avec une participation à l'Ecole Do Son sur les risques (2007, avec Guy Vasseur),
- L'Inde depuis peu avec un démarrage de collaboration de recherche sur les mouvements de versants dans l'Himalaya (rapporteur de la thèse de Mondal Suman Kumar, Departement of Earth Sciences India Institut of Technologie Roorkee.)
- Le Cameroun avec une participation à la thèse de Marc Ader et R. Medjo Eko, Université de Yaoundé, Cameroun

#### **Relations et collaborations de recherche avec des partenaires industriels :**

- Cabinet Vincent Risser : développement d'une nouvelle méthodologie de cartographie prédictive des mouvements de terrain. Ce projet a abouti au financement d'une bourse de thèse **CIFRE**,
- La Lyonnaise de Eaux : étude des mouvements de terrain affectant le tracé du Canal du foulon (25km d'aqueduc) et analyse des relations entre la tectonique et la position des accidents gravitaires. Ce projet devrait faire l'objet d'un financement de thèse CIFRE pour la rentrée 2009.

#### **Relations et collaborations de recherche avec des partenaires institutionnels locaux :**

- La Mairie de Vence, étude et analyse depuis 2005 de l'évolution du glissement urbain du Prat de Jullian et mise en place d'un site observatoire. Cette collaboration fait l'objet d'une convention de recherche avec un financement récurrent (jusqu'en 2012),
- Mairie de Grasse, étude et analyse des instabilités gravitaires en domaine urbain et relation entre l'héritage tectonique et la cinématique des grands mouvements de versants (Convention de recherche en cours de signature pour l'instrumentation de 4 sites instables).  
Projet d'un master 2 recherche pour 2008/2009.

Rapporteur et examinateur de thèses et de nombreux mémoires de master 2 recherche et master 2 appliqués (AGI et GEDD du l'UNS)

## 3.2 Présentation des thèmes et objets de recherche

### 3.2.1 Recherches Doctorales

Les recherches que j'ai menées lors de ma thèse, au sein du Centre de Développement des Géosciences Appliquées de l'Université Bordeaux I, s'inscrivaient dans une thématique relativement vaste, car pluridisciplinaire : la géologie appliquée. Le CDGA m'a permis au travers de ses activités de recherche dans le domaine de l'environnement, de la géotechnique et des risques naturels, d'accéder à des techniques d'investigation et de prospection diverses. Les objectifs de la thématique du laboratoire, dans lesquels s'inscrivait mon travail de recherche, étaient l'estimation des risques de glissements de terrain. La part de mon travail dans cette problématique a porté sur la reconnaissance et l'analyse de mouvements de terrain en secteur montagneux. Les problèmes et questions apparentés aux instabilités de versants en secteur montagneux et en particulier aux moraines ont été développés dans mon mémoire de thèse et dans les articles parus. Durant mon travail de recherche, j'ai développé en parallèle cinq approches utilisant plusieurs disciplines, qui m'ont permis d'analyser l'ensemble des d'instabilités de deux secteurs d'étude, avec :

- l'approche géologique, hydrogéologique et géomorphologique, qui permettent de faire le bilan lithologique des différents substratums rencontrés, ainsi que celui des formations de recouvrement, et de définir les grands traits structuraux des secteurs d'étude,
- la caractérisation des paramètres physiques et mécaniques des formations instables d'origine glaciaire. L'étude de la stabilité des formations instables conduit naturellement pour les sols à l'étude de leur texture, taille et forme et de leurs constituants avec une analyse corrélative par l'analyse d'image au sens large et la morphologie mathématique,
- l'analyse de la stabilité est développée, avec des modèles en 2D et en 3D, dans le cadre d'une analyse classique de la stabilité à la rupture et d'une analyse par éléments finis dans le cadre de modèle élasto-plastique..
- l'étude statistique et l'analyse multidimensionnelle des données. Elle a permis de mettre en évidence et de quantifier les corrélations entre des paramètres physiques et mécaniques. Ainsi, nous avons pu mettre en relation le paramètre de forme (indice d'allongement des grains appartenant au squelette de la formation) et l'angle de frottement interne effectif de ces mêmes formations ( $\phi'$ ). Ceci m'a amené à proposer une loi expérimentale ( $\phi' = 185 \cdot I_{NM} - 72$ ) reliant la variable explicative, l'indice d'allongement, à la variable expliquée, l'angle de frottement interne.
- l'approche cartographique des aléas et du risque. Elle a été abordée comme complément indispensable à l'étude du risque de ces deux secteurs d'étude. Sur la base des cartes de pente, des cartes géologiques et des cartes d'instabilité, on a proposé une évaluation de l'aléa. La cartographie détaillée des formations géologiques et la connaissance de leurs propriétés mécaniques ont rendu possible la cartographie des coefficients de sécurité.

### **3.2.2 Recherche post-doctorale (depuis mon recrutement à Géosciences Azur).**

L'activité de recherche que j'ai entreprise depuis mon recrutement à Géosciences Azur porte sur les risques gravitaires. Elle s'articule autour de thèmes principaux, qui seront synthétisés ici en quelques lignes et développés dans ce mémoire. Des articles publiés et/ou en cours de publication seront associés et permettront aux lecteurs de faire une synthèse sur le domaine en question et sur les techniques et concepts qui ont été mis en action pour apporter des réponses aux questions posées. Indépendamment de ces parties, je propose d'expliquer la démarche et l'orientation bipolaire que j'ai développées :

- **Le développement de méthodes de prospection électrique (panneau de résistivité 2D, 3D ainsi qu'en 4D : domaine temporel).**

Les méthodes de tomographie électrique apparaissent depuis quelques années comme étant les mieux adaptées à la recherche des discontinuités géologiques et des limites hydrauliques (drainage par la fracturation, chenalisation interne, ...). L'intérêt est qu'à long terme les données issues de la prospection géo-électrique pourront être directement prises en compte dans les modèles numériques de calculs développés au sein du laboratoire Géosciences Azur (collaboration avec E. Tric, F. Cappa, A. Chemenda, et prochainement R. Hassani). C'est une approche que je tente de développer depuis cinq ans sur quatre sites expérimentaux que sont : le glissement frontal du mouvement de la Clapière (thèse d'H. Jomard, et S. El Bedoui), le glissement sur la commune de Vence (thèse de M. Hernandez et S. El Bedoui), les effondrements de la Ville de Grasse (thèse de R. Llop) et les glissements de la ville de Menton (thèse de M. Hernandez). Notre approche est basée :

- Sur le suivi temporel de panneaux de résistivités avec ou sans apport de fluide.
- L'imagerie de structures gravitaires et de la prédisposition des massifs à la rupture au regard de la géologie locale et régionale (thèse d'H. Jomard, 2003/2006), ainsi que de l'héritage géologique et géomorphologique dans la structuration et la position géographique des mouvements gravitaires (Thèses M. Hernandez et S. El Bedoui, 2005).

- **L'étude des matériaux granulaires hétérogènes**

Il est acquis maintenant que la majorité des glissements de terrain sont associés à une variabilité mécanique de la roche, se traduisant par de l'altération et de la fracturation. Seules des études fondamentales sur les propriétés mécaniques de la matrice rocheuse saine et de la partie « granulaire » du matériau altéré permettent d'appréhender les mécanismes d'initiation et de déclenchement des instabilités. Ainsi l'analyse de l'état d'altération des joints rocheux, comme on peut l'observer dans des glissements rocheux (Clapière), conduit à se poser la question de la participation de ce matériel altéré (gneiss et micaschiste) dans la résistance au cisaillement à plus grande profondeur au niveau de la zone de rupture. L'étude rhéologique du matériau constituant les joints rocheux gneissiques, très altéré et principalement granulaire constitue une part de mes activités depuis 2004 (thèse de M. Hernandez et de nombreux masters 1 et 2). En effet, ce matériau

granulaire correspond aux matériaux issus des joints et des réseaux de failles altérées, qui conditionnent la résistance au frottement de la masse instable. En extrapolant ces observations de terrain, on peut penser que la zone de rupture plus profonde, non visible à l’affleurement, est aussi elle-même constituée d’un matériau broyé et présentant une composante « granulaire ». Afin de comprendre les liens qui existent entre la rhéologie à l’échelle d’un versant plurikilométrique, les discontinuités tectoniques et gravitaires et les phénomènes d’altérations, j’ai entrepris une analyse multidimensionnelle de l’ensemble de variables caractérisants les matériaux et participant aux phénomènes rupturés. Le secteur « expérimental » choisi est principalement la haute vallée de la Tinée.

### **3.3 Enseignement, Encadrement, Collaboration et Représentation Scientifique.**

#### **3.3.1 Activités d’enseignement de 2001 à 2008 :**

La plupart des enseignements dispensés à l’Université de Nice Sophia Antipolis sont organisés en séances de trois ou quatre heures comprenant généralement une première partie de cours magistral, d’environ une heure, suivie de travaux dirigés ou par demi-groupe de travaux pratiques. Je tente par les enseignements que je dispense d’apporter aux étudiants une approche couplée de terrain et de notions fondamentales et ceci, quel que soit le domaine enseigné (pétrographie, géotechnique et les risques naturels). En effet, je participe aux enseignements dans tous les niveaux du L1 au master 2 (et même lors de formations doctorales) qui abordent les domaines de la pétrographie exogène, de la paléontologie, de la géologie de terrain, de la pédologie, de la géotechnique et des risques géologiques.

Depuis 2005 je suis coordonnateur de la Licence 1 ST, ce qui me permet d’avoir une vision d’ensemble des premiers enseignements que recevront les jeunes bacheliers afin de les aider et de les guider sur la voie la plus adaptée.

En 2003, j’ai participé à la mise en place d’un projet pédagogique sur la **création d’un laboratoire de mesure de paramètres géotechniques** (essais triaxiaux, granulométrie, limites d’Atterberg, essais oedométriques, ...) pour les enseignements de licence et master (enseignement peu, voire pas dispensé dans notre université alors qu’il est très largement demandé par les recruteurs de nos étudiants).

- **Cours de Niveau Licence.**

- **Cours de paléontologie et de paléoenvironnement terrestre** : Il s’agit d’un enseignement basé sur les principes de la paléontologie moderne, avec analyse macroscopique de fossiles et anatomie comparée.
- **Pétrographie exogène** : cours, TD et TP sur les principales roches exogènes (avec sorties de terrain pour faire découvrir les roches autrement qu’en salle...).

- **Cours de niveaux Master 1 et 2**



- **Eléments de Géotechnique** : Cours du master AGI du département *Sciences de la Terre et Environnement* : L'objectif est de donner les outils de base de la géotechnique (mécanique des roches et des sols), les techniques de calcul pour le dimensionnement des ouvrages les plus courants en génie civil (plus des sorties de terrain).
  - **Risques Naturels** : Cours, TD et TP sur l'analyse, la reconnaissance des risques géologiques. En master il s'agit plus particulièrement de la cartographie des risques et aléas gravitaires (normes, recommandations,...), et en licence (3) des fondamentaux sur les processus ruptuels dans tout les environnements (avec sorties de terrain).
  - **Pédologie** : cours, TD et TP sur l'ensemble des processus de pédogénèse. Passage de la roche aux sols. Relations et propriétés des argiles (avec sorties de terrain).
- **Cours de formation Doctorale : Organisation des écoles thématiques pour les doctorants**
    - **Ecole thématique doctorale** « instabilités gravitaires des milieux hétérogènes » du 6 au 9 juin 2004 (organisateur Th Lebourg et Y. Guglielmi): cours en salle, TD et visites sur le terrain (glissements de Vence, Clapière, Valabre).
    - **Ecole thématique doctorale** « approche géophysique des circulations d'eau dans les zones instables et déformations en champ proche » du 4 au 6 juin 2003 (organisateur Th Lebourg et Y. Guglielmi): cours en salle, TD et visite du site de la Clapière.
    - **Ecole thématique doctorale** (Janvier 2002, organisateurs Th Lebourg et Y. Guglielmi) : Approche géomécanique déterministe et statistique couplée du comportement mécanique, hydromécanique et hydrogéochimique des mouvements de versants rocheux fracturés de grande ampleur (participation des étudiants à la synthèse du PNRN coordonnée par Y. Guglielmi).

### 3.3.2 Encadrement d'étudiants

- **Encadrement de thèse**

#### **Rozenn Llop :**

2010/2007 : co-direction de **thèse** (80%), Elaboration d'une Méthodologie de gestion intégrée et d'évaluation de l'évolution temporelle des risques de mouvements de terrain en zone urbaine (commune de Grasse ; Alpes maritimes - France), en codirection avec J.J Delannoy, laboratoire EDYTEM.

#### **El Bedoui Samyr :**

- 2008/2005 : co-direction de **thèse** (90%), Ruptures progressives dans les versants rocheux : aspects temporels, tectoniques et mécaniques. Applications aux sites observatoires de la Haute Tinée (France) et Golfe de Corinthe (Grèce),

- 2005/2004 : **master recherche** (70%), Analyse multi-variables des facteurs préparatoires et de déclenchement des instabilités à l'échelle d'une vallée montagneuse,
- actuellement : recruté ingénieur LCPC octobre 2008.

***Hernandez, Micheal :***

- 2008/2005 : co-direction de **thèse** (90%), sur un financement bourse CIFRE. Développement d'une méthodologie et d'outils pour la cartographie spatialisée, probabiliste des aléas gravitaires.
- 2005/2004 : **master recherche** (100%), Etude du comportement des produits de l'altération des zones de cisaillement sur de grands glissements de terrain
- actuellement : recruté au bureau d'étude RISSER novembre 2008.

***Hervé Jomard :***

- 2003/2006 : co-direction de **thèse** (80%), Recensement, auscultation et suivi de mouvements de terrain dans la Vallée de la Tinée (Alpes Maritimes).
- 2002/2003 : *Hervé Jomard*, **DEA**, direction : Etude du site instable du Vallon du Réal (06).
- actuellement recruté à l'IRSN (octobre 2008)

- ***Participation à des thèses***

***Marc Ader :***

2007/2010 : Co-direction de **thèse** (40%) : mitigation des risques de glissements de terrain dans les caldeiras des monts Bambouto (sud ouest Cameroun). Co-direction avec R. Medjo Eko, Université de Yaoundé, Cameroun)

***Cathy Johanne***

2004 : participation à la première année de **thèse** (40%) : Le système d'avalanches sous-marines de Matakaoa, Nouvelle-Zélande : structure, facteurs d'instabilité et modalité de mise en place.

- ***Master recherche n'ayant pas poursuivi en thèse avec moi***

***Bruno Martins-Campina :***

2000/2001 : **DEA** MSOE de l'Ecole Centrale Paris pour son stage de DEA portant sur : l'étude du glissement de terrain des Eaux-Bonnes et développement d'un modèle de stabilité en éléments finis. (actuellement : Ingénieur Géologue)

***Sebastien Garziglia.***

2005/2004 : **Master recherche** (30%), Instabilités gravitaires sous-marines : approches géologique, géotechnique et numérique. Exemple du delta profond du Nil (Méditerranée orientale), (actuellement : en thèse)

Depuis 2001, une trentaine d'étudiants de master 1, et licence 2 et 3



# 2<sup>ème</sup> Partie

## **Rôles des héritages géologiques dans les processus d'instabilités gravitaires**

## **4 RÔLES DES HÉRITAGES GÉOLOGIQUES DANS LES PROCESSUS D'INSTABILITÉS GRAVITAIRES**

### **4.1 Introduction**

Comme cela a été évoqué dans l'introduction de ce mémoire, ma recherche sur les risques gravitaires s'articule autour de quatre thèmes principaux, qui seront synthétisés en quelques pages et associés à des articles publiés et/ou en cours de publication. Chaque chapitre permettra, (1) de faire une synthèse sur le domaine en question, (2) de montrer les techniques et concepts qui ont été mis en action pour répondre à une partie des questions scientifiques afin de proposer des pistes de recherche dans chacun de ces domaines.

Le premier chapitre portera sur l'identification des limites morphologiques des grands mouvements de versants et la mise en évidence du rôle important de l'héritage tectonique et/ou sédimentaire dans les guides des plans de rupture. Ce travail est le fruit de la recherche initiée au laboratoire Géosciences Azur et de la Thèse d'Hervé Jomard (2003-2006) et qui est actuellement poursuivie en partie dans la thèse de Samyr El Bedoui (2005-2008).

Le deuxième chapitre traitera essentiellement du rôle des processus d'altération dans la modification des propriétés mécaniques au niveau des surfaces de rupture. Ce travail est le fruit de la recherche commencée aussi avec Hervé Jomard (2005-2008) dans sa thèse, mais largement développé dans la thèse de Mickael Hernandez (2005-2008).

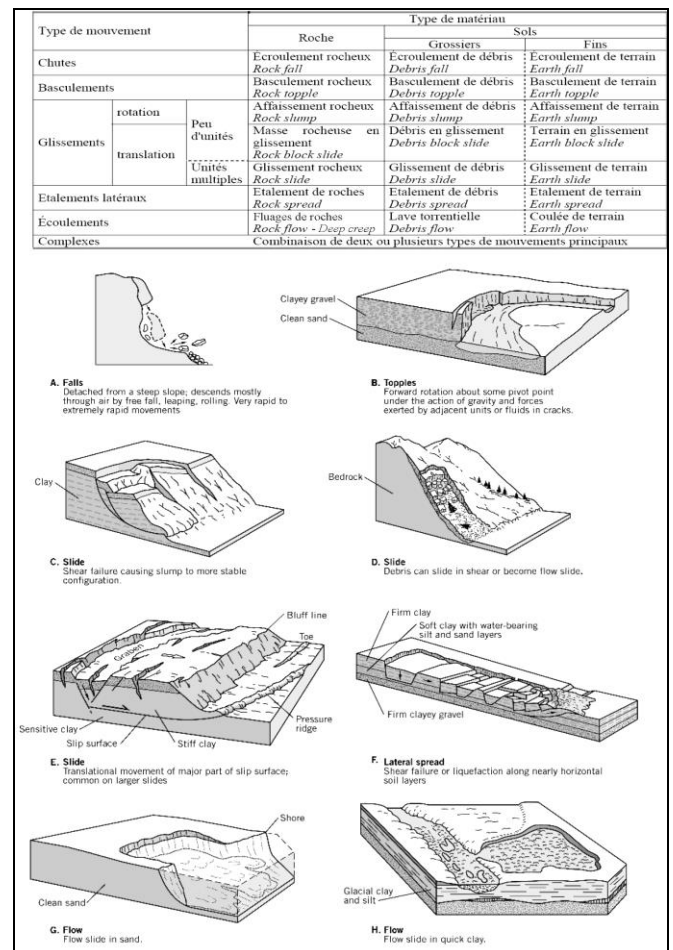
Le troisième chapitre portera sur le développement d'une approche expérimentale d'imagerie par tomographie électrique, en 2D, 3D et avec une composante 4D relative au suivi temporel de l'évolution des résistivités. Ce travail est aussi le fruit de la recherche réalisée dans le cadre de trois des quatre thèses que j'ai co-encadrées : Hervé Jomard (2005-2008), Mickael Hernandez (2005-2008) et Samyr El Bedoui (2005-2008).

Le quatrième chapitre sera consacré aux perspectives de recherche et aux risques, au sens aléa versus vulnérabilité avec l'intégration des différentes approches précédemment évoquées. Cette approche se fera aussi au regard des influences liées aux processus d'anthropisation et de changements climatiques. A ce travail sont associées les recherches de R.Llop (2007-2010) qui est en deuxième année de thèse et co-encadré par l'EDYTEM de Chambéry

#### **4.1.1 Les mouvements de terrain : Histoire d'un héritage**

Depuis plus d'un siècle les scientifiques ont tenté, par divers moyens, de comprendre les mécanismes et les processus qui génèrent les glissements de terrain et, plus largement, les mouvements de terrain. Ces processus initialement naturels sont devenus au fil du dernier siècle de plus en plus liés aux activités anthropiques. On observe, parmi les processus d'érosion les plus intenses, que les glissements de terrain marquent profondément les affleurements et laissent des traces et empreintes visibles pendant plusieurs milliers d'années après leur déclenchement.

Mon travail de thèse portait essentiellement sur les mouvements gravitaires dans les formations morainiques (de petite et moyenne taille). L'étude des différentes formes de relief engendrées par l'action érosive des glaciers (Menziès, 1996) a permis de montrer le rôle majeur que peut jouer la géomorphologie du substratum dans l'existence de surfaces de rupture préférentielles. L'analyse de ce cryptorelief a permis d'expliquer certaines particularités de la dynamique érosive des glaciers et de qualifier un des facteurs intervenant dans les processus d'instabilité des moraines. Petit à petit, la dimension temporelle a pris un poids significatif et mes recherches se sont orientées de plus en plus vers la compréhension de la phase préparatoire, qui s'échelonne depuis la fabrication de roche jusqu'à sa rupture en passant par les différents processus d'évolution (l'altération essentiellement).

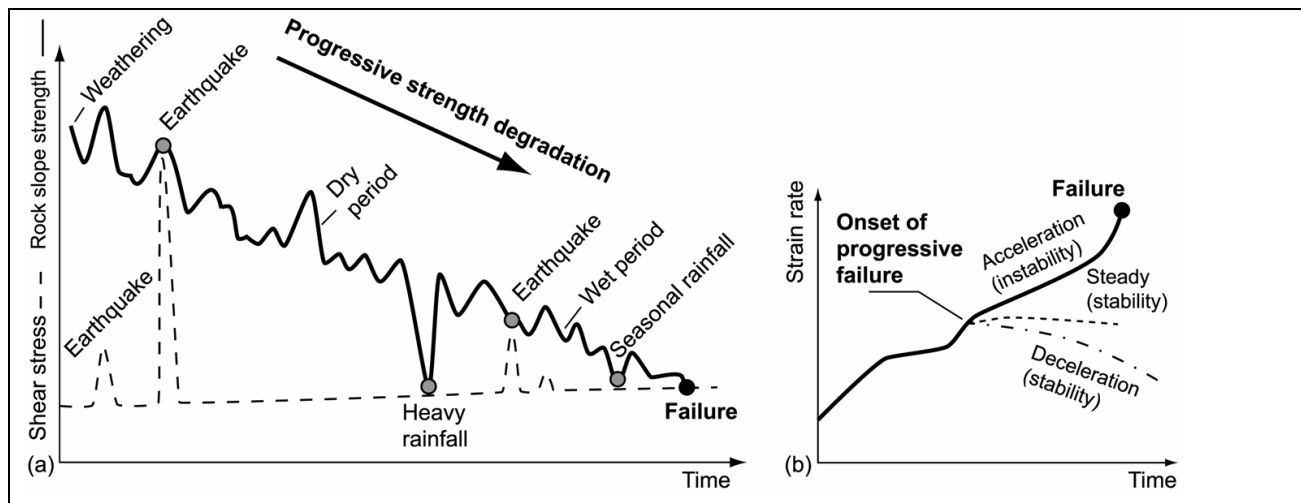


**Figure 1: Classification de Varnes (dans Pollet, 2004) et représentation schématique d'une partie des principales formes de mouvements gravitaires (Varnes, 1978)**

La compréhension et l'analyse des mouvements de terrain sous-entend à court terme la prévention de ces derniers (Favre et al., 1992, Robin, 1993, Mayoraz et al., 1997, Reizig, 1998), ainsi que l'analyse des causes et facteurs qui les conditionnent. En effet, on désigne sous le terme de mouvements de terrain toute manifestation de déplacement d'une masse géologique sous l'effet de la pesanteur et de l'action conjuguée de facteurs permanents et de facteurs déclenchants (Maltrait, 1975, Bonnard, 1984, Azimi et Desvarreux, 1986, 1996, Bromhead, 1992, Slosson, 1992, Antoine, 1992, Bhandari et Jeyatharan, 1994.). Le problème lié à l'analyse de ces facteurs est principalement d'ordre temporel, car l'observation que l'on en fait est ponctuelle, et à moins de se situer au moment précis du déclenchement de ce dernier, il est difficile d'appréhender les composantes (masses, volumes, vitesses, facteurs d'instabilité,...) qui guident le mouvement.

L'état de l'art actuel permet de comprendre les potentialités de rupture d'un versant (Figure 1). Il reste toutefois limité au cas d'étude si le mouvement n'est pas instrumenté. Pour améliorer cette connaissance, il est primordial d'accéder aux mécanismes physiques qui contrôlent le déclenchement d'une instabilité gravitaire. Les mécanismes déclencheurs et préparatoires sont donc très complexes, interactifs et fort nombreux, comme : l'eau, la thermoclasticité, les sollicitations

sismiques, les champs de contraintes tectoniques, l'érosion, mais aussi les évolutions climatiques passées (dernier paroxysme glaciaire induisant un réajustement et une décompression des versants) et les projections climatiques futures (induisant des changements dans les sollicitations des facteurs déclencheurs au niveau des seuils admissibles par un massif). Devant une telle complexité de variables, il devient donc indispensable d'accéder à une instrumentation et à une observation des massifs géologiques stables et instables et de quantifier dans le temps leurs différentes sollicitations.



