



*Programme RDT (Risques Décisions Territoires)*

# Guide méthodologique pour la reconnaissance des aléas d'éboulement

**D. Jongmans/J. DeParis : LGIT/LIRIGM Université J . Fourier (Grenoble)**  
**T. Villemin: LGCA: Université de Savoie**  
**A. Mathy : société SAGE-ADRGT**  
**L. Effendiantz : CETE Lyon**

Projet CAMUS : *Caractérisation multi-méthodes  
des aléas d'éboulements en masse*

# **1 INTRODUCTION**

Les éboulements en masse issus de falaise calcaire (volume supérieur à 50.000 m<sup>3</sup>) constituent un problème important et difficile pour les autorités responsables de la gestion et de l'aménagement du territoire en zone de montagne, en raison notamment de la difficulté de prévision de ces événements. Cette dernière résulte principalement de la soudaineté de ces phénomènes et de l'absence de signaux précurseurs, de l'incertitude sur le découpage effectif des compartiments rocheux et sur la structure interne du massif, et de la complexité des causes de déclenchement.

Le projet CAMUS avait pour but de mettre au point une méthodologie opérationnelle de reconnaissance de falaises rocheuses, permettant une description quantitative la plus précise possible des compartiments instables et une meilleure caractérisation de l'aléa d'éboulement, point de départ de l'évaluation du risque. Il a rassemblé deux équipes universitaires ayant des compétences en géophysique (LIRIGM) et en morphologie numérique (LGCA), un partenaire scientifique opérationnel (Groupe mécanique des roches, CETE Lyon) et un bureau d'études en géotechnique (SAGE-ADRGT).

Pour connaître la géométrie tridimensionnelle d'un compartiment rocheux (limites externes et fracturation interne), la méthodologie proposée s'appuie sur la combinaison de 3 techniques d'observation et de mesures :

- la prise détaillée d'observations géologiques et structurales (sur le plateau supérieur, en paroi, dans les fissures ouvertes) ;
- la morphologie numérique à partir d'images et de scannerisation laser (lidar), permettant une description précise de la géométrie des compartiments rocheux, une prise de mesures structurales et une localisation 3D de toutes les autres mesures faites directement en paroi;
- des reconnaissances géophysiques en surface et en paroi (tomographie électrique, radar géologique, sismique) pour localiser en surface et en profondeur les fractures principales et les caractériser (ouvertures, remplissages, ponts de matière...)

Cette combinaison de techniques a été appliquée à trois sites de falaise calcaire (région de Grenoble) précédemment identifiés comme potentiellement instables lors de « l'étude de l'aléa écoulement sur la région de Grenoble » réalisée pour le Syndicat Mixte pour l'Etude et le Suivi du Schéma Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme de l'Agglomération Grenobloise (SM SDAU). Ils ont été choisis pour leur représentativité typologique, en vue d'une application ultérieure la plus large possible. Leur localisation et les fiches synthétiques de chaque site sont présentées en annexe 1.

Ce document intitulé « *Guide méthodologique pour la reconnaissance des aléas d'éboulement rocheux* » présente les principales conclusions tirées de cette étude. Il porte sur la nature et la qualité des informations qu'il est possible de collecter à partir des techniques de mesure actuelles, en insistant sur les limites de validité de ces techniques.

Il est scindé en 3 parties :

- une description synthétique des méthodes de reconnaissance utilisées
- la stratégie de reconnaissance proposée
- des annexes illustrant l'application des méthodes et la stratégie sous forme de fiches synthétiques

## **2 METHODES DE RECONNAISSANCE**

Les méthodes présentées dans ce chapitre concernent la phase de reconnaissance détaillée d'un compartiment rocheux déjà identifié lors de la phase préliminaire de détection des sites potentiellement instables. Pour chaque classe de méthodes, des références générales sont fournies en annexe.

### **2.1 Techniques classiques**

#### **2.1.1 Préambule**

L'objectif des techniques classiques est de reconnaître le ou les compartiment(s) instables en affinant la connaissance géométrique des volumes individualisés par la fracturation et susceptible d'un départ simultané en une ou plusieurs séquences. Il convient également d'examiner la qualité des contacts avec le massif (rugosité, persistance des discontinuités...). Ces éléments sont en effet le préalable indispensable pour envisager l'étude mécanique sommaire des conditions de stabilité. On s'attache ainsi à discriminer les compartiments rocheux en deux catégories:

- les compartiments stables, désignant une configuration d'équilibre éloignée de la rupture dans laquelle les processus d'évolution défavorable sont très lents
- les compartiments potentiellement instables présentant un équilibre précaire, reposant sur des résistances mécaniques de type fragile et pouvant se dégrader rapidement. Dans ce cas, les seules caractéristiques géométriques et les propriétés mécaniques de base (résistance à l'écrasement, frottement résiduel) ne permettent pas d'assurer la stabilité du système.