**Figure 2: évolution conceptuelle de la rupture.**

*Légende de la Figure 2 : (a) évolution conceptuelle de la résistance mécanique d'un versant au cours de la rupture progressive (d'après Finlayson et Staham, 1980). (b) Courbes d'évolution du taux de déformation en fonction du temps pour un versant soumis à la rupture progressive (Hajiabdolmajid and Kaise, 2002).*

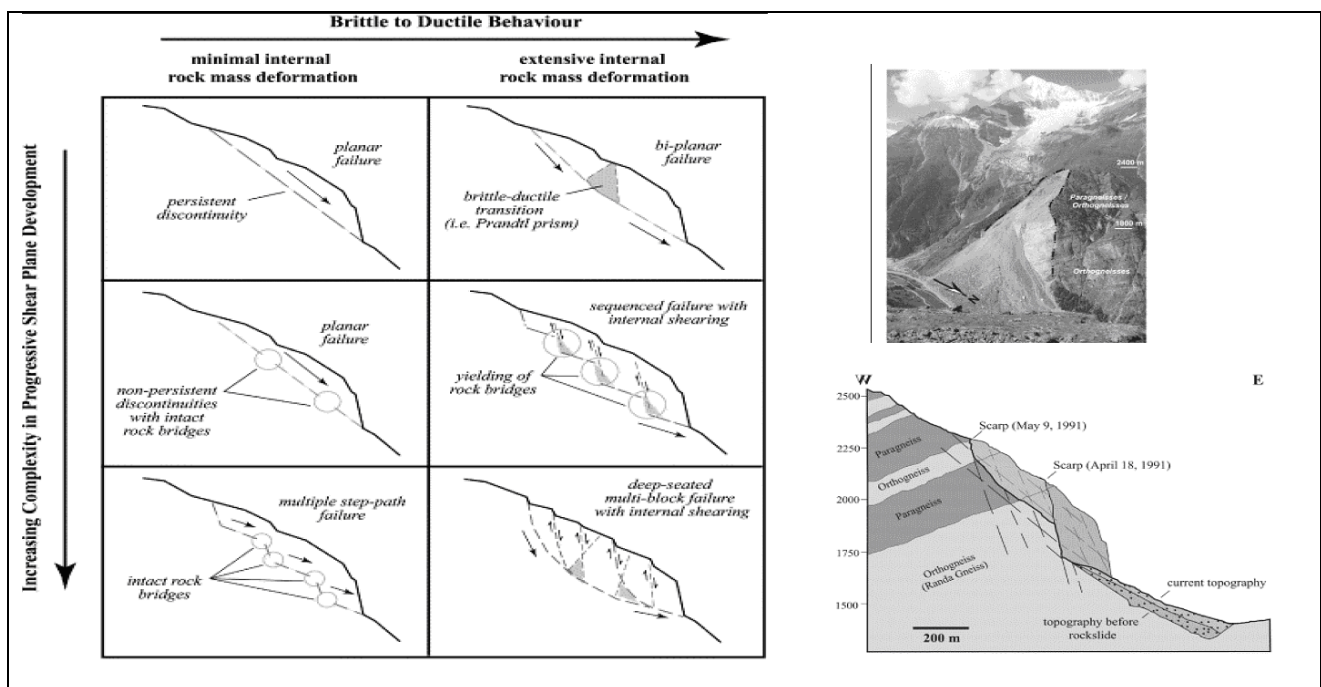
L'identification des signaux prérupturels, et la quantification des mécanismes déclencheurs sont devenues les étapes essentielles pour la compréhension à court et moyen terme des seuils critiques (Figure 2). Le processus de rupture diminue la résistance mécanique du versant et lors de cet endommagement un nombre conséquent (en termes de types et d'intensités) de sollicitations externes (climatiques et tectoniques) de moins en moins intenses favorisent cependant l'accélération et la déstabilisation d'un massif (Figure 2). Celle-ci se produit en plusieurs étapes qui ne sont pas linéairement dépendantes (Finlayson and Staham (1980). La connaissance de cette cinématique est presque impossible à estimer sur les grands mouvements de versants ( DSL, DSGSD), sauf lorsqu'on peut dater les marqueurs rupturels et temporels de ces déformations (Bigot et al., 2005, El Bedoui et al., 2008). Sans aller jusqu'à la définition de seuils d'alerte parfaitement fiables, nous pensons qu'il existe des potentialités d'alerte fondées sur des observations et mesures multi-paramètres, multi-échelles. Il est devenu plus important de se situer dans un espace précurseur aux mouvements, plutôt que de se situer dans un espace où le mouvement est déjà consommé. Néanmoins, 98% des sites qui sont actuellement instrumentés, le sont, car ils présentent déjà des signes morphologiques d'instabilité, donc où la masse géologique a déjà commencé à se rompre.

Comme cela a été évoqué en introduction, la création ou l'apparition d'un mouvement gravitaire est la réponse morphologique d'un processus physique et mécanique complexe. Le mouvement paroxysmal se traduit par une consommation d'énergie (Heim, 1932) qui résulte de l'action dans le temps de facteurs de préparation. Là encore le phénomène est très complexe et il faudrait plutôt se situer dans un schéma de rupture progressive des versants et discrétiser chacune de ces phases. Lorsque, le maximum d'énergie est « consommé », le mouvement s'initie à la faveur et suite aux actions de facteurs déclenchants et non pas de facteurs préparateurs ou de prédispositions. En effet, c'est tout au long de l'étape de préparation, que les facteurs de prédisposition conditionnent la morphologie des mouvements, leurs cinématiques et leurs récurrences temporelles (séismes par exemple dans Figure 2).

Les facteurs de prédisposition sont généralement :

- issus de la structure même du massif rocheux (Jomard, 2006),
- du contexte dynamique régional ou local,
- de l'histoire géologique à long terme d'un versant,

Ce sont donc essentiellement des paramètres de structure, parmi lesquels, on retrouve la lithologie (dont l'orientation par rapport à la pente peut conduire à du glissement banc sur banc), la fabrique de la roche (source de discontinuités mécaniques) et la discontinuité géologique (fracture, joint, faille, diaclase...).



**Figure 3: mécanismes de rupture au sein des versants rocheux en fonction de la configuration des discontinuités géologiques prédécoupant le massif (Eberhardt et al, 2004).**

C'est plus particulièrement cette dernière qui apparaît comme ayant le rôle le plus important, ou du moins le premier rôle dans la destruction gravitaire des massifs. On caractérise ainsi les discontinuités géologiques par leurs densités, agencements, orientations, rugosités, propriétés



mécaniques et par leur capacité dans le massif à guider les mouvements de masse. Que l'on se place à grande ou à petite échelle on constate facilement que la prédisposition d'un versant à la rupture consiste en l'individualisation d'une masse rocheuse associée à un certain nombre de familles de discontinuités (Figure 3, Eberhardt et al, 2004). L'anisotropie d'un massif conditionne donc la stabilité du versant rocheux et l'association de ces familles de discontinuités détermine le mode de rupture (Figure 3, Pollet, 2004).

- Ceci est valable et observable en surface, mais que se passe-t-il en profondeur ?
- Jusqu'où cet héritage géologique et tectonique va-t-il avoir une incidence ?

Les nombreux travaux sur les mécanismes de rupture, depuis Therzaghi (1962), jusqu'à Petley et al, 2005, Bachmann et al., 2004, 2006 montrent que le prédécoupage des massifs géologiques est indissociable des processus de rupture. Mais au-delà de ce constat évident, il est intéressant de regarder les guides et vecteurs de mouvement des masses en devenir de rupture. C'est plus particulièrement cet héritage structural que nous avons tenté d'observer, de comprendre et d'associer à la localisation spatiale des grands mouvements de versant.

## **4.2 Héritage tectonique et identification des limites morphologiques des mouvements de versant à grande échelle :**

L'analyse géomorphologique de la phase préparatoire des mouvements de versant, qui s'échelonne depuis la fabrication de roche jusqu'à sa rupture, permet de poser (difficilement) les problèmes liés à l'échelle d'analyse et à l'échelle de temps utilisés. En effet, l'ensemble des grands mouvements étudiés au travers de nos premiers travaux à Géosciences Azur et durant le master recherche et la thèse d'Hervé Jomard, sont apparus petit à petit comme étant un emboîtement d'une série complexe de mouvements hérités depuis le dernier paroxysme glaciaire et dont les signes morphologiques s'observent actuellement dans le paysage, mais où de nombreuses interrogations subsistent quant à leur enracinement en profondeur.

### **4.2.1 Morphologie de mouvements de versant à grande échelle**

Nous nous sommes plus particulièrement intéressés lors de la thèse d'Hervé Jomard aux relations qui existaient entre la structuration du substratum, son héritage tectonique et la position des grands mouvements de versant dans les massifs géologiques. En effet, très rapidement, nous sommes passés de l'étude d'un des plus grands mouvements de terrain actifs d'Europe (Figure 4, La Clapière), à l'étude de l'ensemble de la région et de la prise en compte des masses réellement mises en jeu par les phénomènes gravitaires. Ce travail nous a donc amené non plus à considérer le glissement de la Clapière comme un glissement, mais comme le fruit visible d'une longue et lente maturation d'un massif géologique.

Nous avons défini, essentiellement grâce à une reconnaissance morphologique, deux types de déformations :

- Des déformations liées à la gravité, car délimitées par une surface de rupture reconnue et caractérisée par un volume de roches glissant sur une surface (Deep-Seated Landslide, DSL),
- des déformations plus diffuses affectant de très grands volumes rocheux et qui montrent des structures extensives qui correspondent à de larges zones d'effondrement de versants (Deep-Seated Gravitational Slope Deformations, DGSD).



**Figure 4 : Glissement de la Clapière.**

C'est à partir de cette analyse que nous avons ainsi reconsidéré le mouvement de la Clapière comme étant la partie émergée d'un objet gravitaire beaucoup plus important.

Ces deux morphologies gravitaires déjà décrites par Dramis et Sorriso-Valvo (1994) et Agliardi et Crosta, (2001) ont été prises comme base d'analyse des recherches d'identification. Dans le cadre de nos premiers travaux, nous avons ainsi reconnu une dizaine de DGSD et presque une centaine de DSL dans les 3 principales vallées étudiées (Haut Var, Tinée et Vésubie dans les Alpes Françaises).

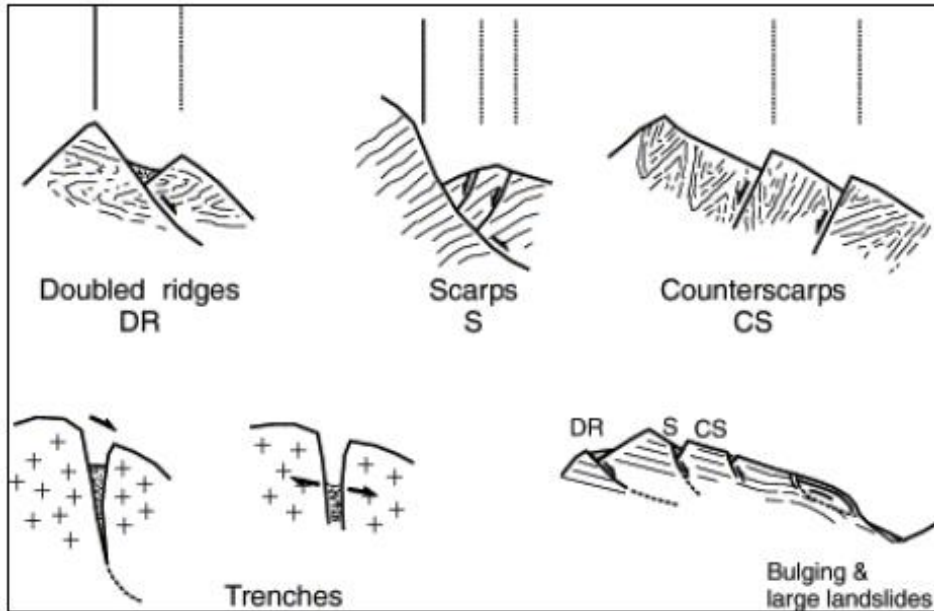


Figure 5: principales morpho structures associées au DGSD (Agliardi et al, 2001).

#### 4.2.2 Quelles sont les relations qui existent entre les Deep-Seated Gravitational Slope Deformations, les Deep Seated Landslide, canevras structural et topographie ?

L'analyse qui a été effectuée lors de la thèse d'Hervé Jomard, nous a permis de comparer les cartes structurales à l'échelle régionale et la localisation des DGSD et DSL.

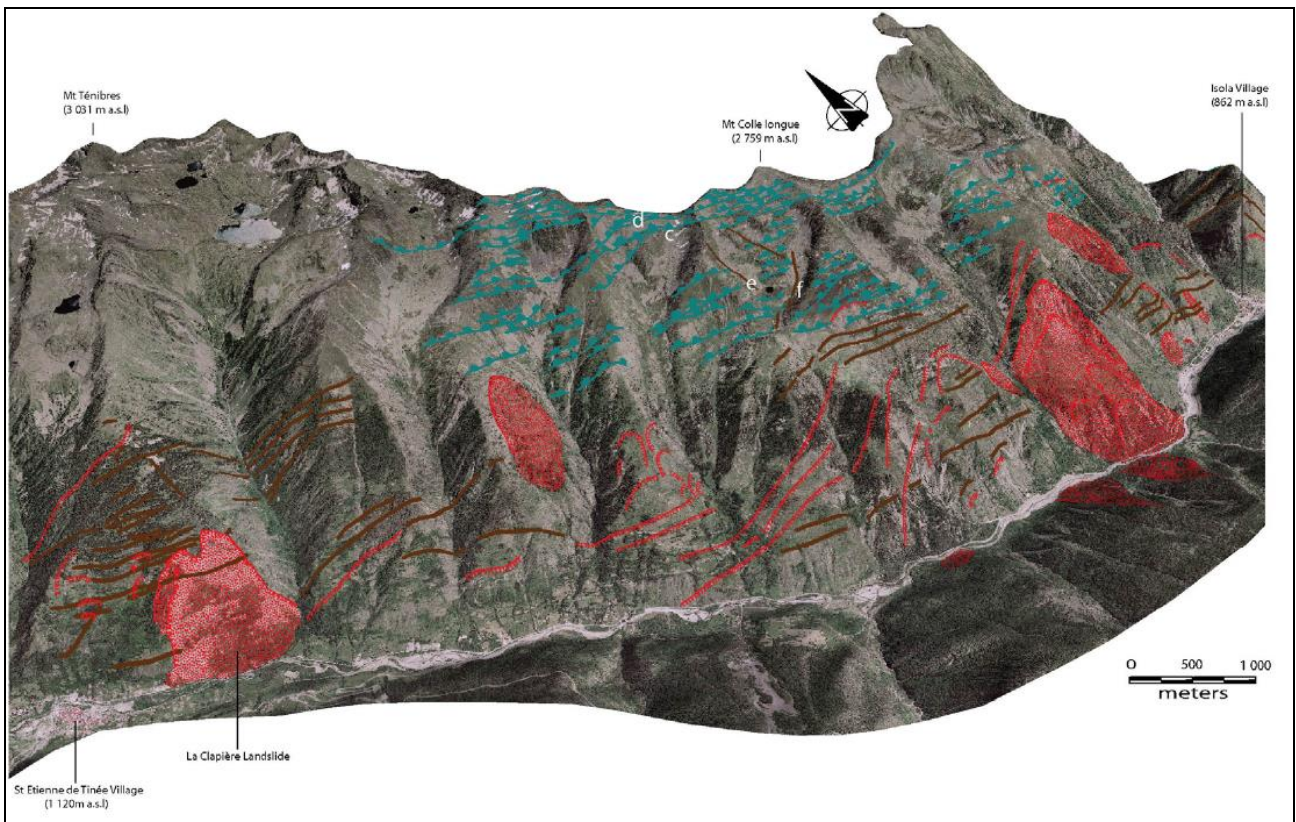
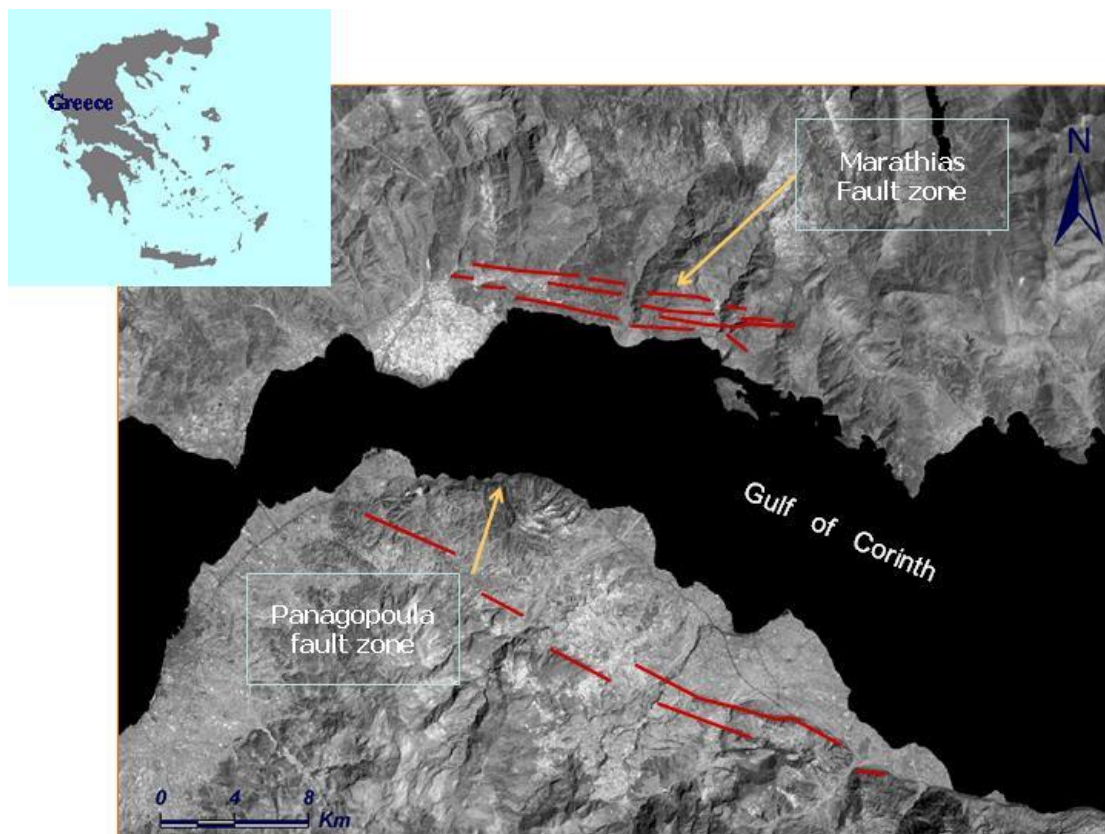


Figure 6 : Le DGSD de Colle-Longue.

Légende : Cartographie des perturbations morphologiques de la bordure du massif de l'Argentera reportées sur un modèle 3D, (Jomard, 2006) : Contrepentes (bleu), crevasses (marron), escarpements (rouge) et DSL (rouge).

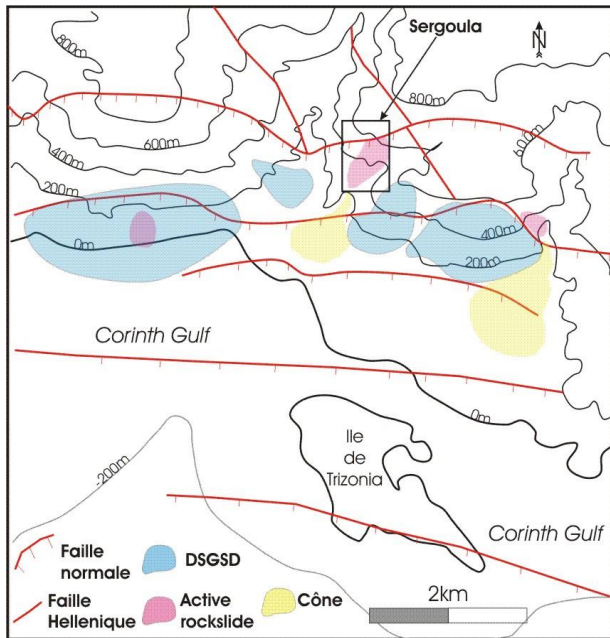
Nous avons constaté dans la vallée du Haut Var, qu'il existait une certaine orientation des structures morphologiques gravitaire avec le canevas de fracturation, mais c'est plus particulièrement dans les vallées de la Tinée et de la Vésubie que ces morphostructures (Figure 5) ont montré une orientation très fortement guidée par le canevas tectonique. Lorsqu'on regarde dans le détail ces morphostructures, on arrive aisément à en extraire les différentes familles de fractures qui sont associées aux DSL et aux DGSD. Il apparaît clairement que l'expression de ces morphostructures est beaucoup plus marquée dans le socle métamorphique que dans le socle sédimentaire. Nous avons aussi observé que la densité des morphostructures est une fonction de la relation angulaire existant entre l'orientation de la pente et la direction des failles. Plus l'angle est proche de 0, plus le nombre de morphostructures est important.

On en conclut donc que ces indices morphologiques récents observés dans le massif de l'Argentera-Mercantour sont l'expression d'une fracturation cassante. Que ce soit pour les DGSD ou pour les DSL qu'ils englobent, l'orientation et la localisation des morphostructures sont fortement dépendantes de celle des failles cartographiées. C'est avec cette nouvelle approche que nous avons abordé nos autres études dans le Golfe de Corinthe, Figure 8, dans l'arrière-pays des Alpes Maritimes et dans les Pyrénées.

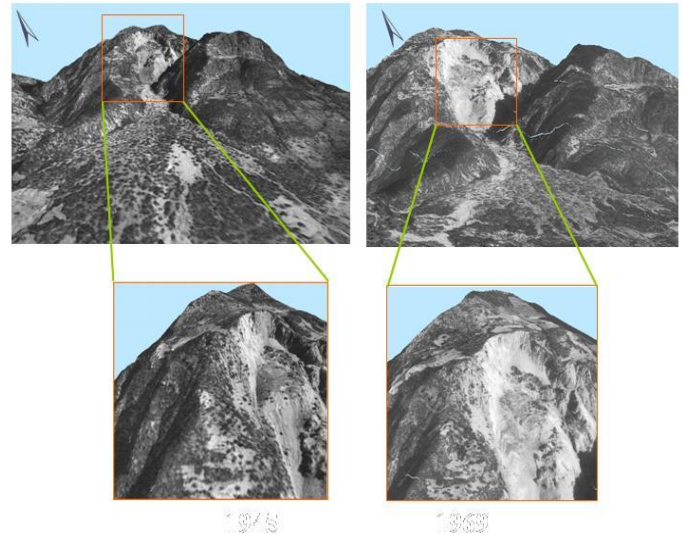


**Figure 7 : localisation des deux zones d'étude dans le Golfe de Corinthe (Panagopoula et Sergoula Landslides).**





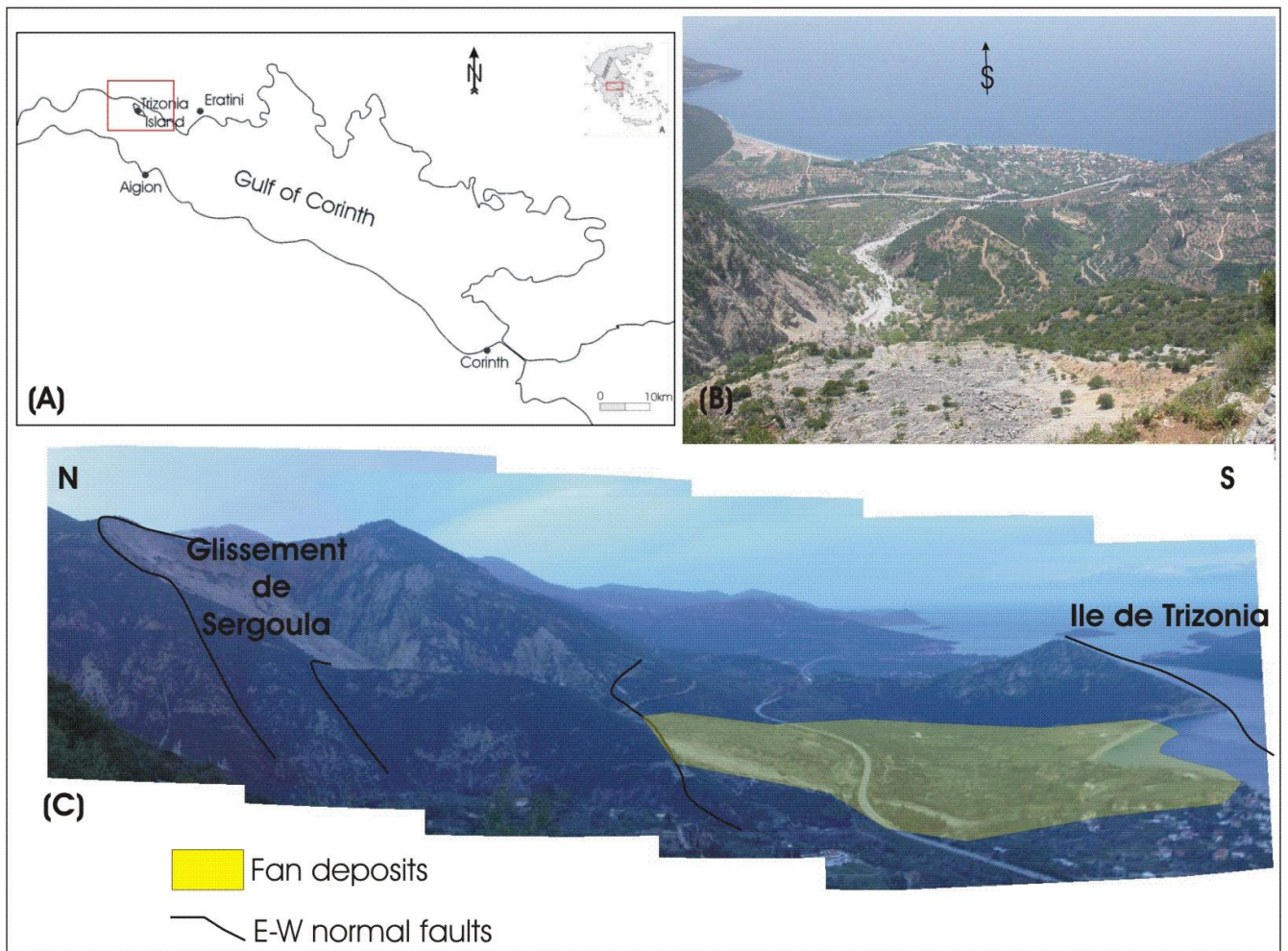
**Figure 8 : carte des principales structures tectoniques**



*Légende de la Figure 8 : et des indices géomorphologiques de mouvements gravitaires dans le golfe de Corinthe et au niveau du glissement de Sergoula, El Bedoui, 2008 et photographie du glissement en 1945 et 1969, Gallousi et Koukouvela, 2007)*

Dans le Golfe de Corinthe, nous avons ainsi pu identifier 4 DGS et 3 DSL. Ces mouvements de versant de grande ampleur montrent qu'ils sont limités et bornés par des failles normales, correspondant aux linéaments tectoniques régionaux. Nous nous sommes intéressés plus particulièrement au mouvement de Sergoula (Gallousi et Koukouvela, 2007). Ce dernier est caractérisé par une cinématique d'évolution rapide avec de nombreux dépôts clastiques gravitaires observés en pied de mouvement et par une incision importante (Figure 8, El Bedoui et al, 2008). Grâce à l'analyse du contexte géologique, structural et surtout géodynamique, nous avons montré le rôle essentiel du découpage structural (Figure 8) et la sollicitation sismique en tant que facteurs déclenchants. Cette analyse a été validée lors des campagnes de tomographie électrique qui ont permis d'identifier en profondeur les failles gravitaires et les quantités de mouvement.

Nous sommes maintenant confronté à d'autres problèmes, qui sont de faire la distinction entre les simples failles tectoniques qui ne participent pas directement aux actions des mouvements de versant et celles qui sont porteuses des stigmates et traces de ces mouvements gravitaires. L'autre problème que nous rencontrons afin de valider l'hypothèse de la participation de l'héritage tectonique aux mouvements de terrain est lié à la morphologie à la géométrie, mais surtout à l'extension en profondeur de ces accidents. Il existe en effet très peu d'informations sur l'épaisseur ou les épaisseurs de la zone en mouvement. Fort peu de mouvements de grande ampleur ont pu être forés à travers le monde et c'est au travers de l'acquisition indirecte (géophysique) que nous pourrions avoir ces types d'informations (voir § 4.4.1).



**Figure 9 : photography's of Sergoula area.**

*Légende de la Figure 9 : (a) Localisation de la zone étudiée; (b) vue depuis le sommet du glissement de Sergoula montrant l'importance des dépôts deltaïques en pied; (c) panorama N-S du site de Sergoula (les failles majeures E-W en noir sont représentées).*

#### 4.2.3 Quelle est la géométrie des déformations en profondeur ?

La géométrie en profondeur des DGSD et des DSL est un sujet fort complexe, car il est très rare d'avoir un accès direct à l'information et la mise en oeuvre de méthodes indirectes, géophysique principalement, est soumise à de très nombreuses contraintes. En effet, bien que nous n'ayons pas pu observer physiquement la géométrie profonde de ces structures, les informations que nous avons acquises (voir développement au  $\xi$  4.4.1) nous permettent d'élaborer des hypothèses fortes d'extension de ces morphostructures en profondeur, au-delà même des reliefs à l'affleurement.

Ces deux approches sont discutées dans les travaux d'H. Jomard qui s'appuie essentiellement sur deux types de modèles qui correspondent à nos observations :

- Les modèles géométriques introduits par Beck (1968), Hutchinson (1983) et modélisés physiquement par Stéphane Bouissou au travers de la thèse de D.Bachmann (2003-2006). Ils présentent des déplacements sur des plans de rupture s'enracinant profondément dans les

versants et liés à une surface de cisaillement continue et d'origine gravitaire dont l'échelle est celle du massif affecté.

- Les modèles géométriques utilisant des discontinuités pré-existantes (Bovis, 1982), ou liées à des failles ou de la fracturation héritée (Hyppolyte et al., 2006) et supposant des déformations d'origine tectonique et aussi modélisés physiquement par Stéphane Bouissou et T. Bois (2006-2009).

C'est principalement le deuxième type de modèle qui correspond le mieux à toutes les observations que nous avons réalisées. Actuellement, les structures gravitaires guidées par des discontinuités héritées et localisant la déformation sont étudiées essentiellement au travers des travaux de modélisation analogique (travaux de Stéphane Bouissou, Géosciences Azur) et de modélisations numériques (travaux d'Emmanuel Tric, Géosciences Azur)

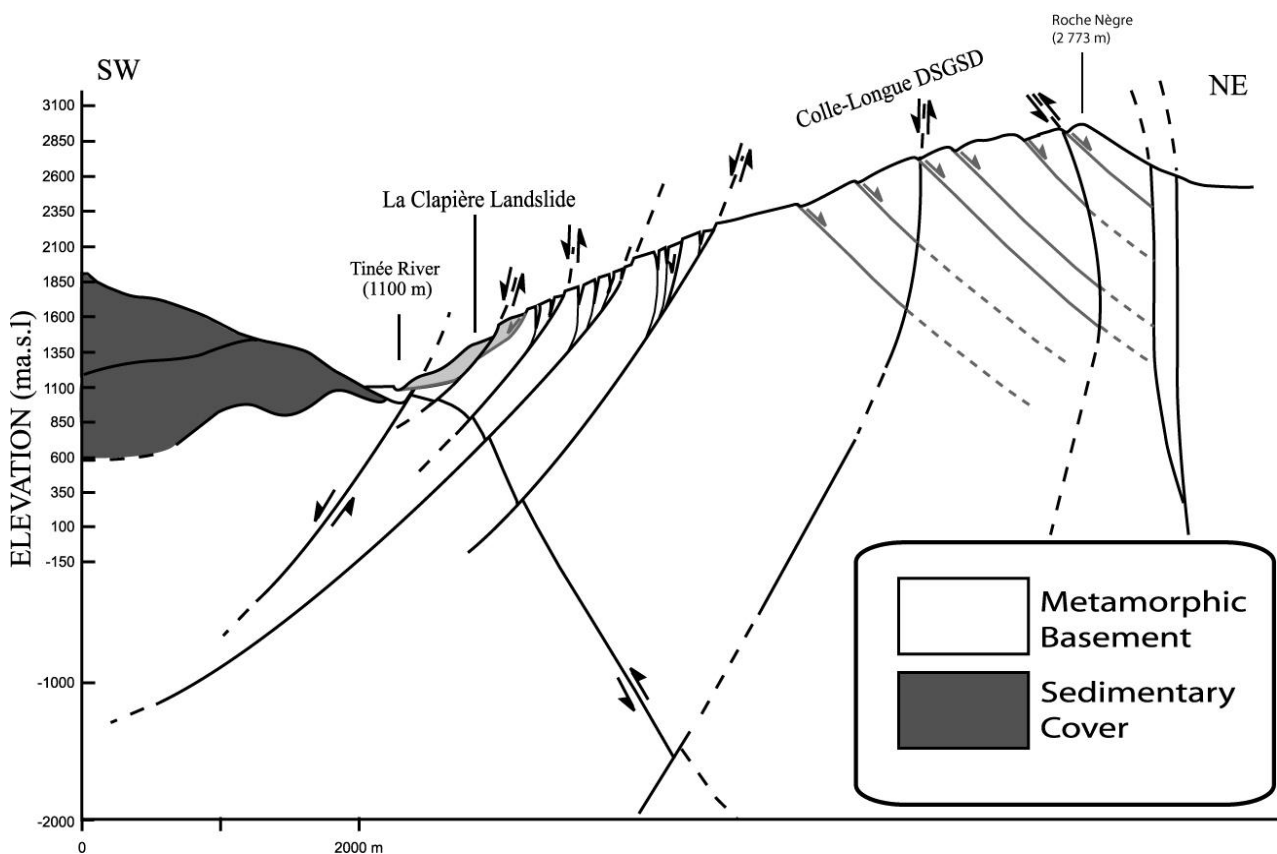


Figure 10: Coupe interprétée du versant de Colle Longue et du glissement de la Clapière (Jomard, 2006)

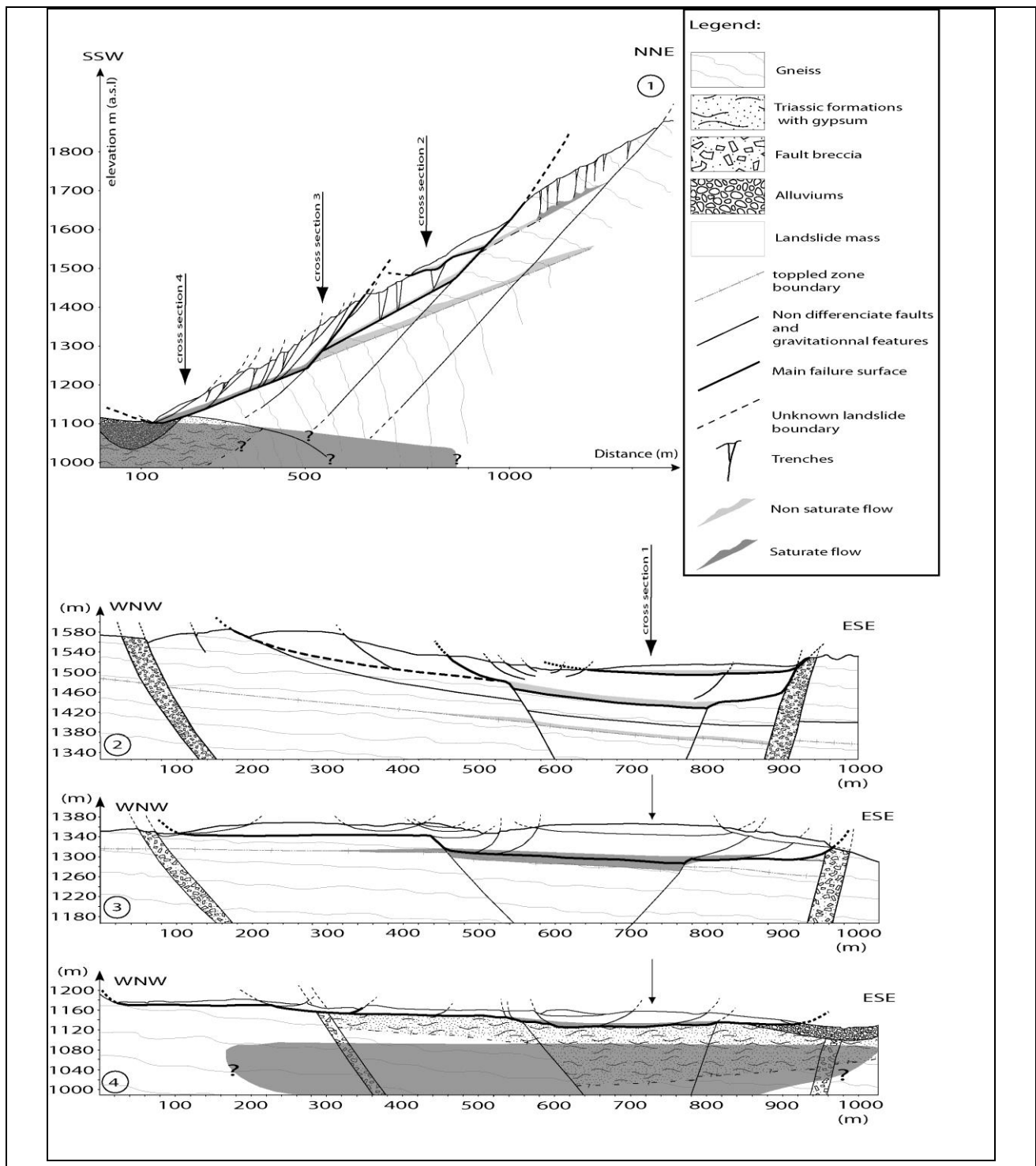


Figure 11: Coupe interprétée du glissement de la Clapière (Jomard et al., 2008)

Pour en revenir aux premiers travaux que nous avons réalisés (thèse d'Hervé Jomard), on en conclut que le glissement rocheux de La Clapière (objet permanent de notre attention), localisé dans la partie occidentale du pied du DGSD de Colle Longue (Figure 6), est encadré par les failles d'orientation N110-140°E et N010-030°E (Lebourg et al., 2005). On y trouve des indices d'extension (Figure 5) sous la forme d'escarpements morphologiques localisés au droit des principales failles et d'autres indices morphostructuraux (crevasses) observés en dedans et en dehors des limites du glissement. Les crevasses gravitaires montrent une évolution superficielle



dans le corps du glissement en passant d'un aspect linéaire à un aspect déformé (courbe) et jusqu'à une dislocation complète (Figure 10, Jomard, 2006). À l'échelle du DSGSD de Colle Longue, de tels indices morphologiques sont reconnus dans l'ensemble du versant (Figure 6). Les différents stades d'évolution gravitaire ont pu être mis en évidence, du glissement rocheux fossile (glissement de La Blâche), au glissement actif de La Clapière. Du point de vue morphologie les déformations en profondeur ont montré un enracinement profond des discontinuités gravitaires (Figure 10 et Figure 11). C'est afin de répondre en partie à cette observation que nous avons entrepris d'utiliser l'imagerie par tomographie électrique (§4.4).

La deuxième partie de mon travail porte sur les matériaux observés dans les failles gravitaires qui participent activement aux mécanismes de rupture. Dans la majorité des publications, on constate que les paramètres mécaniques utilisés dans les modèles numériques sont principalement issus de références bibliographiques ou d'essais sur des matériaux sains (RMR (Bieniawsky, 1976), RQD (Barton et al, 1974), SMR, (Romana, 1988)). En réalité et sur le terrain, on constate que l'état réel du matériel géologique qui participe au cisaillement est très rarement pris en compte.

- Qu'en est-il de du paramétrage des modèles numériques et analogiques avec de telles valeurs ?
- Est-il nécessaire d'acquérir avec plus de précision des paramètres mécaniques qui participent réellement à la résistance au cisaillement et surtout qui rendent compte de l'évolution spatiale et temporelle des processus d'altération ?

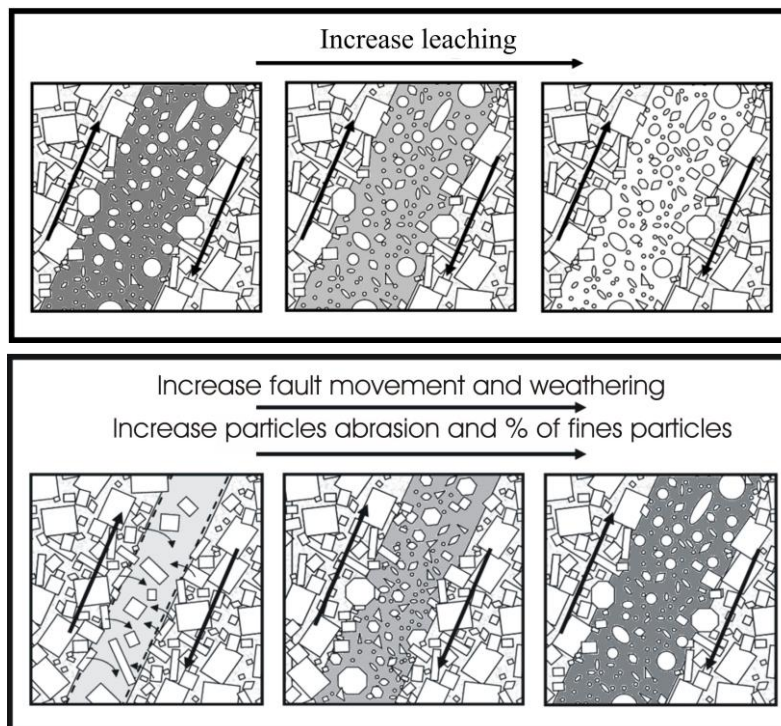
C'est en partant d'observations sur le terrain au niveau des failles dites « gravitaires » que l'on peut constater qu'elles sont fortement fracturées, cataclasées et à l'état du matériel géologique granulaire et ce sur des épaisseurs décimétriques. C'est avec cet objectif de mesurer la variabilité spatiale et indirectement temporelle que nous avons réalisé des essais sur différents échantillons de gneiss issus de la vallée de la Tinée et représentant les différents stades d'évolution des morphostructures gravitaires.

### 4.3 Héritages mécaniques : altérations et lessivages une lutte sans merci

La rupture d'un massif est le fruit de processus très lents de vieillissement et d'altération des roches qui intègrent l'action de phénomènes physico-chimiques divers (fissuration, dissolution, changement minéralogique, ...), dont la cinétique et le degré d'avancement sont difficiles à estimer sur un massif donné. L'étude des processus d'altération des roches et des sols, leurs cinétiques et leurs effets sur les caractéristiques mécaniques sont modifiés globalement soit par des changements et évolutions climatiques (pluie, température, ...), soit ponctuellement par l'occupation anthropique et l'urbanisation. L'altération ou les altérations sont des processus lents qui font intervenir principalement l'eau et qui affectent les minéraux (hydrolyse et complexolyse). Dans un contexte général, il est admis que tous les types de roches peuvent être altérés au cours des temps géologiques.

- La production d'argiles est un exemple d'altération des roches avec un impact négatif sur la stabilité des pentes, mais quand et comment l'impact du lessivage intervient-il ?
- La tectonique modifie-t-elle les caractéristiques de la roche par le jeu des failles ou la formation de plis ?

Les déformations de la roche conduisent à l'apparition de zones de cisaillement ou de simples fractures réduisant la taille moyenne des blocs (Figure 12). La conséquence directe est une transformation du comportement du matériau, avec déplacements possibles le long de ces niveaux particuliers.



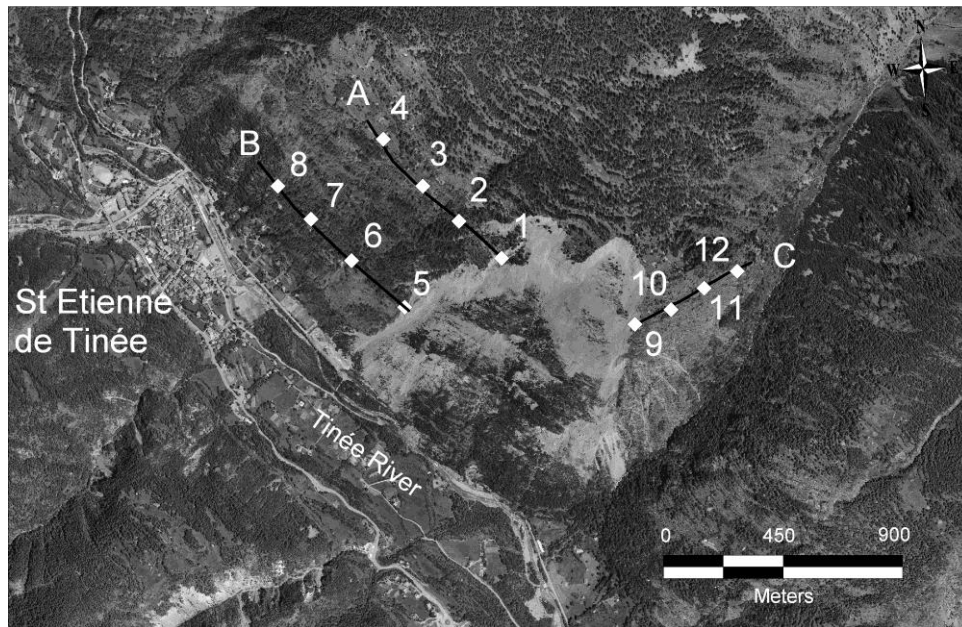
### Figure 12 : Hypothèse sur l'évolution des paramètres mécaniques.

Si l'on se réfère aux mouvements de terrain, on constate d'un point de vue mécanique, une grande variabilité de l'aspect des roches, en termes d'altération et de fracturation. Seules des études fondamentales sur les propriétés mécaniques de la matrice rocheuse saine et de la partie « granulaire » du matériau altéré permettent de mieux comprendre la complexité des mécanismes d'initiation et de déclenchement des instabilités (Hernandez et al., 2008). Cette complexité est généralement abordée par la diversité des comportements mécaniques d'une formation géologique (élastique, élasto-plastique, fragile-ductile, visqueux, endommageant, ...) et par l'analyse des différents paramètres qui influencent le comportement mécanique.

Ces paramètres sont très nombreux, et ils montrent de par le nombre de publications et thèses réalisées sur ces paramètres, la grande complexité liée aux interactions entre la nature de la composition du matériel géologique, les conditions de chargement, les relations fluides/pores/perméabilité et surtout les relations d'échelle. Au cours de mon travail de thèse, j'avais déjà travaillé sur la variabilité de paramètres mécaniques au sein d'une même formation. Les résultats obtenus avaient permis de quantifier, par des paramètres physiques et mécaniques, les moraines (matériaux détritiques hétérogènes provenant de l'érosion glaciaire et matérialisant une histoire géologique complexe). L'analyse multidimensionnelle des données avait permis de montrer l'influence de la morphologie de grains sur les caractéristiques mécaniques, et de quantifier, les corrélations entre les paramètres physiques, mécaniques et morphologiques des moraines. L'analyse de la matrice des corrélations avait permis de mettre en évidence de fortes corrélations entre l'angle de frottement interne effectif et les indices d'allongement et de rugosité. Cette corrélation, non fortuite entre la forme des grains et l'angle de frottement interne, avait déjà été observée par d'autres auteurs sur des sables, mais en utilisant des paramètres de forme plus subjectifs (Rittenhouse, 1943, Krumbein et Sloss, 1963, Cayeux et Tricart, 1959, Wadell, 1933, 1935, Frossard, 1978, ...). Les résultats et relations définis pour les sables ont été observés et appliqués aux moraines. Ainsi, il a été mis en évidence une forte corrélation entre l'indice d'allongement  $I_{NM}$  et l'angle de frottement interne effectif des moraines ( $\varphi'$ ), (Lebourg et al, 2001, 2003; Hernandez et al, 2008). La quantification de cette corrélation a conduit à l'élaboration d'une loi expérimentale généralisée à l'ensemble des moraines. Cette relation permet aussi de quantifier une relation entre l'histoire géologique d'une formation et sa résistance au cisaillement.

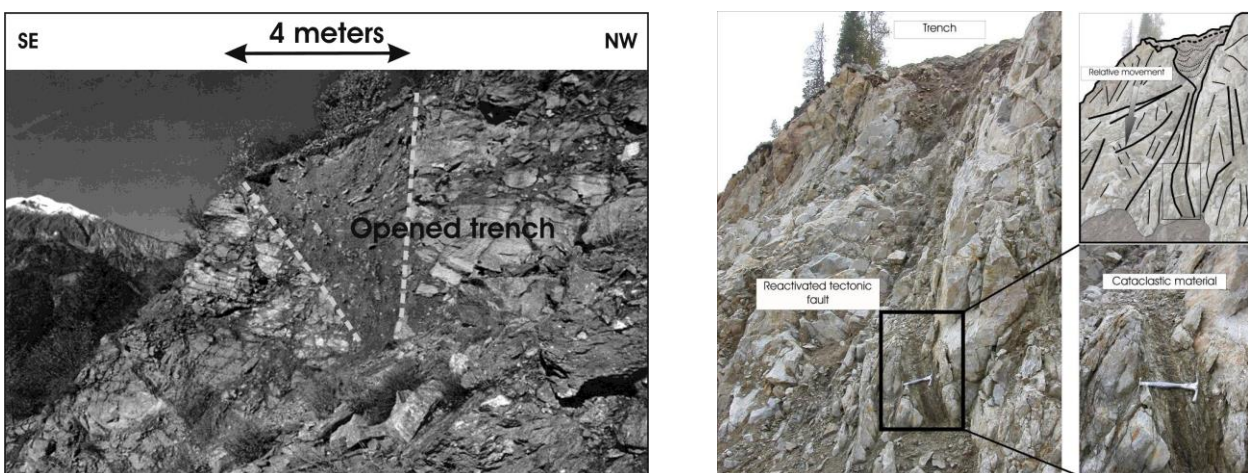
C'est avec la même démarche que nous avons entrepris de travailler sur la variabilité des paramètres mécaniques au sein des massifs rocheux instables avec une tentative de quantification de l'altération en fonction des nombreux paramètres intrinsèques des matériaux. Lorsque l'on se réfère aux travaux de Goodman et Bray (1976), on constate qu'ils proposent une méthode d'évaluation de l'instabilité d'un versant tenant compte de la nature des joints impliqués dans le cisaillement. C'est plus particulièrement les matériaux de remplissage où sont définis les seuils critiques de stabilité. Nous avons donc entrepris ce travail sur la zone autour du glissement de la Clapière (dans les

gneiss). Lorsque l'on regarde l'état d'altération des joints rocheux du glissement de la Clapière, on est à même de se poser la question de la participation de ce matériel altéré (gneiss et micaschiste) dans la résistance au cisaillement à plus grande profondeur au niveau de la zone de cisaillement.



**Figure 13 : Localisation des zones de prélèvement sur la bordure ouest du massif de l'Argentera / rive gauche de la Tinée (Orientation de la vue N45°).**

D'autre part, nous avons constaté que les diaclases, fentes de tensions et failles présentent sur la Clapière conditionnent le comportement ruptuel de ce mouvement de terrain et qu'elles sont surtout le résultat d'une longue et complexe histoire géologique. Ces dernières présentent différents stades d'évolutions vis-à-vis de l'altération et donc du comportement mécanique. Nous passons d'un comportement sur éponte rocheuse à un comportement de type granulaire.