Le calcul de stabilité sera d'autant plus pertinent que les paramètres énoncés ci-dessus -en particulier géométriques- seront définis avec précision.

La méthode classique, actuellement appliquée par la plupart des bureaux d'études ou organismes chargés d'évaluer l'aléa d'éboulement, comporte les étapes suivantes :

- Un inventaire des données disponibles
- Une étude de terrain de la surface supérieure (plateau)
- Une étude directe de la paroi
- Une synthèse

#### **2.1.2 Inventaire et collecte des données disponibles, recherche documentaire :**

Cette étape du travail vise à rassembler les différents documents disponibles concernant le site étudié:

- Les documents utilisés lors de la phase préliminaire de détection: bibliographie, fonds cartographiques,
- Les photographies aériennes issues de missions générales ou spécifiques archivées dans les services de l'Etat.
- Les cartes géologiques détaillées
- Les études universitaires et études géotechniques particulières intéressant le secteur
- Les mesures de déplacement réalisées sur le site

### 2.1.3 Etudes de terrain réalisées à partir du plateau

Ces études de terrain regroupent un ensemble d'opérations réalisées à partir du plateau supérieur de l'escarpement étudié. Elles nécessitent l'établissement préalable d'un plan topographique pour le report précis des observations. Cet investissement est en général largement rentabilisé par le temps gagné sur le travail de terrain.

Les principales opérations réalisables sont :

- Le report sur le plan des indices de surface, failles et fractures caractéristiques.
- Le relevé systématique de fracturation et l'établissement de stéréogrammes.
- Le remplacement de l'objet étudié dans le contexte géologique régional avec, le cas échéant, l'identification des structures géologiques particulières situées à proximité immédiate du site.
- L'identification des activités humaines, carrières ou anciennes carrières, situées à proximité de l'objet étudié.
- Le cas échéant, prise en compte de caractéristiques hydrogéologiques (fissures suintantes, conduits karstiques...).

### 2.1.4 Etude du compartiment identifié sur la paroi :

L'objectif de cette étape est d'examiner le ou les compartiment(s) identifié(s) comme potentiellement dangereux sur la falaise et éventuellement de réaliser des mesures, directement ou à distance.

Les *mesures directes* nécessitent généralement des déplacements sur corde en raison de la verticalité des parois à reconnaître. L'accès au compartiment étudié est indispensable pour en déterminer ses limites et sa fracturation et pour caractériser d'éventuels critères d'évolution récente. La technique d'accès n'est en aucun cas une technique d'escalade : la progression en paroi s'effectue en descendant sur une corde statique à partir du rebord du plateau supérieur, équipé d'un baudrier et d'un descendeur. Les falaises de grande hauteur couramment investiguées interdisant la sortie par le bas, les remontées s'effectuent donc sur la même corde. Cette pratique s'apparente donc plus aux techniques de spéléologie qu'aux techniques alpines.

Les géologues qui pratiquent les relevés en falaise doivent être qualifiés aux techniques de progression sur cordes et interviennent au minimum à deux. Les outils utilisés sont la boussole-clinomètre, les jumelles, le distance-mètre laser de poche, le dictaphone, l'appareil photo équipé d'un zoom avec position grand angle et d'un dispositif macro. Préalablement à la descente du géologue, une chaîne d'arpenteur est déroulée sur le profil pour permettre un positionnement approximatif et une mise à l'échelle des relevés.

La prise de notes et les descriptions s'effectuent sur un carnet ou sur support vocal. Les prises de vues réalisées sont repérées. Des mesures d'orientation complètes sont réalisées aussi systématiquement que possible sur les fissures et les discontinuités caractéristiques, y compris les plans de stratification. La morphologie, l'ouverture, le remplissage, la continuité des fissures sont décrits et des prélèvements d'échantillons peuvent être réalisés.

La descente sur cordes nécessite une préparation comportant les phases suivantes :

- reconnaissance de surface et examen des photos de la paroi pour implanter au mieux les profils verticaux à relever

- appréciation de la stabilité superficielle de la falaise. Les risques de chutes de pierre spontanés ou provoqués par le frottement des cordes peuvent être rédhibitoires à une descente sécurisée en paroi.
- estimation du temps nécessaire aux opérations
- vérification du matériel d'accès (adéquation, péremption...)