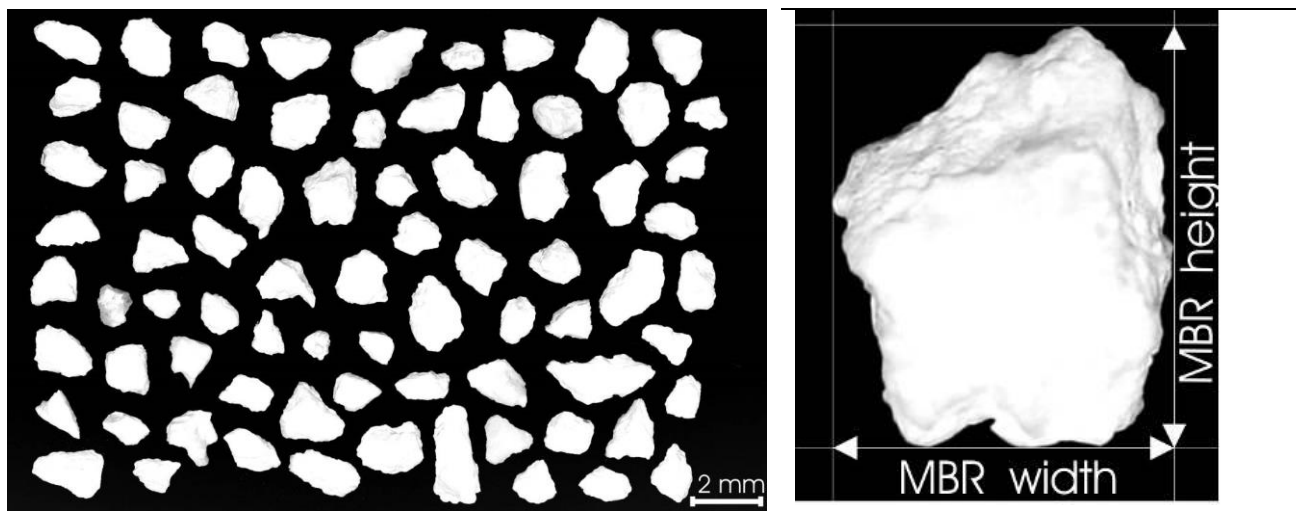


**Figure 14 : (à gauche) Crevasse de type ouverture gravitaire à la base de laquelle les prélèvements de matériaux ont été réalisés (El Bedoui, 2009) et à droite d'autre crevasse gravitaire où ont été prélevés les échantillons (Hernandez et al, 2008).**

La zone expérimentale est répartie sur l'ensemble du versant ouest de l'Argentera (Figure

13) dans les zones de fracturations préférentielles des failles gravitaires cartographiées et identifiées par H. Jomard (thèse région, 2003/2006), et analysée lors des thèses de H. Jomard et de M. Hernandez. Les zones étudiées sont soumises à une réactivation d'anciens linéaments tectoniques en failles gravitaires (§4.1.1).

Les résultats obtenus peuvent être interprétés de deux manières : soit on recherche un groupement des points autour d'une valeur moyenne (angle de frottement interne effectif de  $\phi' = 30^\circ$  et  $C' = 16.7$  Kpa), soit on regarde dans le détail et pour chaque linéament les valeurs mesurées et leurs évolutions spatiales.



**Figure 15. Photographie des grains pour chaque échantillon de la gamme [2-5mm] et paramètres de forme et taille mesurés pour chaque grain (Hernandez et al., 2008)**

Dans le premier cas de figure, la comparaison avec les valeurs admises dans la bibliographie nous a montré qu'elles étaient similaires à celles communément utilisées pour les matériaux au sein des diaclases. Par contre, dans le deuxième cas de figure, elles montrent des variations linéaires qui nous permettent d'observer et de quantifier une certaine évolution liée aux processus d'altération eux-mêmes et liés à l'ouverture en traction/cisaillement des failles gravitaires. L'analyse statistique multidimensionnelle (ASM ou ACP) a été utilisée pour quantifier des corrélations entre les paramètres physiques caractérisant les éléments dans une même gouge (morphologie des grains, distribution granulométrique... Figure 14 et Figure 15) et les paramètres mécaniques (Lebourg et al., 2003). Aucune corrélation statistiquement significative n'a été trouvée à l'échelle du versant ouest de l'Argentera ou à l'échelle du glissement. Cependant, nous avons remarqué qu'il existait une corrélation sur certains fuseaux de discontinuité entre la rhéologie et la distance depuis la zone saine jusqu'à la zone du glissement. En effet plus on s'éloigne du glissement, plus la cohésion augmente et plus l'angle de frottement interne diminue. Cette observation couplée à des analyses sur les argiles montre le rôle important de la circulation des fluides au sein de ces failles. Le schéma ci-dessous (Figure 16, volontairement simple), montre l'évolution des paramètres mécaniques et l'ouverture des tranchées.

Cette évolution du comportement mécanique des grains pourrait expliquer l'amortissement



progressif du glissement de La Clapière. La déstructuration du versant et le lessivage des fines auraient permis une meilleure circulation des fluides, supprimant les surpressions interstitielles, augmentant la rugosité intergrains et de ce fait, favorisant une stabilisation du glissement. Ce phénomène a déjà été observé dans de nombreux cas sur les surfaces de cisaillements de mouvements de versant dans des gneiss ou des granites altérés. Mais cette évolution n'avait jamais été observée sur ces zones cisailantes.

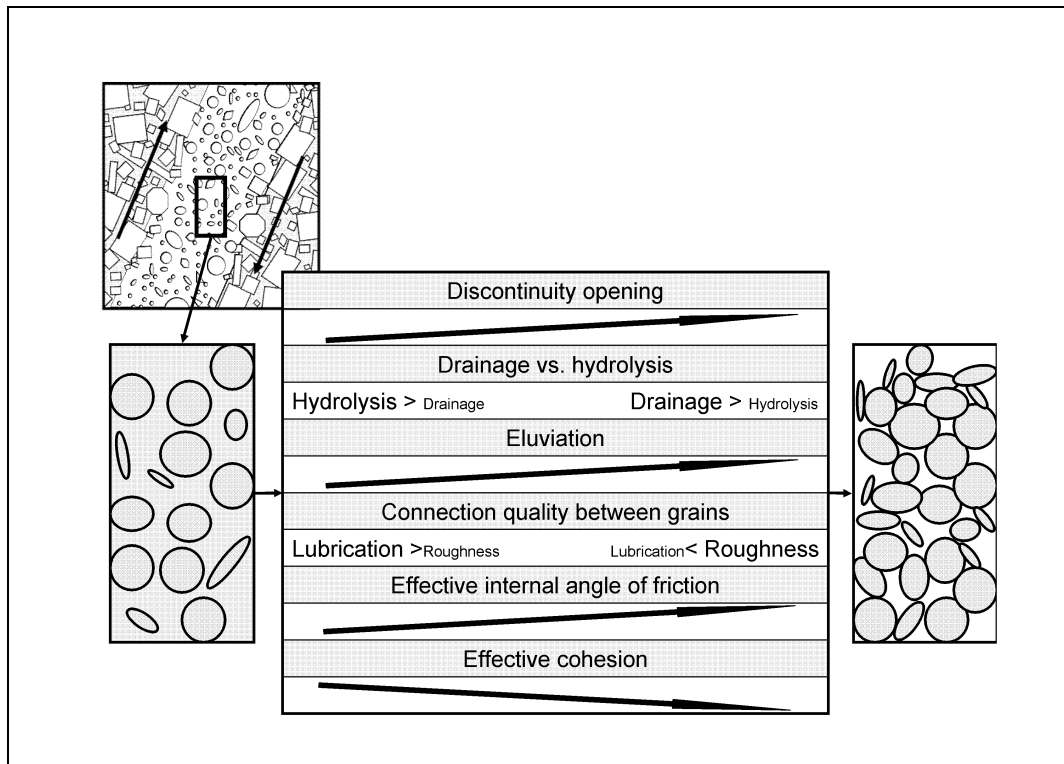


Figure 16 : Evolution des paramètres mécaniques  $\phi'$  et  $c'$  au regard de la lutte entre le lessivage et hydrolyse

En conclusion, l'interprétation de ces résultats est délicate et nécessite la prise en compte de variables d'altération mieux contraintes et de ce fait une augmentation des mesures. En effet, d'autres campagnes de mesures s'avéreraient nécessaires afin d'améliorer la résolution des données, tant au niveau spatial que statistique. Néanmoins, à l'aide de ces nouveaux résultats nous avons pu élargir la vision du comportement des failles gravitaires et de leur impact sur l'évolution des mouvements rocheux. Cette approche ouvre de nouvelles perspectives de recherche ;

- pour étudier l'évolution rhéologique des versants couplée à d'autres méthodes,
- pour étudier avec précision la cinématique d'un versant en couplant une évolution temporelle de la dégradation et du changement des paramètres mécaniques avec des modèles numériques évolutifs (pour cela je me référerai aux travaux réalisés par les numériciens et les modélisateurs).
- 

Les perspectives de travail que j'envisage sur ce volet portent aussi sur le couplage de la datation de l'ouverture de ces crevasses et failles gravitaires et sur l'évolution des propriétés mécaniques. Pour ce faire, j'envisage de réaliser sur des linéaments datés des mesures et calculs de paramètres mécanique sur les éléments granulaires qui sont sollicités par les mouvements gravitaires. Ainsi nous

espérons pouvoir proposer une quantification de l'altération basée sur les paramètres mécaniques.

#### **4.4 L'imagerie géophysique et hydrogéophysique des mouvements de terrain,**

Ce chapitre correspond essentiellement à un travail expérimental réalisé au cours des 6 dernières années et développé, analysé et traité dans les travaux de thèse d'Hervé Jomard (2006), de Stéphane Binet (2006), de Mickael Hernandez (2008) et de Samyr El bedoui (2008).

Dans les deux parties précédentes, nous avons évoqué toute la problématique de l'accès à l'information en profondeur dans des environnements instables, difficiles d'accès, très chaotiques et dangereux. Dès le début de mon recrutement, je me suis tourné vers la géophysique électrique, outil que j'avais utilisé lors de ma thèse, et qui m'avait permis de reconnaître les cryptoreliefs (Lebourg et al., 2001, 2003). Cette méthode est depuis de nombreuses années largement utilisée et développée par de très nombreuses équipes de recherche, mais l'imagerie des grands mouvements de versant reste très complexe et difficile.

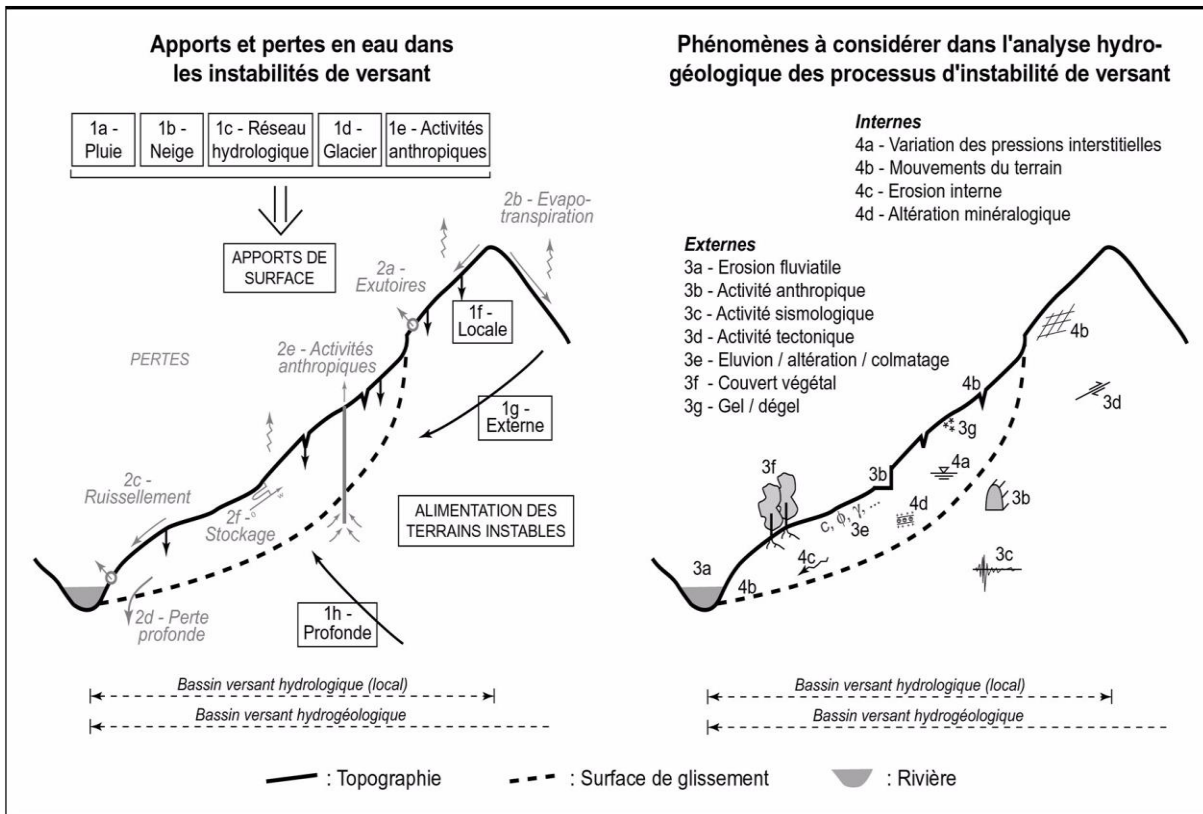
Avant de synthétiser ce travail, il est important de rappeler que l'utilisation de l'imagerie par tomographie électrique dans le cadre de l'étude et la compréhension des processus rupturés dans les mouvements de terrain a pour vocation première d'identifier les limites morphologiques, les discontinuités majeures, et la détection de l'eau. Cette approche utilise l'outil en mesure de résistivité et permet de lancer des routines d'inversion de calcul bien rodées qui permettent à un intervalle de confiance près de donner des informations sur les structures ou objets géologiques recherchés. La problématique majeure que nous avons rencontrée était et est toujours liée à la grande faiblesse des outils disponibles dans le commerce. A moins de travailler avec des développeurs et des théoriciens (M. Pessel, A. Tabbagh, Y. Lagabrielle.....) qui sont d'une grande rigueur dans les interprétations des résultats des inversions des données de résistivité, nous nous retrouvons systématiquement pieds et poings liés avec deux ou trois logiciels commerciaux. De surcroît la capacité de publier reste toujours très complexe, car les objets sur lesquels nous travaillons sont complexes et la non-unicité de la solution proposée reste encore plus discutable. Pour aller de l'avant dans notre problématique, j'ai procédé en trois étapes :

- une imagerie statique des mouvements de versant (§4.4.1),
- une imagerie dynamique passive et active à basse fréquence (§4.4.2),
- une imagerie quasi permanente (surveillance) d'un mouvement de versant (§4.4.3).

Les deux dernières étapes de notre problématique d'imagerie dynamique sont apparues suite à des problèmes liés à l'inversion des données et à la fiabilité de l'imagerie statique des mouvements de terrain. Suite à ce constat et voulant aller plus avant dans l'utilisation de cet outil j'ai cherché à considérer la tomographie électrique comme un outil de surveillance et d'observation de l'évolution temporelle de la circulation des fluides dans les massifs géologiques instables (Technique ou procédure déjà bien utilisée dans la recherche appliquée des polluants dans les sols). Comme il existe un problème de non-unicité de la solution de l'inversion, et que les limites géométriques des mouvements de versant restent assez simples en termes d'acquisition, nous avons recherché parmi



les variables géologiques déclenchantes, laquelle était susceptible d'évoluer et de changer significativement dans le temps et surtout de modifier les valeurs de résistivité. Cette variable a très vite été reconnue comme étant l'eau (**Figure 17**, Tullen, 2002), qui dans des régions à faible sismicité, est reconnue comme étant le facteur déclencheur principal des instabilités (Cojean, 1994).



**Figure 17 : Classification des phénomènes liés à l'eau qui doivent être considérés dans l'analyse hydrogéologique des processus d'instabilité de pente. (Tullen, 2002).**

En effet, l'eau intervient à la fois comme facteur de préparation d'un versant à la rupture et comme facteur déclenchant la rupture. L'action de l'eau peut être chimique et/ou mécanique et constitue un phénomène aggravant par couplage (Rutqvist et Stephansson, 2003, Cappa et al., 2004). L'eau dans les versants a deux origines :

- les eaux de surfaces (les eaux non infiltrées dans le versant). Elles se déclinent en ruissellement, évapotranspiration et sous forme de stockage de surface (neige et glace),
- les eaux souterraines qui peuvent avoir différentes origines (Tullen, 2002): avec l'infiltration par apports de surface, l'alimentation drainée par des structures géologiques voisines, une origine fossile (aquifères fermés, Plummer et Busenberg, 1999), une origine géothermale (Hippolyte et al., 2006).

Sans aller jusqu'à différencier ces types d'eaux (reconnus essentiellement par le marquage et la chimie de eaux), nous avons regardé et recherché grâce à l'imagerie dynamique (§4.4.2 et §4.4.3)

les différentes actions de l'eau souterraine sur la stabilité des versants. Les eaux souterraines induisent un grand nombre de phénomènes mécaniques et chimiques qui peuvent être regroupés en quatre types (Jomard, 2006). (i) Les effets sur les propriétés mécaniques, avec la diminution de la cohésion du sol et l'augmentation du poids volumique. (ii) Les effets sur l'augmentation de la pression hydrostatique (augmentation de pression ( $\Delta u$ ) entraînant une modification de l'état de contrainte granulaire et une translation du cercle de Mohr). (iii) Les effets hydrodynamiques avec la production d'une poussée sur le matériau traversé, le transport de particules fines modifiant la perméabilité principalement au niveau des exutoires, ce qui augmente la charge d'eau et donc la pression interstitielle d'un versant. (iiii) les effets chimiques, la dissolution de la matrice des matériaux ou des matériaux eux-mêmes.

Mais avant de montrer l'utilité et la nécessité dans certain cas de développer l'hydrogéophysique, nous procédons par étapes dans l'avancement de cette recherche sur la reconnaissance en profondeur des structures gravitaires par l'utilisation de la tomographie électrique en tant d'imagerie statique.

#### **4.4.1 Imagerie par tomographie électrique statique**

L'approche de l'imagerie statique donne la possibilité de caractériser :

**1) La transition entre une zone pseudo-stable et une zone déstabilisée dans un matériel relativement homogène.**

Cette première approche a été réalisée sur le glissement de la Clapière. Dans un premier temps nous nous sommes concentrés sur la caractérisation et le calibrage du signal électrique en fonction des formations recherchées et de leurs degrés d'altération gravitaire. Ces essais de corrélation ont été couplés avec d'autres paramètres tels que la vitesse de propagation des ondes P et les paramètres rhéologiques (Jomard et al, 2006). La bonne cohérence des résultats avec les observations morphologiques a permis de mieux contraindre pour une même masse homogène les différences qui existaient entre formation affectée par un phénomène gravitaire et la même formation stable.

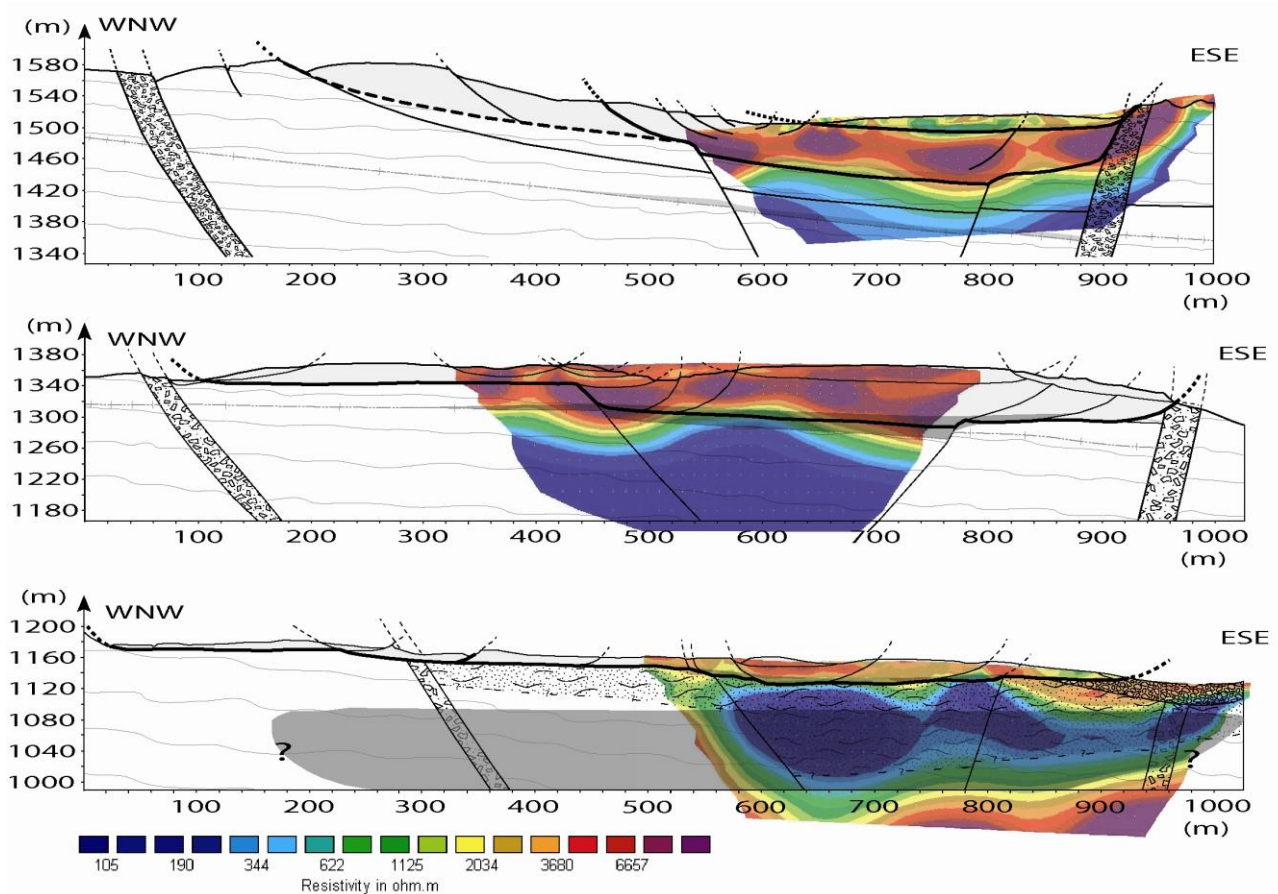
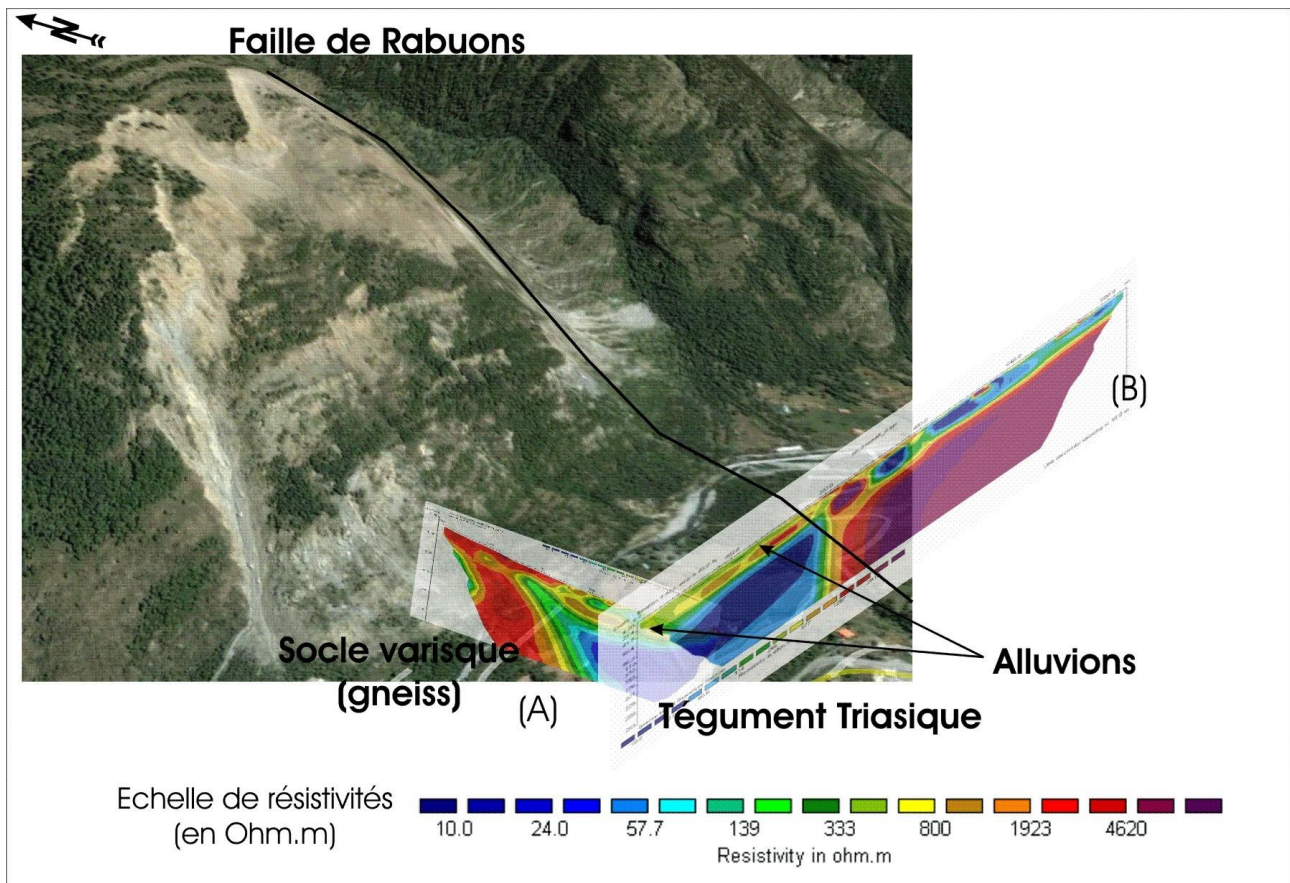


Figure 18 : Projection des ERT acquis sur la Clapière sur les coupes transversales au glissement de la Clapière.

## 2) Les discontinuités majeures limitant et guidant les mouvements de versants.

Ce travail avait été initié lors de ma thèse avec la collaboration de M. Frappa (Lebourg et Frappa, 2001) et nous avons pu mettre en évidence des structures caractéristiques des cryptoreliefs qui guident et canalisent les mouvements de versants affectant les moraines. Ces discordances étant facilement identifiables par les forts contrastes de résistivité entre le cryptorelief et les moraines. Les discontinuités auxquelles nous nous sommes intéressées étaient de deux ordres : des discontinuités passives et des discontinuités actives. Ces dernières participent de façon active à la dynamique des mouvements de versant soit en canalisant les fluides qui y circulent en y créant ainsi des chenalizations préférentielles, soit comme nous l'avons vu précédemment de failles gravitaires. Ces failles gravitaires qui selon l'état de maturité du versant auront acquis un déplacement irréversible qui sera marqué par un décalage de contraste de résistivité.



**Figure 19 : couplage entre les profils de tomographie électrique, les structures et les linéaments tectoniques (El Bedoui, 2008)**

Lors de nos premiers travaux d'imagerie sur le site de la Clapière nous avons grâce à plusieurs campagnes de prospection géophysique redéfinie de façon très fine et précise la fracturation du versant de la Clapière. A cela s'est ajouté une étude morphologique détaillée au 1/1000<sup>ème</sup> de la masse glissée. Cette analyse morphologique a permis de reconstituer les étapes des zones où sont apparues les différentes ruptures. Il a été tiré de cette approche une série de coupes interprétatives au droit des profils géophysiques réalisés (Figure 18 et Figure 19). Ces coupes ont ensuite été comparées aux profils géophysiques obtenus. Il en résulte: une bonne localisation et corrélation des structures et interfaces horizontales qui permettent de confirmer la localisation de la surface de rupture, une difficulté à représenter visuellement les structures verticales pour les profils de type pôle-pôle. Une comparaison avec des modèles inversés de résistivité permet cependant de reconstituer le signal de structures verticales que l'on retrouve finalement sur les profils acquis. Lors de ce travail, nous avons aussi tenté de valider la morphologie (l'orientation) des failles par l'utilisation du logiciel RES2Dmod, et nous avons ainsi mieux contraint notre coupe interprétative (Figure 20). En effet, nous obtenons un très bon couplage entre les mesures et observations de terrain et les interprétations géophysiques.



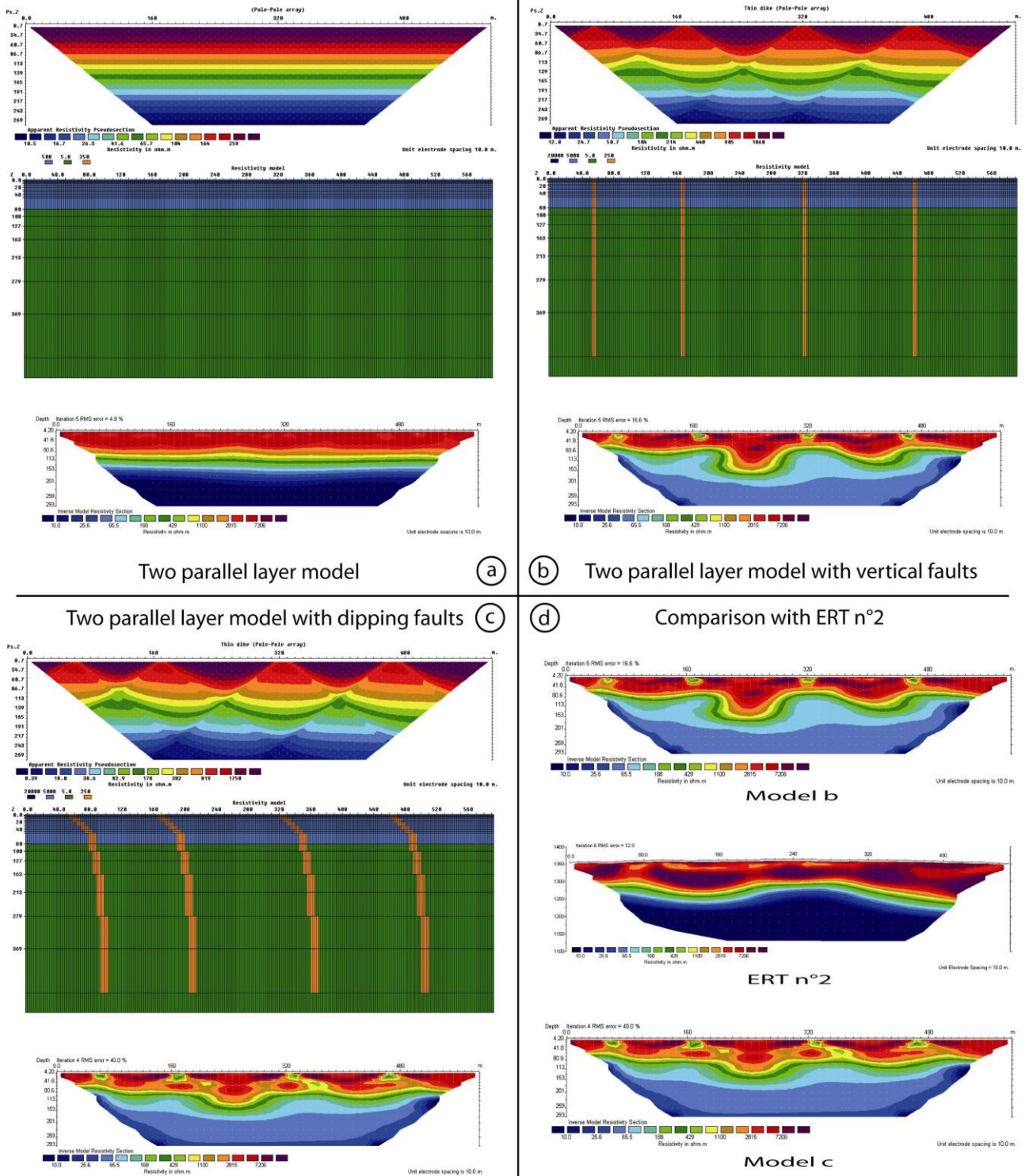


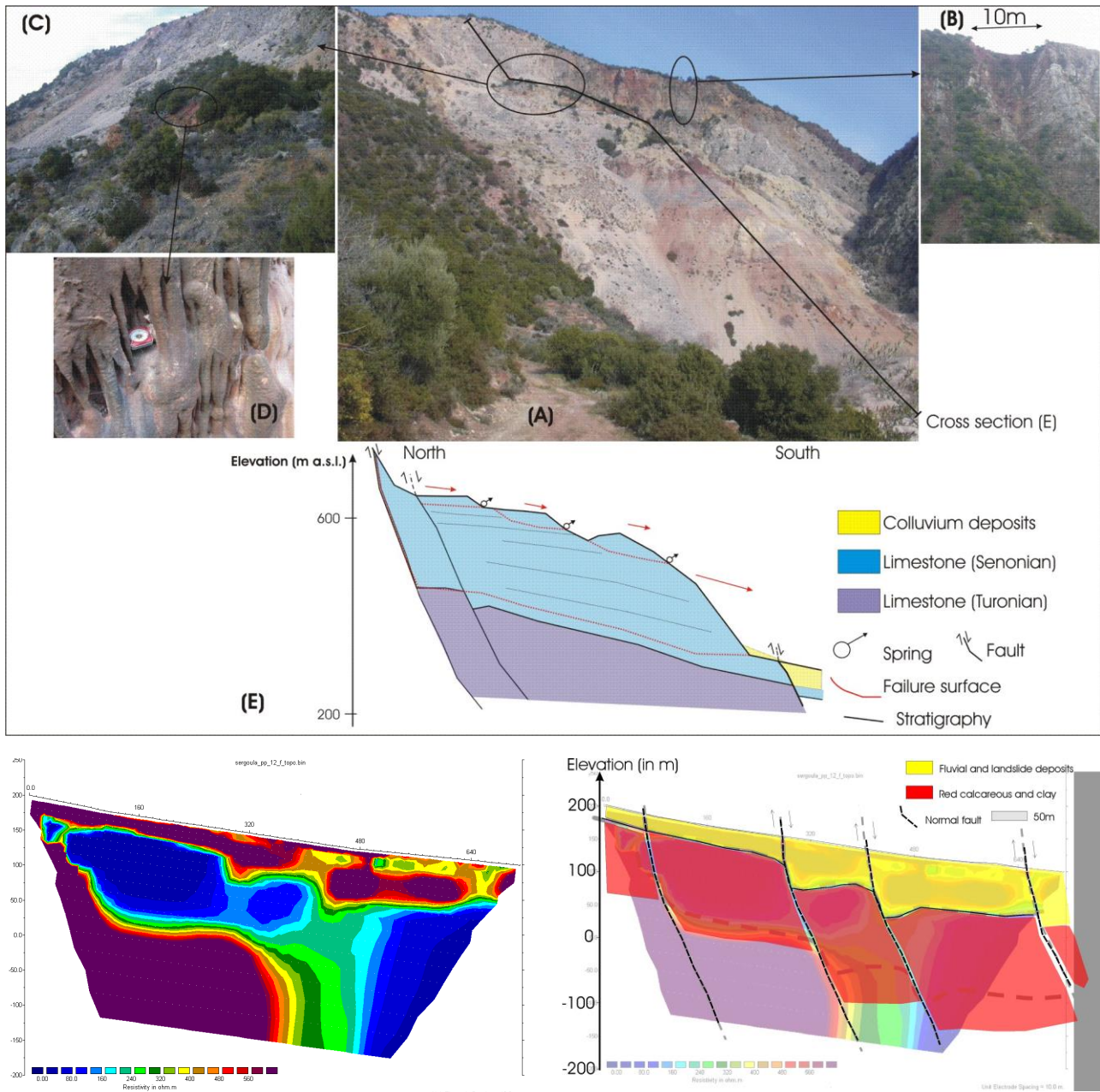
Figure 20 : modélisation de l'orientation des failles sur l'interprétation des modèles inverse (Jomard et al., 2008).

Ce travail a permis, pour la première fois sur ce type de mouvement de versant, de localiser précisément la surface de rupture du glissement. Il a permis également de confirmer les coupes géologiques interprétatives effectuées à plus grande échelle dans le versant et de valider le contrôle structural des écoulements et des déformations mis en évidence dans le chapitre précédent.

Suite à la validité de la méthode et surtout de la technique, nous avons effectué d'autres acquisitions dans des secteurs de grands mouvements de versant (glissement de Panagopoula, glissement de

Sergoula en Grèce, sur les glissements d'Isola (06) et dernièrement sur les grandes structures instables de l'arrière pays grassois).

Les résultats les plus marquants ont été obtenus lors du programme de recherche 3HAZ sur les deux glissements de Panagopoula et Sergoula (Figure 9, Figure 21). Dans ces secteurs nous avons entrepris d'imager les mouvements dans le sens de la pente, ce que nous ne pouvons à l'heure actuelle pas réaliser sur la plupart des DSL. L'intérêt d'une telle orientation de profil est de mieux rendre compte du déplacement de la masse glissée.



**Figure 21: morphologie du corps du glissement de Sergoula.**

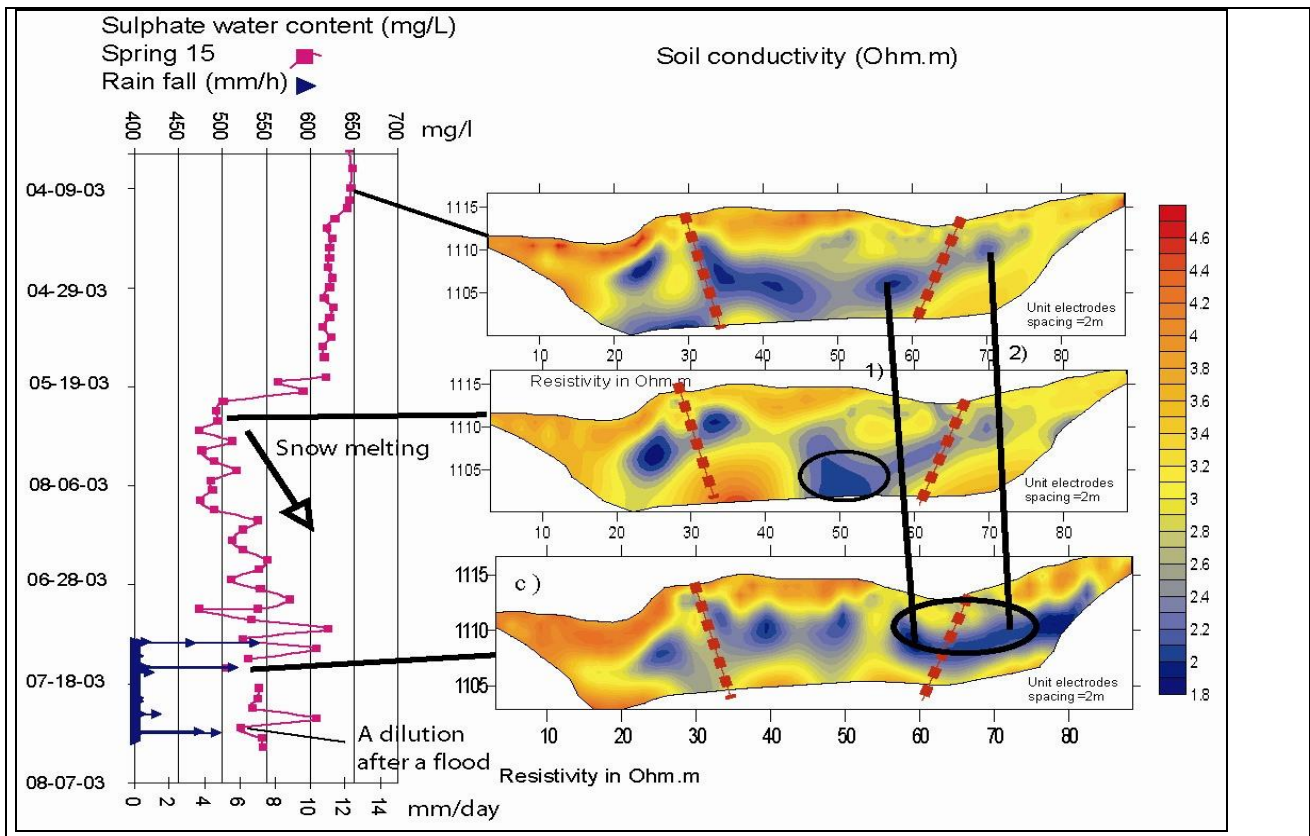
**Légende de la Figure 21 :** (a) vue générale du corps du glissement; (b) effondrement tectonique/gravitaire; (c) morphologie en banquettes et (d) zones de karstification associées ; (e) coupe géologique simplifiée, (f) tomographie électrique au niveau de la coupe simplifié et (g) interprétation de la tomographie électrique.



#### 4.4.2 Hydro-géophysique passive et active

La seconde étape de notre recherche a porté sur la recherche de la variable géologique qui pouvait induire un changement significatif des valeurs de résistivités, afin d'être moins dépendant des problèmes d'inversions liés à des environnements complexes.

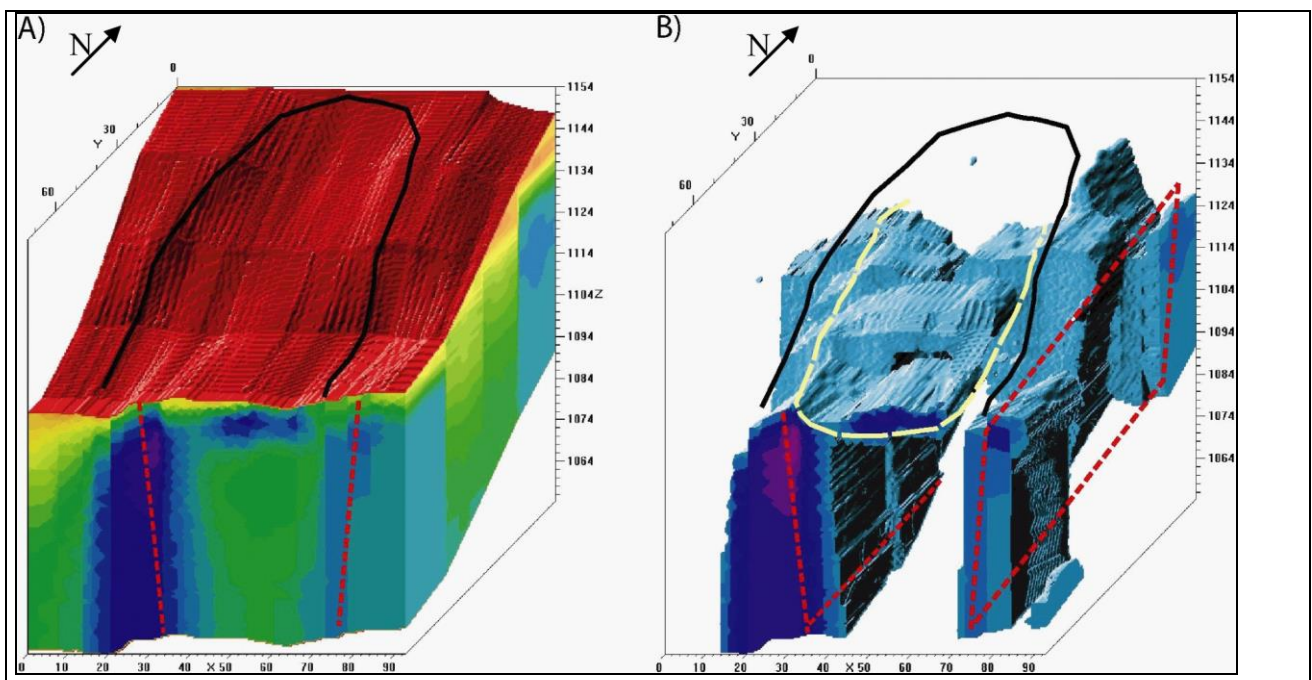
C'est la recherche du signal lié à l'eau (facteur déclenchant) qui est principalement abordée par une approche hydro-géophysique passive (Meric, 2006, Jongmans et Garambois, 2006), hydro-géophysique active (Lebourg et al., 2005 Jomard et al., 2007) et hydromécanique (Rutqvist et Stephansson, 2003, Cappa et al., 2004, Binet et al., 2007).



**Figure 22:** Analyse comparative entre la teneur en sulfate dans l'eau enregistrée (marqueur de fonte des neiges) et variation de résistivité 3 profils de résistivité.

Nous avons donc entrepris un travail d'imagerie passive (passive au sens où l'on ne modifie pas volontairement les écoulements des eaux), où on laisse un dispositif de tomographie électrique sur place (dans le sens du glissement ou perpendiculairement) et avec une mesure couplée soit à la chimie des eaux, soit à des mesures météorologiques et on mesure à des intervalles de temps climatiquement significatifs les variations de résistivité. Les premières expériences ont été réalisées sur un glissement secondaire emboîté et localisé au pied de celui de La Clapière (Figure 4, Figure 22).

La date exacte de son déclenchement n'est pas connue, mais il semble que la rupture se soit produite en 1996-1997. A l'image de ce qui est observable à l'échelle supérieure, les dépôts fluvio-glaciaires dans lesquels le mouvement s'est développé ont préalablement été le lieu du développement de crevasses perpendiculaires à la pente. De plus le glissement est encadré par un système de fracturations qui guide le mouvement et qui n'est autre qu'une réorientation locale des failles mises en évidence à l'échelle du versant de la Clapière (Jomard, 2006). Nous avons dans un premier temps reconnu en profondeur les structures du glissement, l'épaisseur des formations fluvio-glaciaire et l'une des failles qui traversent le grand glissement de la Clapière (Figure 23) et qui drainent ce dernier. Malgré la taille relativement réduite de la zone étudiée, et un accès très difficile, nous avons déployé un grand nombre de profils électriques, des capteurs hydrauliques et des cibles topographiques (tachéomètre).



**Figure 23 : A : profil de tomographie électrique en 3D**

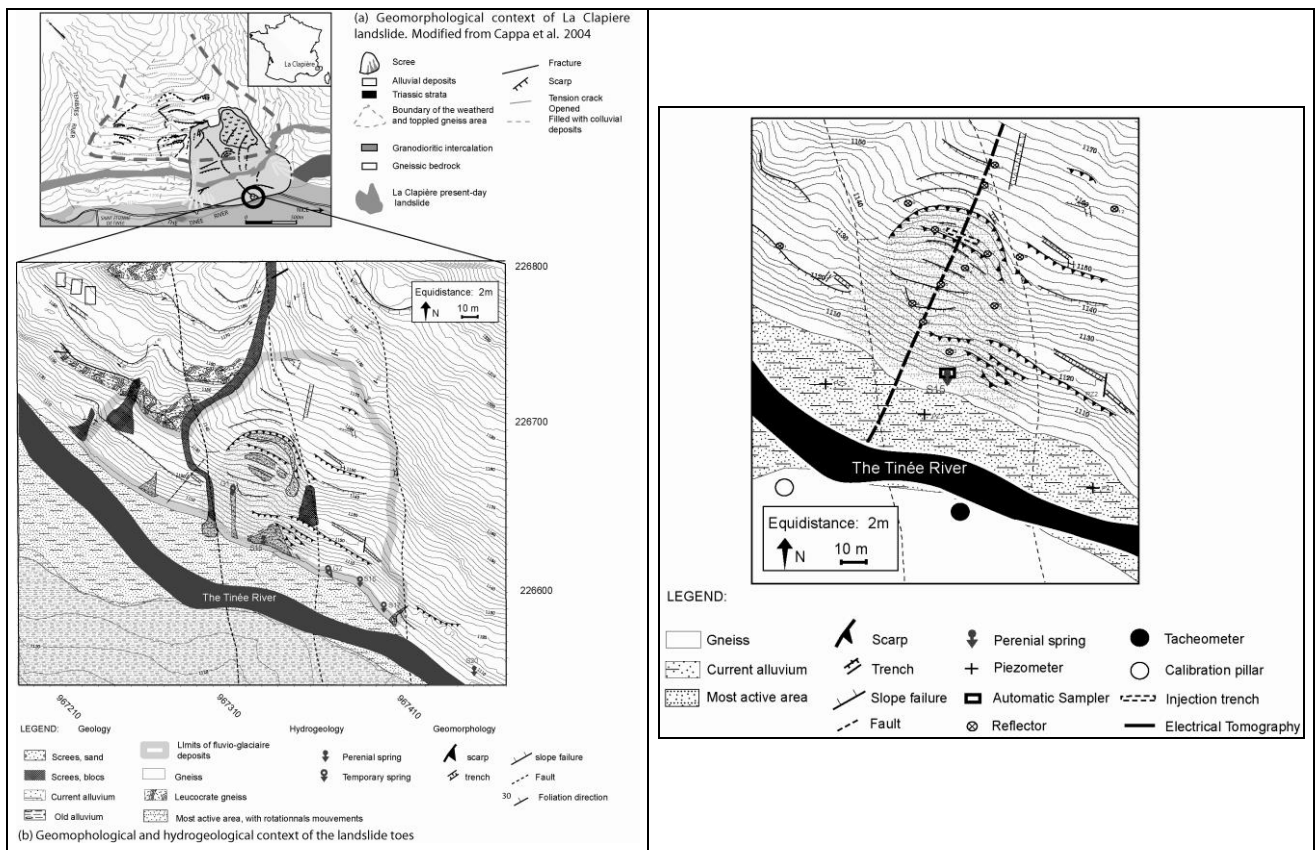
*Légende de la Figure 23 : profil 3D obtenu à partir de cinq profils 2D; B : même profil de tomographie, mais avec les isovaleurs résistivité les plus faibles (secteurs saturés en eau : nappe perchée et faille drainante).*

Ce travail nous a permis de montrer qu'il était possible d'avoir une image en 3 dimensions des structures internes du glissement et que l'acquisition de plusieurs profils décalés dans le temps nous a permis de caractériser l'évolution saisonnière de la saturation du versant et ses relations avec la structure.



Deux résultats importants découlent de cette première approche expérimentale:

- Les failles cartographiques désignées comme étant à l'origine de la déstabilisation du versant ont pu être imagées de part et d'autre de la masse glissée. Elles l'ont été grâce au fait qu'elles drainent vers l'aval une partie des eaux collectées à l'amont,
- La fracturation alimente en eau une nappe perchée sous la zone glissée dont l'exutoire est une source au pied du glissement. Cette nappe perchée suit les fluctuations saisonnières qui suivent les précipitations et de la fonte des neiges sur l'ensemble du versant.



**Figure 24 : localisation dans le glissement de terrain emboîté au pied de la Clapière du profil de tomographie électrique pour le suivi temporel et pour l'injection expérimentale**

La troisième étape de notre expérimentation ambitionnait de mesurer le changement significatif des valeurs de résistivités, non pas au moment d'un changement climatique (comme précédemment), mais par application d'une contrainte des apports d'eau de manière contrôlée par un système d'injection d'eau dans la zone amont de la surface de rupture. Pour ce faire, nous avons réalisé une injection forcée d'eau en période sèche sur la surface de rupture du glissement. Un suivi temporel couplant acquisition électrique, tachéométrique et hydrochimique a été installé et utilisé avant, pendant et après l'injection d'eau. Les résultats obtenus ont permis de valider l'hypothèse de la surface de rupture, mais aussi d'apporter des éléments pour une définition fine de cette dernière.

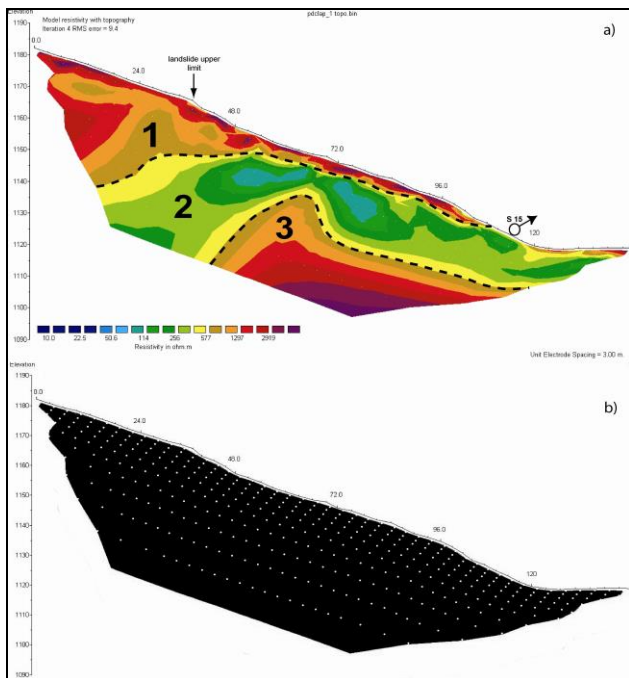


Figure 25 : résultats de l'injection dans le glissement emboîté de la Clapière

Légende de la

Figure 25 : à gauche : profil de référence avec la localisation de la zone d'injection de l'eau. Les zones 1 et 3 correspondent aux zones non saturées et à la zone 2 à une zone saturée et perchée. La sortie sur S 15 correspond à l'exutoire. (b) La localisation des points d'acquisition, qui permet de montrer l'évolution géométrique des points d'acquisitions.

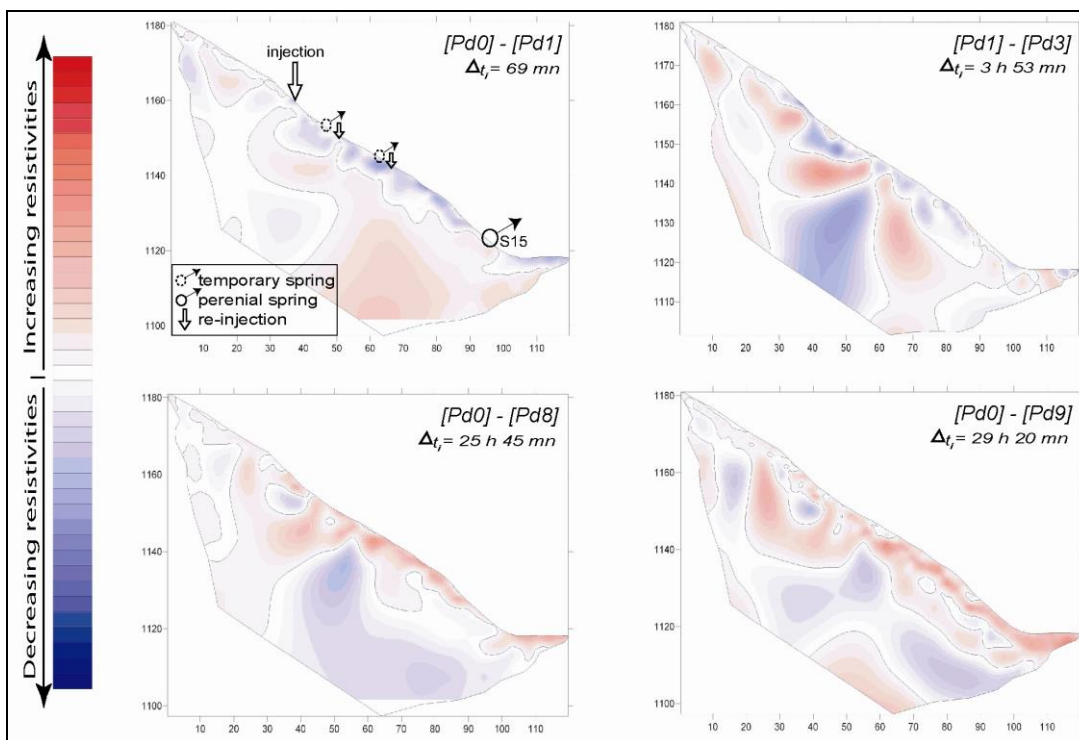


Figure 26 : À droite les résultats de la soustraction des matrices d'inversion. Les zones rouges correspondent à une résistivité croissante relative et à la zone bleue à une diminution relative de la résistivité (écoulement d'eau).

Ce système d'acquisition permet de valider les hypothèses concernant le drainage effectif des surfaces de rupture : en effet la surface de rupture sert de drain efficace pour l'évacuation de l'eau infiltrée, mais l'apport superficiel en eau par injection n'est pas suffisant pour induire le mouvement du glissement ( Figure 25 et Figure 26).

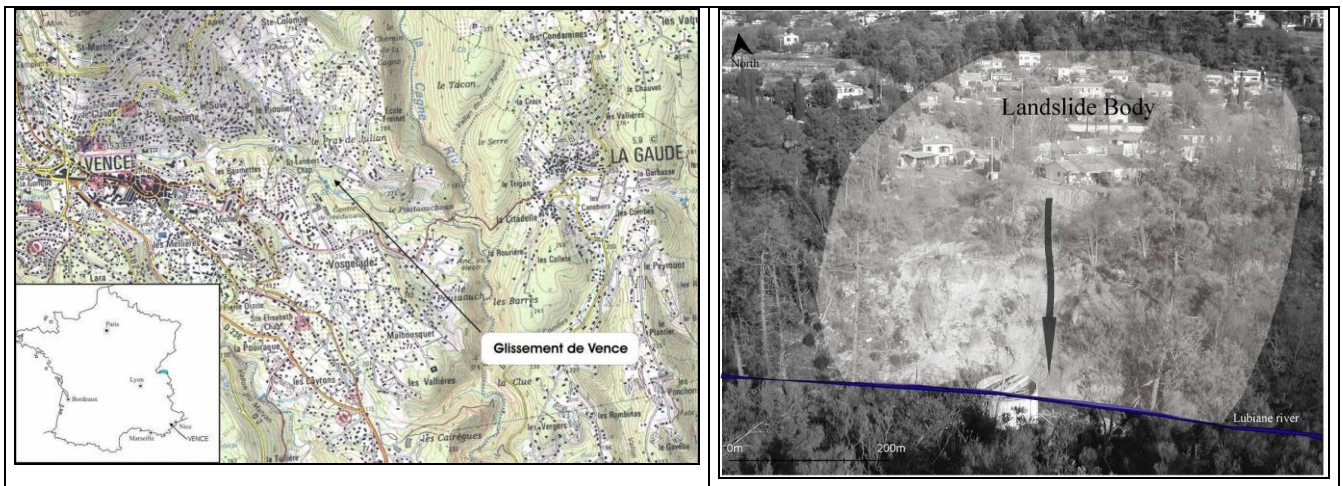
Deuxièmement le drainage par la surface de rupture est couplé avec une perte d'eau vers la nappe profonde. Ce contraste de perméabilité correspond aux structures de basculement (crevasses) superficielles et ainsi la réactivation du glissement ne peut se faire que par un apport profond d'eau (fusion des neiges, pluies) drainé par des failles reconnues à plus grande échelle ou par des précipitations localisées exceptionnelles.

#### 4.4.3 Hydro-géophysique permanente (surveillance) ou Time Laps Survey :

La compréhension des mécanismes régissant les processus d'instabilités gravitaires est actuellement limitée par le manque de données quantitatives fiables. Les interactions entre les divers facteurs de contrôles rendent difficile l'élaboration de modèles physiques et numériques pertinents, du fait des lacunes existantes quant aux différents facteurs déclenchants qui sont actuellement peu quantifiable. Dans ce contexte on ne peut anticiper les phases paroxysmales et ce en termes de localisation spatio-temporelle et d'intensité du phénomène. De plus, il est nécessaire de contraindre les différentes modélisations, les bases de données statistiquement et corrélativement admissibles.

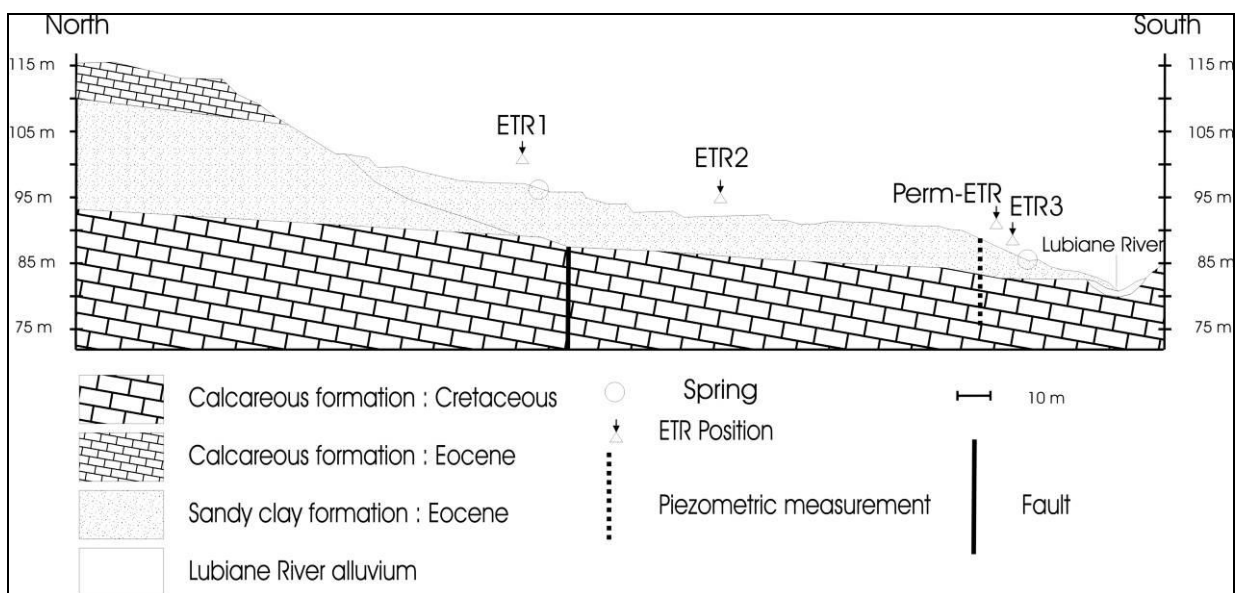
Nous avons constaté au travers des expériences menées durant les cinq premières années (à Géosciences Azur) que la tomographie semi-permanente pouvait au même titre que les inclinomètres, les GPS, les tiltsmètres, .... être considérée comme un outil de surveillance des mouvements gravitaire. À l'heure actuelle de très nombreux capteurs de mouvements sont développés par les sismologues, les topographes, les chimistes (Mendoza, 2002) pour identifier et analyser les processus rupturés. C'est ainsi que l'ensemble de la communauté scientifique tente de développer des capteurs permettant d'améliorer notre connaissance de la cinématique, voir même de la « respiration » des versants. Cette approche d'observation est actuellement la meilleure solution pour comprendre ces phénomènes et l'une de nos tâches les plus importantes est l'expérimentation, l'observation et le développement de capteurs à différentes fréquences de mesure : les stations multi-paramètres, multifréquences et ceci sur des sites observatoires. Cette double notion et plus particulièrement celle d'observatoire est importante, car elle permet de comparer sur un même objet différent technique de mesures et de pouvoir les comparer. C'est avec cette finalité que nous avons voulu, sur la base de notre expérience de la surveillance de la Clapière et d'imagerie dynamique semi-passive, montrer que la géophysique électrique pouvait devenir un outil d'aide à l'analyse et à l'interprétation des fluides circulant dans les mouvements de terrain. En cela l'imagerie dynamique quasi permanente ou time laps survey, peut devenir un outil de mesure des précurseurs aux phases paroxysmales des glissements de terrain.

Nous avons donc, sur un glissement de terrain en zone urbanisée, mis en place plusieurs dispositifs de mesure géophysiques, inclinomètres, piézométriques, tachéométriques et bientôt hydrochimiques. Ce travail a mis deux ans pour démarrer (juillet 2006) et depuis deux ans il fonctionne sur la base d'une mesure quotidienne d'hydrogéologie, de pluviométrie et de géophysique électrique. La principale contrainte de l'instrumentation permanente hydrogéophysique est hélas financière, car elle nécessite la disponibilité totale d'un système d'acquisition. Nous avons grâce à plusieurs projets de recherche acquis deux autres résistivimètres (2005 syscal 96 pro et 2008 syscal 48 pro) qui sont installés actuellement sur deux sites où l'on observe le signal hydrogéophysique (Vence depuis 2006 et Grasse fin 2008).



**Figure 27 : glissement de terrain du Pra de Julian**

Le premier glissement instrumenté est celui de Vence dans les Alpes Maritimes. Il s'agit du glissement du "Pra de Julian" qui est de type glissement rotationnel de moyenne grande ampleur ( $1.2 \cdot 10^6 \text{m}^3$ ) et qui a affecté la géomorphologie du site avec notamment la déviation de la rivière la Lubiane. Ses principales phases d'activités recensées débutent en 1950/1960 avec les premières constructions d'habitations et durant les années 1979/1980, de nouveaux désordres apparaissent à la faveur de fortes précipitations et d'une urbanisation croissante. Fin 2000, suite à des épisodes pluvieux importants (en décembre) le glissement est devenu intense avec l'ouverture de fentes de tension importantes dans la zone amont et une avancée du bourrelet frontal de plusieurs mètres. L'instrumentation standard (inclinomètre en forage, et piezomètre) qui a été réalisée par les collectivités locales a permis de localiser en profondeur la surface de rupture et d'établir la carte du niveau piézométrique.



**Figure 28 : coupe du glissement de terrain du Pra de Julian, avec la localisation des profils de prospection (ERT 1, 2, 3) et du profil permanent ( Perm-ERT).**

Après une première phase d'observation et de mesure par géophysique, nous avons constaté qu'il existait un système d'alimentation en eau complexe dans le glissement. Ce système est constitué d'une nappe libre alimentée par les eaux de surface et surtout par une faille drainante qui traverse le glissement. Cette faille drainante a été observée dès le début des analyses géophysiques et à l'intersection entre cette faille et le front du glissement nous avons observé une source pérenne. Nous donc mis en place un panneau de résistivité ayant pour objectif de trouver un signal hydrogéologique, comme nous l'avons fait sur la Clapière (Lebourg et al, 2005, Jomard et al. 2007 et Binet et al., 2007). À l'heure actuelle nous avons acquis une base de données de 750 jours de mesure en continu (au 1<sup>er</sup> septembre 2008), couplée à des mesures pluviométriques et piézométriques. On constate généralement que pour un même dispositif, la répétition de mesures électriques espacées dans le temps permet d'analyser les variations électriques au sein d'un massif (Goyal et al., 1995 ; Descloitres et al., 2003, 2008 ; Lebourg et al., 2005, 2008), car les variations sont principalement dues aux fluctuations de la teneur en eau de la subsurface (Aaltonen, 2001). Rendre compte des variations dans l'ensemble du sol et plus particulièrement d'une faille en profondeur pose actuellement de nombreux problèmes;

- méthodologiques (nécessité de maintenir une fréquence de mesure physiquement admissible pour rendre compte des systèmes hydrauliques rapides),
- extraction d'une information par des logiciels standards bidimensionnels : RES2DINV (Loke, 1996), avec l'option « Time Lapse Inversion » (Loke, 1997) qui est un outil inclus dans le logiciel d'inversion électrique RES2DINV (Loke, 1996). Cette fonction permet d'inverser une série de 12 profils au **maximum**. Nous sommes actuellement en présence de 750 profils, il n'est pas possible de traiter les informations par ce procédé,
- extraction d'une information par des logiciels standards tridimensionnels : RES3DINV (Loke, 1996), où l'on pose l'hypothèse que chaque jour (profil) est une distance  $n$ , qui se matérialise par une augmentation de  $y$ . là encore nous sommes limités à 70 jours ou  $70n$  et là aussi la théorie de l'inversion 3D n'est pas respectée,
- extraction d'une information brute et le traitement par la mise en évidence d'une série statistique d'ou on pourrait localiser et individualiser le signal hydrogéophysique. C'est actuellement notre piste de travail :
  - analyser les séries journalières et éliminer les erreurs par des filtres,
  - étudier la distribution statistique journalière (en mode normal et log-normal)
  - analyser la matrice de Données initiale constituée de 750 jours (profils) avec respectivement 574 points de mesures par jours :  $[\rho_{ij}]$
  -

L'ensemble des processus de l'analyse des données est présenté dans la thèse de Mickael Hernandez (novembre 2008).

Actuellement nous pouvons parfaitement corréler les variations de la valeur moyenne des résistivités journalières avec les évènements pluvieux, mais aussi avec les réponses de l'aquifère



dans son ensemble. Lorsque l'on analyse en détail les « crises » pluvieuses on s'aperçoit grâce à l'hydrogéophysique qu'il existe différents comportements du massif associés aux paramètres utilisés dans l'analyse des séries statistiques de la distribution des résistivités. En effet, la majorité des paramètres de position et de dispersion (la moyenne, l'écart type, le coefficient d'asymétrie et la covariance) montre trois phases distinctes :

- une **première phase** correspondant à la phase la plus stable : faibles fluctuations des paramètres de position et de dispersion. Au cours de cette période, les variations résistivométriques et piézométriques ne sont pas clairement corrélées. Cependant, le signal électrique enregistre les pluies comme des perturbations ponctuelles.
- une **deuxième phase** plus courte correspondant à de faibles événements pluvieux et à aucune fluctuation significative du niveau piézométrique. Cette deuxième phase est interprétée comme une perturbation momentanée du signal électrique.
- une **troisième phase** correspondant à la période où la variation du signal électrique s'ajuste aussi bien à l'évolution du niveau piézométrique qu'aux événements pluvieux.

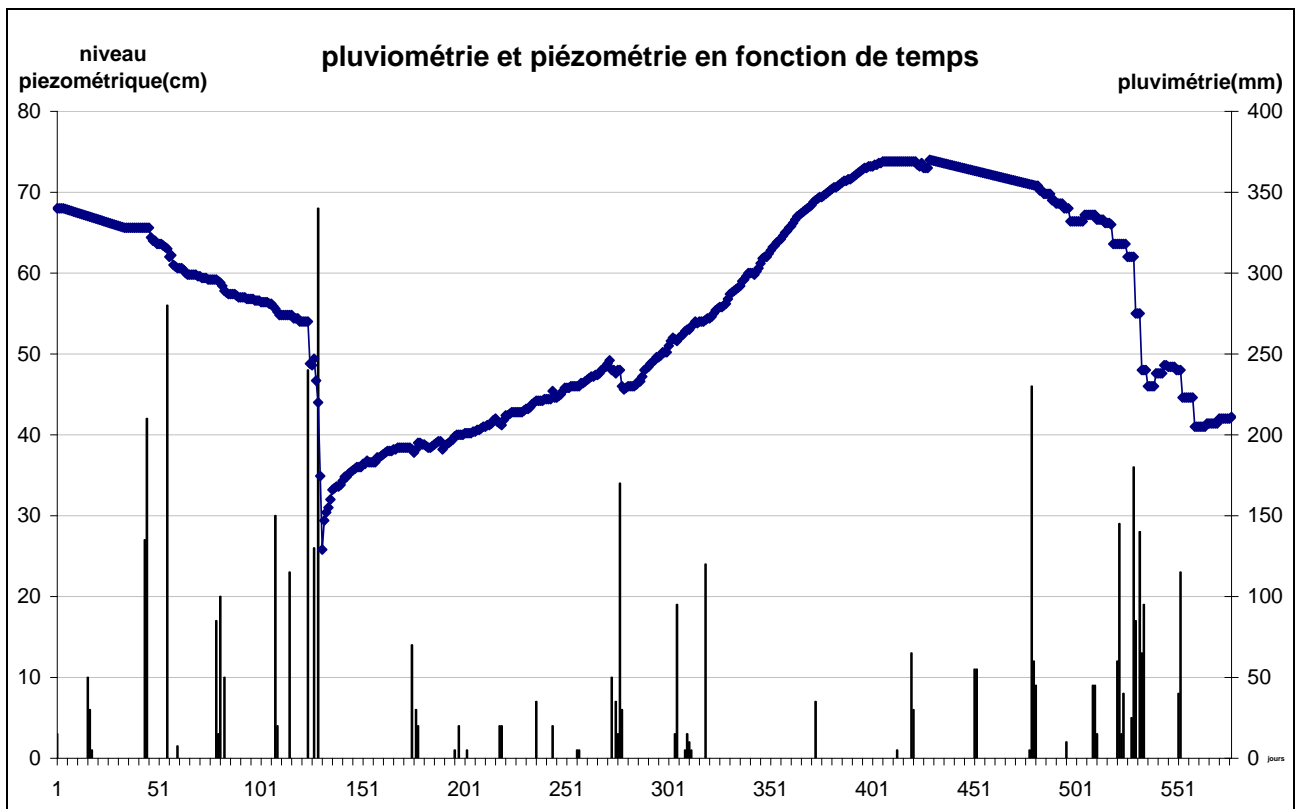
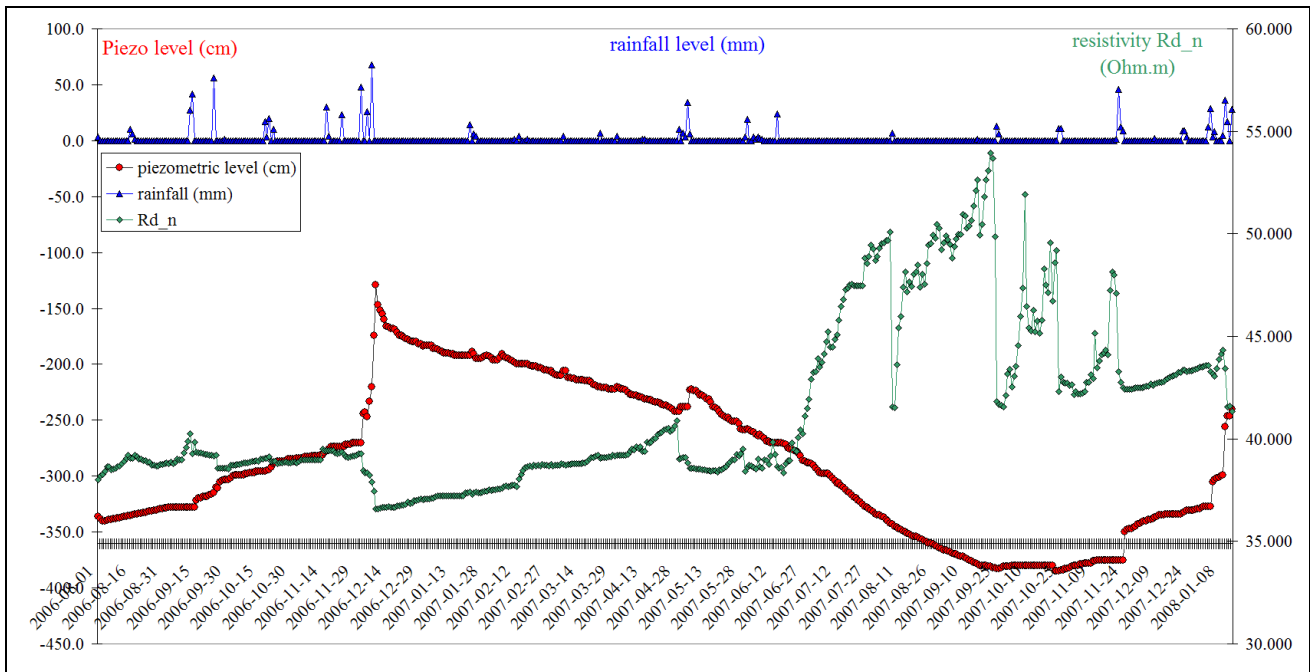


Figure 29 : Représentation des données pluviométriques et piézométriques du glissement de Vence pour une durée de 560 jours.

Indépendamment de ces trois types de phases, on constate que le massif se comporte de deux manières :

La première quand le massif subit une pluie avec une remontée du niveau piézométrique de l'ordre de plusieurs centimètres et le signal électrique diminue aussi. Cette corrélation multiple montre le très bon couplage des trois variables mesurées et un comportement normal du massif : il pleut, l'eau monte et les résistivités diminuent significativement. En cela nous avons déjà une bonne variable corrélative.



**Figure 30 : Représentation des données pluviométriques, piézométriques et résistivimétriques du glissement de Vence pour une durée de 538 jours.**

Le deuxième comportement, beaucoup plus surprenant, est observé et mesuré lors des phases d'intenses évènements pluvieux (en décembre 2006 et janvier 2008). 24h après les plus forts évènements pluvieux de l'hiver, les résistivités chutent brutalement (jusqu'à un minimum jamais atteint) et dans les 48h qui suivent, le niveau piézométrique augmente brutalement de 180 cm... soit plus de  $3.10^4 m^3$  en quelques heures. L'analyse dynamique de ce phénomène nous explique ou nous donne une piste de travail sur la ou les causes de différentes phases de rupture de glissement avec un phénomène de Pulse hydrodynamique dans le système. Notre prochaine étape portera sur le couplage déplacement /hydrogéophysique. Durant l'hiver 2008/2009, nous allons mettre en place sur l'ensemble du glissement un système de surveillance, couplant des mesures sur inclinomètres biaxes, sur capteurs piézométriques en forage, sur panneaux de résistivités (toutes les 6 heures) et sur la mesure pluviométrique. Grâce à ce dispositif nous pourrons être à même de mesurer les précurseurs au déplacement de ce glissement, car il doit exister un laps de temps précédant la crise morphodynamique où l'eau de la faille arrive en masse, qui devrait être détectable par une mesure ciblée de la résistivité.

## 4.5 Perspectives de recherche

Mes activités de recherche m'ont permis d'acquérir au cours des années une forte compétence dans le domaine de l'analyse des aléas gravitaires et aussi dans l'utilisation et le développement d'outils géophysiques et mécaniques. Au-delà des aspects purement scientifiques, sur lesquels je vais revenir, j'ai aussi développé un important réseau de relations avec d'autres laboratoires (§3.1.6 p.11), mais aussi avec les partenaires locaux, et certains industriels. Ces relations permettent non seulement de prendre conscience des attentes et demandes du monde socio-économique, ce qui nous permet de mieux former nos étudiants et de leur donner les outils nécessaires à une bonne intégration professionnelle. Dans ce même temps, ces partenaires prennent eux aussi conscience de l'importance de collaborer avec les acteurs de la recherche. Ce travail à long terme et de longue haleine me permet actuellement de mettre en place des collaborations fructueuses : Cabinet V. Risser (Bourse CIFFRE), Mairie de Vence (contrat jusqu'en 2012 pour la surveillance du glissement de Vence), Mairie de Grasse (participation au projet de recherche MIRACLE), la Lyonnaise de Eaux avec un financement de bourse CIFFRE pour septembre 2009, ....

Ces activités de recherche « appliquées » ne peuvent suppléer la recherche fondamentale, mais elles peuvent aider le financement d'une recherche plus académique. Dans les années à venir, je vais continuer mes recherches afin de :

- Poursuivre les travaux sur la compréhension des processus d'altération, mais avec un volet de validation au travers de la modélisation numérique et analogique,
- Poursuivre l'instrumentation des mouvements de terrain par tomographie électrique dynamique en 3D, donc en 4D avec l'aspect temporel, et ainsi apporter de nouveaux éléments aux systèmes de mesures multi-paramètres, multi-échelles sur des sites voués à être des observatoires des mouvements gravitaires,
- De réitérer des expériences d'injection de fluide avec des hydrogéologues compétents, afin d'améliorer le couplage hydrogéophysique,
- Porter un projet de recherche national ou international, transdisciplinaire sur l'impact des activités anthropiques et des changements climatiques sur l'évolution temporelle des aléas gravitaires et de la vulnérabilité. Projet de recherche dont la zone géographique serait située au niveau du pourtour méditerranéen et dont je présente les pistes de travail dans les chapitres : §4.5.1, §4.5.2 et §4.5.3



#### 4.5.1 L'évolution temporelle des aléas gravitaires face aux changements climatiques et aux impacts anthropiques

La recherche ou les perspectives de recherche que je tente de mettre en place actuellement, sont très largement transdisciplinaires. Cette transdisciplinarité est apparue comme étant fondamentale pour aller de l'avant dans la compréhension des processus d'instabilités gravitaires et ceci principalement au niveau scientifique, mais aussi en se posant des questions sur l'intégration de cette science dans « l'humain ». En effet, travailler sur les risques gravitaires, ou plutôt sur les aléas gravitaire montre qu'il existe peu de relations entre les avancées de nos recherches et la nécessité d'interagir avec l'occupation du territoire par l'homme. Il ne s'agit là d'intégrer notre démarche et réflexion temporelle sur l'évolution des aléas avec la prise en compte des modifications liées à l'anthropisation et aux changements climatiques. C'est au travers d'un projet de recherche que j'ai initié début 2008 la mesure des influences relatives à l'anthropisation et aux changements climatiques sur l'évolution temporelle des aléas gravitaires et de la vulnérabilité.

Cette perspective de recherche est volontairement transdisciplinaire : *La pluridisciplinarité concerne l'étude d'un objet d'une seule et même discipline par plusieurs disciplines à la fois.* « Par exemple, la philosophie marxiste peut être étudiée par le regard croisé de la philosophie avec la physique, l'économie, la psychanalyse ou la littérature. L'objet sortira ainsi enrichi du croisement de plusieurs disciplines ». La connaissance de l'objet dans sa propre discipline est approfondie par un apport pluridisciplinaire fécond. La recherche pluridisciplinaire apporte un *plus* à la discipline, mais ce "plus" est au service exclusif de cette même discipline. Autrement dit, la démarche pluridisciplinaire déborde les disciplines, mais sa finalité reste inscrite dans le cadre de la recherche disciplinaire (Nicolescu, 1996).

L'objectif de ce projet de recherche transdisciplinaire est donc d'améliorer la compréhension des processus ruptuels, des processus d'altération ainsi que leur cinématique, et la politique de prévention du risque mouvement de terrain en zone urbanisée, et donc de contribuer à diminuer la vulnérabilité pour un développement urbain futur durable. Ce projet se place dans une démarche de géoprospective pour mieux prévenir ce risque à long terme, soit à l'horizon 2099. Les méthodes de la géoprospective sont particulièrement adaptées aux nouveaux enjeux du territoire durable, notamment en matière d'urbanisme et d'aménagement du territoire. Ce projet vise à analyser les impacts du changement climatique au regard de la modification des variables et des facteurs déclenchants (essentiellement la variation du forçage climatique, l'évolution des propriétés mécaniques vis-à-vis des processus d'altération anthropique, climatique ou naturel) qui caractérisent les aléas gravitaires et ceci sur la base de bilans climatiques passés et des projections climatiques futures (2010-2099, scénarios climatiques).

La proposition de recherche porte également sur la modélisation de l'évolution spatio-temporelle de l'aléa, de la vulnérabilité et de la résilience des systèmes urbains face aux mouvements de terrain pour une meilleure compréhension des risques. En effet, la mise en place

d'une politique efficace de prévention des risques repose sur une bonne évaluation de l'aléa, de l'intensité, de la durée des phénomènes et leur zone d'expansion, mais aussi sur une identification des secteurs exposés aux aléas, de leur vulnérabilité et de leur résilience. Pour être mené à bien, ce projet s'applique aux anthroposystèmes du littoral méditerranéen où croissance urbaine, saturation des littoraux, constructions en zone dangereuse, dynamiques d'aléas et de vulnérabilités sont fortement imbriquées.

Les terrains d'étude proposés cumulent deux caractéristiques importantes (i) l'urbanisation y a été faite sur des pentes supérieures à 10/20° dans un contexte géologique défavorable (urbanisation, aléa et vulnérabilité sont ainsi en interaction) (ii) une croissance démographique importante passée et à venir.

#### **4.5.2 Les enjeux des prochaines décennies sur la récurrence des instabilités gravitaires**

Depuis une vingtaine d'années, les études sur les risques se multiplient à l'échelle internationale (Décennie Internationale de Prévention des Catastrophes Naturelles 1990-2000), nationale (programmes du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, du CNRS) et à l'échelle régionale et locale. De même, l'étude et la compréhension des risques gravitaires font depuis quelques décennies l'objet de nombreux programmes de recherche et les processus rupturés associés (aléas) sont globalement bien identifiés. Cependant, les recherches menées portent essentiellement soit sur des territoires peu anthropisés (souvent dans les zones de montagne), soit sur des mouvements de versants déjà actifs, généralement de grande ampleur et à un instant  $t$  de l'étude. Les perspectives de recherche ou projets de recherches que je propose ambitionnent de traiter les aléas gravitaires et les vulnérabilités associées dans un espace fortement anthropisé. Il y a là un véritable enjeu puisque nous avons constaté que l'Homme pouvait, dans un laps de temps court, changer et modifier de manière conséquente son environnement et aller même jusqu'à la réactivation de paléoglislements et même de paléo-DSL dans des zones maintenant fortement anthropisées.

Par ailleurs, d'une manière générale, la cartographie des risques gravitaires n'offre pas de perspectives temporelles. Elle est figée dans le temps et elle ne prend pas en compte l'évolution de tous les facteurs déclenchants qui concernent l'aléa et les enjeux considérés. Cette évolution temporelle peut être de plusieurs ordres :

- de la journée (événements pluvieux, intégrés dans des méthodes type CPGT, LPM vulnérabilités différenciées selon les périodes jour/nuit)
- de l'année (prise en compte des variations saisonnières, applications sur des sites instrumentés),
- des décennies (changement climatique, vulnérabilité évolutive selon la croissance urbaine et la dynamique de l'aléa...).

Cette approche couplée visera à mieux comprendre les risques naturels en menant une approche transdisciplinaire et systémique sur l'aléa, la vulnérabilité et leurs interactions. Il s'agit de prendre en compte le développement de l'aléa mouvement de terrain anthropisé et de la vulnérabilité.

Pour comprendre et discrétiser le rôle de l'anthropisation et des variations climatiques dans les processus ruptuels, il est donc important d'analyser corrélativement les facteurs déclenchants (variables définissant l'aléa) sur différents secteurs d'étude, grâce aux analyses de terrain, aux études historiques et par l'instrumentation. Nous pourrions analyser ces facteurs déclenchants sur le long et le court terme :

- La diminution de la résistance mécanique due à l'altération et aux processus géologiques de transformation causés par l'action chimique et physique des agents atmosphériques sur les matériaux,
- La transformation des versants par l'aménagement du territoire,
- la modification de la circulation des fluides et les concentrations dans les exutoires avec modification des variables perméabilités... et les oscillations dues aux variations de la pression hydrique dans le massif.

Cette recherche nécessite donc une approche transdisciplinaire permettant à la fois d'intégrer l'impact de la dynamique urbaine sur la dynamique des mouvements de terrain, mais aussi les effets de ces derniers sur la vulnérabilité urbaine. En cela les compétences et les connaissances des géophysiciens, des géologues et des géographes nécessitent d'être requises. La cartographie du risque pourra être établie par croisement des cartes d'aléa (Rezig, 1998, Maquaire et Thierry, 2006) et de vulnérabilités (Chardon, 1994, Leone 1999).

Les concepts de vulnérabilité, de résilience et les notions associées de sensibilité, d'adaptabilité, d'effets de seuil, de bassins d'attraction, etc... sont de plus en plus utilisés dans les recherches transdisciplinaires menées sur l'étude de la dimension humaine sur les changements à échelle planétaire (Janssen et Ostrom, 2006). À l'heure actuelle, il semble y avoir un consensus sur la notion de vulnérabilité. Cette dernière, qui représente le niveau de conséquences prévisibles de l'aléa sur les enjeux (Manche, 1997), fait référence soit à un niveau d'endommagement potentiel d'une société en cas de manifestation d'un phénomène, soit à la capacité d'un système à se soustraire ou à surmonter une crise (Blaikie et al. 1994, Wisner, 1998, Provitolo, 2007). Le concept de résilience est en effet utilisé dans un nombre croissant de travaux transdisciplinaires (Kein et al., 2003) concernés par les interactions nature / société, notamment les travaux portant sur la vulnérabilité des systèmes et la réduction des catastrophes (United Nation/ISDR, International Strategy for Disaster Reduction, 2002; IHDP, International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, 2003).

#### **4.5.3 Les enjeux d'une recherche transdisciplinaire**

Ce projet est basé sur des données de terrain, d'instrumentation hydrogéophysique et de mesures par une approche mécanique de l'altération des formations géologiques présentes. Les questions auxquelles nous voudrions répondre sont multiples : lorsqu'on travaille sur le risque et donc l'aléa, on se place dans un contexte géologiquement fixe, temporellement stable, où de nombreuses

variables peuvent agir, indépendamment ou corrélativement. Cette approche vise à répondre aux questions suivantes :

- Quelles sont les évolutions temporelles (quelques décennies) des variables (pente, propriétés mécaniques, niveau d'eau dans les sols/roches altérées) utilisées pour la quantification de l'aléa ?
- Quels sont les effets météorologiques à court et à long terme (variation des ressources en eau et température) et leurs influences dans les changements multi-physiques sur la stabilité des terrains ?
- Quel est l'impact de l'urbanisation sur les variables permettant de quantifier l'aléa mouvement de terrain ?
- Une évolution de la susceptibilité induit-elle une évolution de la vulnérabilité et donc une évolution du risque mouvement de terrain ?
- Comment quantifier l'impact de ces effets spatiaux et temporels sur des environnements urbains ?
- Quels sont les enjeux majeurs d'une ville ou structure urbaine face à différents niveaux de mouvements de terrain ?
- Quels sont les risques encourus par les populations et les infrastructures et ce, via des mesures géologiques, géophysiques, hydrologiques et hydrogéologiques utilisant diverses techniques sur le terrain ?
- Quelle est la résilience du système urbain face aux mouvements de terrain ?

Nous devons nous intéresser aux mécanismes de déclenchement des aléas et ceci en relation étroite avec l'occupation humaine, afin de replacer l'étude des risques dans une analyse diachronique (depuis le passé récent et projetée dans l'avenir). Le constat actuel montre que l'urbanisation se développe sur des zones à aléa de plus en plus élevé et que les variables mécaniques et physiques qui caractérisent l'aléa sont modifiées par leurs propres évolutions naturelles (processus d'altération), mais aussi par l'anthropisation. Elles peuvent ainsi diminuer ou augmenter la probabilité d'occurrence spatiale des phénomènes pour plusieurs facteurs de prédisposition environnementaux. Il s'agit de savoir où, quand, jusqu'où et comment ces évolutions se produisent sur une échelle de temps comprise entre le temps géologique et le temps anthropique.

# 3<sup>ème</sup> Partie

## **Publications**

## 5 PUBLICATIONS

### 5.1 Publications articles (23)

Voici la liste des articles qui sont en cours d'évaluation (6) ou qui sont publiés (17) depuis mon intégration au laboratoire Géosciences Azur, principalement avec mes étudiants en thèse, mais aussi ceux que j'ai écrits avec mes paléo-collaborateurs de Bordeaux...et non crypto-collaborateurs...

#### Articles en cours d'évaluation :

- (A24) E. Tric, T. **Lebourg**, H. Jomard, J. Lecossec, Study of large-scale deformation induced by gravity on the La Clapière landslide (Saint-Etienne de Tinée, France) using numerical and geophysical approaches. Submitted to Applied Geophysics.
- (A23) S. El Bedoui, T. **Lebourg**, F. Cappa et Y. Guglielmi. 2009. Numerical analysis of progressive strength degradation of rocks promoting failure in a large slope over the past 10000 years: Insights from La Clapière rockslide area in the Southern French Alps. Submitted to Terra Nova.
- (A22) S. El Bedoui, T. Bois, H. Jomard, G. Sanchez, T. **Lebourg** et al. 2009, Paraglacial gravitational deformations in SW Alps: Evidence from field investigations, <sup>10</sup>Be cosmogenic dating and physical modelling. Under submission to the Geological Society London (Special Issue Slope Tectonics).
- (A21) Jomard H., **Lebourg** T., Guglielmi Y and Tric E., 2009. Electrical imaging of the sliding geometry and fluids associated to a deep seated landslide, example of the la Clapiere landslide (France). Under correction to Earth Surface Processes and Landforms.
- (A20) S. El Bedoui, T. **Lebourg**, Y. Guglielmi & M. Hernandez. 2008. Control of slope deformations in high seismic area: results from Gulf of Corinth observatory site (Greece). Under correction for Engineering Geology.
- (A19) **Lebourg** T. and El Bedoui S., 2009. Time Laps survey of fluids by 2D electrical tomography: the "Vence" landslide site (Alps-Maritimes, SE France). Submitted to Engineering Geology.

#### Articles évalués et/ou publiés:

- (A18) Hernandez M., **Lebourg** T., Risser V., Tric E., 2008. LPC® methodology as a tool to create real time probabilistic cartography of the gravitational hazard. Application on the municipalities of Isola». Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria. Under correction.
- (A17) Jomard H., Guglielmi Y, **Lebourg** T., 2008. Morpho-tectonic control of gravitational movements in rock slopes: a morphological analysis in the western part of the Argentera massif. Under correction for Geomorphology.

- (A16) Hernandez, M., **Lebourg**, T., Jomard, H., El Bedoui, S., 2008. Mechanical properties variations of weathered granular gneissic material in trenches and scarps nearby the La Clapiere landslide (France). accepted to Engineering Geology.
- (A15) S. El Bedoui, Y. Guglielmi, T. **Lebourg** and J.L. Pérez. 2008. Estimation of deep seated progressive failure propagation rates in a fractured rock slope over a 10 kyears period : results from the « La Clapière » slope (Southeastern French Alps). Under press to Geomorphology, December 2008.
- (A14) Binet S., Jomard H., **Lebourg** T., Guglielmi Y., Bertrand C., Mudry J., 2007. Experimental analysis of groundwater flow through a landslide slip surface using natural and artificial water chemistry tracers. Hydrol. Process, vol 21, issue 25, 3463-3472.
- (A13) Jomard H., **Lebourg** T., Binet S., Tric E. and Hernandez M., 2007. Characterisation of an internal slope movement structure by hydro geophysical surveying. Terra Nova, Volume 19, Issue 1: 48-57
- (A12) Jomard H., **Lebourg** T., and Tric E., 2006. Identification of the gravitational discontinuity in weathered gneiss by geophysical survey: La Clapiere landslide (France). J. Applied Geophysics, vol. 62, issue 1, pp. 47-57.
- (A11) **Lebourg** T., Binet S., Tric E., Jomard H., and El Bedoui S. , 2005. Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4D evolution of the water pressure on part of a Deep Seated Landslide. Terra Nova, vol. 17, n°5, pp399-406.
- (A10) **Lebourg** T, Riss J., Pirard E., 2004. Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraines formations on the mechanical behaviour. Engineering Geology, vol 73, pp.37-50.
- (A9) **Lebourg** T., Fabre R., Clément B. et Frappa M., 2003. Different landslides on mountain sides in relation with the geological and geomorphological inheritance. Bull. Engineering Geology Environment, Vol 62, n°3, pp.221-229.
- (A8) **Lebourg** T., Riss J., Fabre R. et Clément B., 2003. Morphological characteristics of till formations in relation with mechanical parameters. Mathematical Geology, Vol. 35, n°7, pp. 835-852.
- (A7) Fabre R., Texier J.P., Clément B., **Lebourg** T., 2003. Méthode de localisation des moraines de convergence dans une ancienne vallée glaciaire (Pyrénées, France) : conséquences sur les instabilités des moraines et reconstruction des glaciers au Würm. Canadian Geotechnical Journal, T.40(2), pp. 419-434 .
- (A6) Fabre R., **Lebourg** T. et Clément B., 2002. Typologie et modèles géométriques de glissements de terrain : exemples dans les Pyrénées Atlantiques et Centrales. Revue Française de Géotechnique, n°99, pp.35-48.
- (A5) Dubois A., Odonne F., Massonnat G., **Lebourg** T. et Fabre R., 2002. Tectonic inversion and oblique mobilisation of a set of grabens : the use of analogue modelling in studying on fault plan. Structural Geology, volume n°24, issue 11, pp. 1741-1752.
- (A4) **Lebourg** T. et Frappa M., 2001. Mesures géophysiques pour l'analyse des glissements de terrain. Revue Française de Géotechnique. N° 95/96, pp. 33-40.

- (A3) Fabre R., Desrumaux C., **Lebourg T.**, Canerot, C. Majeste-Menjoulas, Y. Ternet, et V. James, 2001. Bulletin de la Société Géologique de France; Réponse aux observations sur la note « Les glissements rocheux du versant sud du Layens (vallée d'Aspe, Pyrénées occidentales), November 2001; v. 172; n°6; p. 779-784
- (A2) Fabre R., Desreumaux C., et **Lebourg T.**, 2001. Les glissements rocheux du versant sud du Layens (Vallée d'Aspe, Pyrénées occidentales). Bulletin de la Société Géologique de France, v.171, n°4, pp. 407-418
- (A1) R. Fabre, **T. Lebourg** et B. Clément, (2000). Les dépôts morainiques holocènes de la zone axiale pyrénéenne : approche déterministe de leur instabilité dans le secteur de Verdun sur Ariège (Pyrénées Centrales). Bull. Engineering Geology Environment, vol n°58, pp. 133-143.

## 5.2 Communications (41)

- (C41) **Lebourg T.**, El Bedoui S., Hernandez M., and Jomard H. 2008. Temporal survey of fluids by 2D electrical tomography: the “Vence” landslide observatory site (Alpes-Maritimes, SE France). X International Symposium on Landslides, Xiang, China, June 2008,
- (C40) S. El Bedoui, Y. Guglielmi, **T. Lebourg** and J.L. Pérez. (2008) Estimation of deep seated progressive failure propagation rates in a fractured rock slope over a 10 kyears period : results from the « La Clapière » slope (Southeastern French Alps). Congrès Slope Tectonics, Université de Lausanne (Suisse).
- (C39) Tric E., **Lebourg T.**, Jomard H., 2008. Study of large-scale deformation of the La Clapière landslide by a numerical modelling (Saint-Etienne de Tinée, France). X International Symposium on Landslides, Xiang, China, June 2008,
- (C38) El Bedoui S., **Lebourg T.**, Guglielmi Y. and Pérez JL., 2008. Tectonic controls of large rock-slides. X International Symposium on Landslides, Xiang, China, June 2008.
- (C37) M. Hernandez, **T. Lebourg**, V. Risser V., 2008. LPC methodology as a tool to create real time cartography of the gravitational hazard: Application on the municipalities of Menton (Maritimes Alps, France). X International Symposium on Landslides, Xiang, China, June 2008,
- (C36) Belle E., Grisey E., **Lebourg T.**, Mudry J., Aleya L., 2007. Spatialization and estimation of the leachate infiltration from the municipal solid waste landfill of Etueffont (France). A multidisciplinary approach : geophysics and water balance. Lisbonne, GEE, 8p.
- (C35) Hernandez M., **Lebourg T.**, Risser V., Tric E., 2007. « LPC® methodology as a tool to create real time probabilistic cartography of the gravitational hazard. Application on the municipalities of Menton and Isola (Maritimes Alps, France) ». Geotitalia.
- (C34) **Lebourg T.** and El Bedoui S., 2006. Multi parametric study of the “Vence” landslide, at different time and spatial scales (Alpes-Maritimes, France). EUG, Vienne.
- (C33) El Bedoui, **Lebourg T.** and Guglielmi Y. 2007. A method to estimate fractured rock slope strength degradation leading to large rockslides triggering : preliminary results from a morphostructural analysis coupled with <sup>10</sup>Be datations of The la Clapiere slope (Southern French Alps).



- (C32) Hernandez M., **Lebourg** T., Risser V., 2007. CPGT methodology as a tool to create real time probabilistic cartography of the gravitational hazard. *GeoItalia*, pp 62-76
- (C31) El Bedoui S., **Lebourg** T., Guglielmi Y, 2006. A method to estimate fractured rock-slope strength degradation leading to large rock-slides triggering: preliminary results from a morphostructural analysis coupled with <sup>10</sup>Be datations of the "La Clapière" slope (southern french Alps). *Hazards 2006*, 11th International Symposium on Natural and Human - induced hazards, University of Patras.
- (C30) **Lebourg** T. and El Bedoui S., 2006. Etude multi paramétrique d'un glissement de terrain: suivi géophysique temporel du glissement observatoire de Vence (Alpes Maritimes, France). RST, Dijon.
- (C29) El Bedoui S., **Lebourg** T., Guglielmi Y., Jomard H. and Perez JL, 2006. Processes of progressive failure of a rock-slope over a 10kyears period. Results from the "La Clapière" slope (French south Alps, France). RST, Dijon.
- (C28) Hernandez M., **Lebourg** T., Jomard H., El Bedoui S., 2006. Mechanical parameters evolution of weathered granular gneissic products in trenches and escarpments nearby great landslides. The case of the La Clapière landslide, France. EUG, Vienne.
- (C27) Jomard H., **Lebourg** T., and Guglielmi Y., 2006. Coupling deep seated gravitational slope deformation (DSGSD) and geodynamical context: preliminary results from a regional study in the Argentera Massif (Southern French Alps). EUG, Vienne
- (C26) C. Joanne, Th. **Lebourg**, S. Migeon, J.Y. Collot, G. Lamarche, H. Jomard, E. Tric, 2005. Study of the variability of mechanical parameters on sediments from a zone of submarine instabilities: Matakaoa avalanches system, South Kermadec subduction, New Zealand. EUG, Vienne.
- (C25) Martins-Campina B., **Lebourg** T., Riss J. et Fabre R., 2004. Les instabilités rocheuses du versant sud des Eaux-bonnes (Pyrénées-Atlantiques) : Rôle des facteurs géologiques. *Geo-environment international Symposium*.
- (C24) Sénéchal G., Rousset D., Gloaguen E., **Lebourg** T., 2004. High resolution seismic experiment within the low-noise underground laboratory (LSBB) of Rustrel (Provence), Near Surface, EAGE, Utrecht,
- (C23) **Lebourg** T., Binet S., Jomard H., Tric E., El Bedoui S., 2004. Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4D evolution of the water pressure in a part of a Deep Seated Landslides. IX International Symposium on Landslides, Rio, June 2004, pp. 850-855.
- (C22) S. Binet, H. Jomard, T. **Lebourg**, Y. Guglielmi, C. Bertrand, J. Mudry, A. Charmoille, J.M. Quenardel, 2004. Apport des méthodes électriques 3D à l'étude du comportement d'un pied de versant : interaction entre un mouvement superficiel et profond. (La Clapière ; Alpes Maritimes). CEG, INSA Lyon.
- (C21) Y. Conroux, O. Fabbri, T. **Lebourg**, V. Bichet, C. Petit, 2004. The Besancon earthquake (23/02/2004): reactivation of a late Hercynian fault. RST Strasbourg.
- (C20) **Lebourg** T., Tric E., Guglielmi Y., Cappa F., Charmoille A., Bouissou S., (2003). Geophysical survey to understand failure mechanisms involved on Deep Seated Landslides.

EGU, Nice.

- (C19) Martins Campina B., **Lebourg T.**, Riss J., Benabderrazik A. , Fabre R., (2003.) Relation between elongation factor and angle of friction from various outcrops. EGU, Nice.
- (C18) Tric E., Bouissou S., **Lebourg T.**, Jomard H. and Guglielmi Y., (2003). Study of large-scale mechanical properties and deformation by modeling of the La Clapière landslide by a numerical modeling approach (Saint-Etienne de Tinée, France). EGU, Nice.
- (C17) Fabre R., Martins-Campina B., **Lebourg T.**, Desreumaux Ch. et Clément B., 2002. Glissements rocheux dans les Pyrénées-Atlantiques : analyse des dispositifs géométriques favorisant les instabilités. RST Nantes.
- (C16) Clément B., Fabre R. and **Lebourg T.**, 2002. Instabilités de pentes rocheuses : Proposition d'une méthodologie servant à une aide à la décision. 9th IAEG Congress, Durban, South Africa.
- (C15) **Lebourg T.** et Riss J. 2001. Image Analysis of tills outcrop formations. 8<sup>th</sup> European Congress for Stereology and Image Analysis, Bordeaux, pp 21-32.
- (C14) **Lebourg T.**. 2001. Analyse géologique et mécanique de glissements de terrain dans des moraines des Pyrénées centrales et occidentales (France), Concours Jeune Chercheur (finaliste), Lille, pp. 352-359.
- (C13) **Lebourg T.**, Clément B., Fabre R. et Martins-Campina B., 2001. Cartes de coefficient de sécurité et d'aléa : sensibilité des facteurs. Colloque Fiabilité des Matériaux et des structures, pp 63-71.
- (C12) **Lebourg T.**, Riss J. et Clément B., 2000. Morphologie des grains et caractéristiques mécaniques macroscopiques : cas des moraines. Colloque Physique et Mécanique des Matériaux Granulaires, ENPC, t1, pp. 115-120.
- (C11) **Lebourg T.** et Fabre R , 2000. Glacial tills instability on mountainsides, influence of the geomorphologic inheritance and the heterogeneity, for forecasting the behaviour of slope movements. VIII International Symposium on Landslides, Cardiff, 26<sup>th</sup> to 30<sup>th</sup> June 2000, pp. 887-892
- (C10) **Lebourg T.**, Fabre R. et Clément B., 2000. Approche quantitative du risque appliqué aux moraines de la vallée d'Aspe. RST, Paris, p 176.
- (C9) Fabre R., **Lebourg T.**, et Clément B., 2000.. Relations entre glissements de terrain et structure tectonique dans deux vallées glaciaires françaises. RST, Paris, p. 129.
- (C8) **T. Lebourg**, J. Riss, R. Fabre et B. Clément (1999). Morphological characteristics of till formations in relation with mechanical parameters. Congrès sur les Biogéosciences, octobre 1999, Dijon .
- (C8) **Lebourg T.**, Frappa M. et Sirieix C. (1999). Reconnaissance des surfaces de rupture dans les formations superficielles instables par mesures électriques. Colloque GEOCAN, BRGM, Orléans, 4p.
- (C7) Fabre R, **Lebourg T.**, Riss J. (1999). Textural characteristics of tills formations. International Symposium on Imaging Applications in Geology, Liège 6-7 may 1999, pp. 85-88.
- (C6) Fabre R , **Lebourg T.**, Genot M., Clément B. et Riss J. (1999). Caractérisation de matériaux dangereux utilisés en construction : les amiantes. Congrès de l'AUGC, 6-7 mai 1999, Poitiers,

pp. 19-26.

- (C5) **Lebourg T.**, Fabre R et Riss J. (1999). Comparaison de la taille et de la forme des sables et des graviers de différentes moraines. 22<sup>ème</sup> ISS France, Ecole des Mines de Paris, 4 février 1999.
- (C4) **Lebourg T.**, Desreumaux C., Clément B. et Fabre R. (1998). Mouvements de terrain en relation avec des structures plicatives : le glissement rocheux du Layens (Vallée d'Aspe, Pyrénées Atlantique). Colloque Mouvements actuels de la surface terrestre et des massifs rocheux, Ecole de Physique des Houches, 5-6 octobre 1998, pp.74-75.
- (C3) Clément B., **Lebourg T.** et Fabre R. (1998). Stabilité et commodité d'utilisation de matériaux argileux du sud-ouest de la France en génie civil : minéralogie et paramètres géotechniques. Colloque MAGI'50, ENSG, Nancy 21-22 septembre 1998, pp. 21-26.
- (C2) Fabre R., Clément B. et **Lebourg T.** (1998). Les mouvements de terrain en Gironde (33) : cartes de risque et d'aléa. XVI<sup>ème</sup> Congrès Universitaire de Génie Civil, Reims 28-29 avril 1998, vol.2, pp. 380-387.
- (C1) **Lebourg T.** (1998). Analyse de la stabilité des glissements de terrain appliquée à des dépôts morainiques (Verdun sur Ariège, Pyrénées Centrales). Réunion des Sciences de la Terre, Brest 31 mars-3 avril 1998, p. 145.

### 5.3 Autres publications et rapports d'étude

Fabre R., Lebourg T., Clément B. (2001), participation à la rédaction du chapitre "les glissements de terrain" de l'ouvrage "*dépôts de pente continentaux. Dynamique et faciès.*" Ouvrage de la collection "Manuels et Méthodes".

Lebourg T. (2000). *Analyse géologique et mécanique de glissements de terrain dans des moraines des Pyrénées centrales et occidentales (France)*. Thèse d'Université, Université Bordeaux I. 362p.

Lebourg T., Frappa M. et Sirieix C., (1999). *Reconnaissance des surfaces de rupture dans les formations superficielles instables par mesures électriques*. PANGEA, n°31-32, pp. 69-72.

Lebourg T. (1997). *Analyse de la stabilité des glissements de terrain appliquée à des dépôts morainiques (Verdun-sur-Ariège, Pyrénées Centrales)*. Rapport de DEA, École Centrale Paris, 130 p.

Lebourg T. (1997). *Utilisation de quelques méthodes de prospection géophysique pour la détection des glissements de terrain*. Projet de recherche, École Centrale Paris, 90 p.

Lebourg T. (1996). *Étude des aquifères des champs de Chaunoy et de Cazaux*. ESSO, Recherche et Exploitation Pétrolière, août 1996, 60 p. (rapport confidentiel).

Lebourg T. (1996). *Création d'une base de données et cartographie informatique de la carte régionale du toit Jurassique du Bassin d'Aquitaine*. ESSO, Recherche et Exploitation Pétrolière, janvier 1996, 30 p. (rapport confidentiel).

Lebourg T. (1994). *Aperçu sur la macrofaune du gisement Burdigalien de Pont-Pourquey : réflexions sur la paléoécologie*. Réserve Naturelle Géologique de Saucats la Brède, 46p.

## 6 BIBLIOGRAPHIE

- Aaltonen, J., 2001. Ground monitoring using resistivity measurements in glaciated terrains. Dissertation TRITA-AMI-PHD 1042, Division of Land and Water Resources, Department of Civil and Environmental Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm.
- Agliardi, F., Crosta, G. and Zanchi, A., 2001. Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59(1-2): 83-102.
- Antoine P. (1992). – Les problèmes posés par l’instabilité des versants de grande ampleur - Aspects géologiques. – *Bulletin of the International Association for Engineering Geology*, 45, 9-24
- Azimi C., Desvarreux P., 1986. Étude et prévision des mouvements de terrains. *Revue As. Fran. de Topographie*, n° 28, pp. 8-14.
- Azimi C., Desvarreux P., 1996. Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrain. *Revue Française de Géotechnique*, n° 76, pp. 63-71.
- Bachmann D., Bouissou S., Chemanda A., 2006. Influence of large scale topography on gravitational rock mass movements: new insights from physical modelling. *Geophysical Research* 33, p. 1-4.
- Bachmann, D., Bouissou, S. and Chemanda, A., 2004. Influence of weathering and pre existing large scale fractures on gravitational slope failure: insights from 3-D physical modelling. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4: 711-717.
- Beck, A. C., 1968, Gravity faulting as a mechanism of topographic adjustment: *New Zealand Jour. Geol. Geoph.*, v. 11, p. 191-199.
- Bhandari et Jeyatharan, 1994. Landslides and other Mass Movements Including Failure of Cuttings in Residual Soils of Sri Lanka. *Proceedings of the National Symposium on Landslides in Sri Lanka Vol 1*, pp 73-82.
- Bieniawski Z.T., 1976. Rock mass classification in rock engineering, *Proceedings, Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg 1 (1976)*, pp. 97–1006.
- Bigot-Cormier, F. et al., 2005. Chronological constraints on processes leading to large active landslides. *Earth and Planetary Science Letters*, 235(1-2): 141-150.
- Binet S., Jomard H., Lebourg T., Guglielmi Y., Bertrand C., Mudry J., 2007. Experimental analysis of groundwater flow through a landslide slip surface using natural and artificial water chemistry tracers. *Hydrol. Process*, vol 21, issue 25, 3463-3472.
- Binet S., Jomard H., Lebourg T., Guglielmi Y., Bertrand C., Mudry J., 2007. Experimental analysis of groundwater flow through a landslide slip surface using natural and artificial water chemistry tracers. *Hydrol. Process*, vol 21, issue 25, 3463-3472.
- Blaikie P., Cannon T., Davis I., Wisner B., 1994, *At risk: natural hazards, people’s vulnerability and disasters*, London: Routledge, 284 p.
- Bonnard Ch., 1984. Risques d'instabilité. Approche pluridisciplinaire dans la détection des glissements de terrain, *Colloque sur les mouvements de terrains, Caen, France.*, n°1, pp. 309-316.
- Bovis, M. J., 1982, Uphill-facing (antislope) scarps in the Coast Mountains, southwest British

- Columbia: Geol. Soc. Am. Bull., v. 93, p. 804-812.
- Bromhead E.N., 1992. The stability of slopes. Glasgow, Blackie academic, 411 p.
- Cappa F., Guglielmi Y., Soukatchoff V., Mudry J., Bertrand C., Charvoille A., 2004. Hydromechanical modeling of a large moving rock slope inferred from slope levelling coupled to spring long term hydrochemical monitoring : example of the La Clapiere landslide (Southern alps, France). *Journal of hydrogeology*, 291, 67-90.
- Chardon A.C., Thouret J.C., 1994, Cartographie de la vulnérabilité d'une population citadine face aux risques naturels : le cas de Manizales, *Mappemonde*, n°4/1994, pp.37-40.
- Cojean R., 1994. Role of water as a triggering factor for landslides and debris flows. Int. Workshop on Floods and Inundations related to Large Earth Movements, Trent, Italy, pp.31-39.
- Descloitres, M., Ribolzi, O., Le Troquer, Y., 2003. Study of infiltration in a Sahelian gully erosion area using time-lapse resistivity mapping. *Catena* vol. 53, p. 229-253.
- Descloitres, M., Ruiz, L., Sekhar, M., Legchenko, A., Braun, J.J., Mohan Kumar, M. S., Subramanian, S., 2008. Characterization of seasonal local recharge using electrical resistivity tomography and magnetic resonance sounding. *Hydrol. Process.* Vol. 22, p. 384-394.
- Dramis F. and Sorriso-Valvo M., 1994. Deep-seated gravitational slope deformations, related landslides and tectonics. *Engineering Geology* 38 (3-4), p. 231-243.
- E. Tric, T. Lebourg, H. Jomard, J. Lecosse, Study of large-scale deformation induced by gravity on the La Clapière landslide (Saint-Etienne de Tinée, France) using numerical and geophysical approaches. Submitted to *Applied Geophysics*.
- Eberhardt, E., Stead, D. and Coggan, J., 2004. Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes - the 1991 Randa rockslides. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41: 69-87.
- El Bedoui S., Guglielmi Y., Lebourg T., Pérez J.L., 2008. Estimation of deep seated progressive failure propagation rates in a fractured rock slope over a 10 kyears period: results from the "La Clapière" slope (South-eastern French Alps). Under press for *Geomorphology*.
- El Bedoui, T. Lebourg, Y. Guglielmi & M. Hernandez. 2008. Control of slope deformations in high seismic area: results from Gulf of Corinth observatory site (Greece). Submitted to *Engineering Geology*
- Favre J.L., Gervreau E., Durville J.L., 1992. Prévoir l'évolution des mouvements de terrain. *Revue Française de Géotechnique*. n° 59, pp. 65-73.
- Frossard E., 1978. Caractérisation pétrographique et propriétés mécaniques des sables. Thèse d'université, Paris VI et ENSMP, 144p.
- Gallousi, C., Koukouvelas, I.K., 2007. Quantifying geomorphic evolution of earthquake-triggered landslides and their relation to active normal faults. An example from the Gulf of Corinth, Greece. *Tectonophysics*, v. 440, p. 85-104.
- Goodman R.E, Bray J.W., 1976. Toppling of rock slopes. Dans: *Rock Engineering*. American Society of Civil Engineers, Geotechnical Engineering Division Conference, Boulder, Colorado, vol. 2, p. 201-237.
- Goyal, V.C., Gupta, P.K., Seth, P.K., Singh, V.N., 1996. Estimation of temporal changes in soil

- moisture using resistivity method. *Hydrol. Process.* Vol. 10, p. 1147-1154.
- Hajiabdolmajid, V., Kaiser, P.K., 2002. Slope stability assessment in strain-sensitive rocks. *Proceedings of the ISRM International Symposium on Rock Engineering for mountainous regions, Funchal-Madeira*, p. 237-244.
- Heim A. (1932). – *Der Bergsturz und Menschenleben.* – Fretz und Wasmuth, Zurich, 218p.
- Hernandez et al, 2007, 2008
- Hernandez M., Lebourg T., Risser V., Tric E., 2008. LPC® methodology as a tool to create real time probabilistic cartography of the gravitational hazard. Application on the municipalities of Isola». *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*. Under correction.
- Hernandez, M., Lebourg, T., Jomard, H., El Bedoui, S., 2008. Mechanical properties variations of weathered granular gneissic material in trenches and scarps nearby the La Clapiere landslide (France). accepted to *Engineering Geology*.
- Hippolyte, J.-C. et al., 2006. The recent fault scarps of the Western Alps (France): Tectonic surface ruptures of gravitational sacking scarps? A combined mapping, geomorphic, levelling, and <sup>10</sup>Be dating approach. *Tectonophysics*, 418, 255-276.
- Hutchinson, J.F., Methods of locating slip surfaces in landslides, *Bulletin of the association of engineering geologists*, XX, pp. 235-252, 1983.
- IHDP, International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, 2003
- Janssen et Ostrom, 2006. Resilience, vulnerability, and adaptation: a cross-cutting theme of the International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, *Global Environmental Change*, Vol. 16, pp. 237-239.
- Jomard H., 2006. Analyse multi-échelles des déformations gravitaires du Massif de l'Argentera Mercantour. PhD Thesis, University Nice Sophia Antipolis, pp.246.
- Jomard H., Guglielmi Y, Lebourg T., 2008. Morpho-tectonic control of gravitational movements in rock slopes: a morphological analysis in the western part of the Argentera massif. Under correction for *Geomorphology*.
- Jomard H., Lebourg T., and Tric E., 2006. Identification of the gravitational discontinuity in weathered gneiss by geophysical survey: La Clapiere landslide (France). *Applied Geophysics. J. Applied Geophysics*, vol. 62, issue 1, pp. 47-57.
- Jomard H., Lebourg T., and Tric E., 2006. Identification of the gravitational discontinuity in weathered gneiss by geophysical survey: La Clapiere landslide (France). *J. Applied Geophysics*, vol. 62, issue 1, pp. 47-57.
- Jomard H., Lebourg T., Binet S., Tric E. and Hernandez M., 2007. Characterisation of an internal slope movement structure by hydro geophysical surveying. *Terra Nova*, Volume 19, Issue 1: 48-57
- Jongmans et Garambois, 2006. Surface geophysical characterization and monitoring : a review. BSGF
- Kert C., 1995, Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques ; Rapport de « Les séismes et les mouvements de terrain » pp 241 – 280.
- Krumbein W.C., Sloss L.L., 1963. *Stratigraphy and Sedimentation*. 2<sup>nd</sup> ed., James Gilluly and A.O.

- Woodford Editors, 660 p.
- Lebourg T., Riss J., Pirard E., 2004. Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraines formations on the mechanical behaviour. *Engineering Geology*, vol 73, pp.37-50.
- Lebourg T., Binet S., Tric E., Jomard H., and El Bedoui S. , 2005. Geophysical survey to estimate the 3D sliding surface and the 4D evolution of the water pressure on part of a Deep Seated Landslide. *Terra Nova*, vol. 17, n°5, pp399-406.
- Lebourg T., Fabre R., Clément B. et Frappa M., 2003. Different landslides on mountain sides in relation with the geological and geomorphological inheritance. *Bull. Engineering Geology Environment*, Vol 62, n°3, pp.221-229.
- Lebourg T., Riss J., Fabre R. et Clément B., 2003. Morphological characteristics of till formations in relation with mechanical parameters. *Mathematical Geology*, Vol. 35, n°7, pp. 835-852.
- Leone F., 1999, Implications territoriales et socio-économiques des menaces naturelles une approche spatiale assistée par SIG en Martinique (Antilles françaises), *Annales de géographie*, n°627-628, pp. 549-573
- Loke M.H., 1997. *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies*, 50p.
- Loke, M. H., 1996. *Tutorial: 2D and 3D electrical imaging survey*. 128p.
- Loke, M.H., 1999. *RES2DINV—rapid 2-D resistivity and IP inversion using the least-squares method*. Software manual, 81 pp.
- Loke, M.H., Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. *Geophys. Prospec.* 44, 131–152.
- Malatrait, 1975. *Mouvements gravitaires dans le territoire couvert par la feuille St-Jean-de-Maurienne (Savoie) à 1/50000<sup>e</sup>*. Orléans, BRGM, 218 p.
- Manche Y., 1997, Proposition pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles, *Revue de Géographie Alpine*, n°2 / 1997, pp. 49-62.
- Maquaire O., Thierry Y., Malet JP., Puissant A., 2006, *Evaluation et cartographie par SIG du risque glissement de terrain. Applications aux Alpes du Sud*, Colloque Interactions Nature – Société – Analyse et Modèles, La Baule.
- Mayoraz , Cornut T., Djukic D., Vulliet L., 1997. Neural networks : a tool for the prediction of slope movements. *XIV CIMSTF*, Hambourg, pp. 703-706.
- Mendoza, J.A., 2002. *Geophysical and hydrogeological investigations in the Rio Sucio watershed, Nicaragua*. Lic Thesis ISBN 91-972406-0-X, Lund University, Sweden, 60pp.
- Meric, 2006. *Etude des mouvements de terrain par méthodes géophysiques*. Thèse LIRIGM Grenoble, 247 pages.
- Nicolescu B. , 1996. *La transdisciplinarité*, Manifeste, Éditions du Rocher, Monaco.
- Petley, D.N., Mantovani, F., Bulmer, M.H. and Zannoni, A., 2005. The use of surface monitoring data for the interpretation of landslide movement patterns. *Geomorphology*, 66: 133-147.
- Plummer, L.N., and Busenberg, E., 1999, Chlorofluorocarbons, *in* Cook, P., and Herczeg, A., eds.,

- Environmental tracers in subsurface hydrology, chapter 15: Kluwer Academic Press, p. 441-478.
- Pollet N., 2004. Mouvements gravitaires rapides de grandes masses rocheuses: Apport des observations de terrain à la compréhension des processus de propagation et dépôt. Application aux cas de La Madeleine (Savoie, France), Flims (Grisons, Suisse) et Köfels (Tyrol, Autriche). Thèse, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, p. 331.
- Provitolo, 2007, La vulnérabilité aux inondations méditerranéennes : une nouvelle démarche géographique, pp. 23-40, Annales de Géographie
- Radbruch-Hall, D., 1978, Gravitational creep of rock masses on slopes, in B. Voight, ed., Rockslide and avalanches: Natural phenomena. Developm. in geotechnical Eng. ing.,14: Amsterdam, Elsevier Sc. Publ. Co., p. 608-657.
- Rezig S., 1998. Modélisation probabiliste de l'aléa "mouvement de terrain". Développement d'une méthode quantitative pour l'aide à l'expertise. Thèse, Ecole Centrale Paris, 203p.
- Rittenhouse G., 1943. A visual method of estimating two-dimentional sphericity. Journal of Sedimentary Petrology, n°13, pp. 79-91.
- Robin, F., 1993. Landslide risk assesment and acceptable risk. Can. Geotech. J., n°31, pp. 261-272.
- Romana, 1988. SMR classification. In: C. Bonnard, Editor, Landslides-Glissements de terrains, Balkema, Rotterdam (1988), pp. 955–960.
- Rutqvist, J., Stephansson, O. (2003): The role of hydromechanical coupling in fractured rock engineering. Hydrogeology Journal, Vol 11 (1), 7-40.
- Slosson, J. E., 1992. Landslides / landslide mitigation,Colorado. The Geological Society of America,120 p.
- Terzaghi, K., 1962. Stability of steep slopes in hard unweathered rock. Geotechnique, 12: 251-270.
- Tullen, 2002. Méthodes d'analyse du fonctionnement hydrogéologique des versants instables. Thèse EPF.
- United Nation/ISDR, International Strategy for Disaster Reduction, 2002
- Varnes D.J. (1978). – Slope movements Types and Processes. – In : Schuster R.L. & Krizek R.J. (eds), Landslides Analysis and Control. Transportation Research Board Special Report 176,National Research Council, Washington D.C., Chap.2, 11-33
- Wadell H. A., 1933. Sphericity and roundness of rock particules. Am. J. Geol., Vol. 41, pp . 310-331.
- Wadell H. A., 1935. Volume, shape and roundness of quartz particles. Am. J. Geol., Vol. 43, pp. 251-280.
- Wisner, 1998, Marginality and vulnerability : why the homeless of Tokyo don't "count" in disaster preparations, Applied geography, 18 (1), pp. 25-33. Cayeux A., Tricart J., 1959. Initiation à l'étude des sables et des galets (texte) . Paris, CDU, 376 p.





## Table de illustrations

Figure 1: Classification de Varnes (dans Pollet, 2004) et représentation schématique d'une partie des principales formes de mouvements gravitaires (Varnes, 1978).....	21
Figure 2: évolution conceptuelle de la rupture.....	22
Figure 3: mécanismes de rupture au sein des versants rocheux en fonction de la configuration des discontinuités géologiques prédécoupant le massif (Eberhardt et al, 2004). ....	23
Figure 4 : Glissement de la Clapière.....	25
Figure 5: principales morpho structures associées au DGSD (Agliardi et al, 2001). ....	26
Figure 6 : Le DGSD de Colle-Longue. ....	26
Figure 7 : localisation des deux zones d'étude dans le Golfe de Corinthe (Panagopoula et Sergoula Landslides). ....	27
Figure 8 : carte des principales structures tectoniques.....	28
Figure 9 : photography's of Sergoula area.....	29
Figure 10: Coupe interprétée du versant de Colle Longue et du glissement de la Clapière (Jomard, 2006) .....	30
Figure 11: Coupe interprétée du glissement de la Clapière (Jomard et al., 2008) .....	31
Figure 12 : Hypothèse sur l'évolution des paramètres mécaniques.....	34
Figure 13 : Localisation des zones de prélèvement sur la bordure ouest du massif de l'Argentera / rive gauche de la Tinée (Orientation de la vue N45°).....	35
Figure 14 : (à gauche) Crevasse de type ouverture gravitaire à la base de la quelle les prélèvements de matériaux ont été réalisés (El Bedoui, 2009) et à droite d'autre crevasse gravitaire où ont été prélevé les échantillons (Hernandez et al, 2008). ....	35
Figure 15. Photographie des grains pour chaque échantillon de la gamme [2-5mm] et paramètres de forme et taille mesuré pour chaque grain (Hernandez et al., 2008) .....	36
Figure 16 : Evolution des paramètres mécaniques $\phi'$ et $c'$ au regard de la lutte entre le lessivage ethydrolyse .....	37
Figure 17 : Classification des phénomènes liés à l'eau qui doivent être considérés dans l'analyse hydrogéologique des processus d'instabilité de pente. (Tullen, 2002). ....	40
Figure 18 : Projection des ERT acquis sur la Clapière sur les coupes transversales au glissement de la Clapière. ....	42
Figure 19 : couplage entre les profils de tomographie électrique, les structures et les linéaments tectoniques (El Bedoui, 2008).....	43
Figure 20 : modélisation de l'orientation des failles sur l'interprétation des modèles inverse (Jomard et al., 2008).....	44
Figure 21: morphologie du corps du glissement de Sergoula. ....	45
Figure 22: Analyse comparative entre la teneur en sulfate dans l'eau enregistrée (marqueur de fonte des neiges) et variation de résistivité 3 profils de résistivité.....	46
Figure 23 : A : profil de tomographie électrique en 3D.....	47
Figure 24 : localisation dans le glissement de terrain emboîté au pied de la Clapière du profil de tomographie électrique pour le suivi temporel et pour l'injection expérimentale .....	48
Figure 25 : résultats de l'injection dans le glissement emboîté de la Clapière .....	49
Figure 26 :À droite les résultats de la soustraction des matrice d'inversion. Les zones rouges correspondent à une résistivité croissante relative et à la zone bleue à une diminution relative de la résistivité (écoulement d'eau). ....	49
Figure 27 : glissement de terrain du Pra de Julian .....	51
Figure 28 : coupe du glissement de terrain du Pra de Julian, avec la localisation des profils de prospection (ERT 1, 2, 3) et du profil permanent ( Perm-ERT). ....	51
Figure 29 : Représentation des données pluviométriques et piézométriques du glissement de Vence pour une durée de 560 jours. ....	53
Figure 30 : Représentation des données pluviométriques, piézométriques et résistivimétriques du glissement de Vence pour une durée de 538 jours.....	54



# 4<sup>ème</sup> Partie

**Articles publiés**

**et**

**en cours de publication**

**les plus significatifs**