Une adaptation du travail en paroi doit se faire en fonction du contexte rencontré. Ainsi, dans le cas d'une paroi verticale, le profil n'étant parcouru qu'une seule fois, la paroi n'est pas équipée de pitons d'assurage, sauf en cas de relais pour une descente supérieure à 50m. La progression selon une verticalité stricte peut, dans les cas les plus défavorables (existence de becs ou petits éperons dans le plan de falaise formant des masques latéraux), impliquer de multiplier les profils pour avoir une continuité de l'observation. En cas d'observations selon des lignes horizontales, l'équipement en mains courantes fixes n'est en général pas réalisé, car il nécessite un investissement trop important pour un seul parcours. L'existence de vires naturelles dans la falaise peut le cas échéant permettre d'élargir le champ d'observation en permettant une progression assurée sur la corde de rappel. Le débatement latéral est alors forcément très limité compte tenu du risque d'abrasion de la corde sur les becs rocheux.

Le cas d'une paroi inclinée ( $\leq 80^\circ$ ) permet à priori des progressions latérales plus faciles, moyennant la pose de pitons relais pour protéger la corde. La surface topographique est en général plus irrégulière que dans la configuration verticale, entraînant des difficultés de positionnement. Dans ce cas, la fidélité du report des observations repose beaucoup sur l'utilisation des photos de la paroi prises préalablement.

Dans la méthode classique, le travail en paroi est indispensable pour la prise de mesures détaillées, mais il trouve ses limites dans le manque de recul pour apprécier les limites de l'objet étudié dont les dimensions atteignent couramment plusieurs dizaines de mètres. Il doit donc impérativement s'appuyer sur des études déportées.

Pour les mesures à distance (approche déportée), différents moyens peuvent être mis en œuvre :

- examiner la paroi à la jumelle depuis sa périphérie (ligne de crête, talus inférieur, versant opposé) afin d'identifier les principales fractures, les venues d'eau, la lithologie...
- réaliser un survol hélicoptère, opération forcément brève en raison de son coût et qui doit être préparée en vue de répondre à des questions précises. L'investigation comporte à la fois une inspection visuelle rapprochée et la prise manuelle de photographies. Les photos sont ensuite utilisées directement ou assemblées en mosaïques et peuvent servir de support pour le report d'informations recueillies lors de cet examen ou lors d'autres travaux.
- obtenir des images spécifiques, en visée la plus frontale possible, à l'aide d'appareil grand format et en couverture stéréoscopique. La réalisation de ces prises de vues, généralement confiée à un prestataire spécialisé, est faite à partir d'un avion ou d'un hélicoptère, ou directement depuis le sol (versant opposé par exemple) dans le cas d'une configuration favorable. Les clichés sont examinés en couples stéréoscopiques par des techniques classiques de photointerprétation. Cet examen aboutit à l'habillage légendé d'une ou plusieurs images permettant ainsi de repérer les fractures en les hiérarchisant et, le cas échéant, des indices d'instabilité et de sortie d'eau. Des indices d'écroulements anciens sur la face avant du compartiment étudié ou à sa proximité immédiate sont également recherchés.

### **2.1.5 Rendu de l'étude**

Les observations et mesures sont consignées sur un plan pour la surface supérieure, sur les photos pour les observations en paroi. Ces photos, choisies pour avoir la moindre distorsion possible, portent une échelle et en surcharge le tracé des principales discontinuités avec mention des pendages, les limites géométriques de l'objet instable, les commentaires des observations réalisées, le repérage des photos de détail, etc...

### **2.1.6 Limites de la méthode**

La méthode classique de reconnaissance d'un compartiment rocheux, intéressante par sa légèreté et sa rapidité de mise en œuvre, présente des limites importantes résultant de sa dépendance aux conditions d'accès dans la paroi et au facteur humain (choix des mesures, interprétation). De plus, elle ne fournit pas d'indications directes sur la continuité des fractures dans le massif. Sauf exception, les informations obtenues par la méthode classique pour la détermination des volumes des compartiments instables et de la géométrie des surfaces d'appui ne sont donc pas suffisantes pour qualifier l'aléa de manière fiable.

## 2.2 Méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques utilisent les lois de la physique (sismique, électrique, électromagnétisme, gravimétrie, ...) afin d'obtenir indirectement des informations sur la structure du sous-sol. Les mesures réalisées sur le terrain sont interprétées pour obtenir des paramètres géophysiques (vitesse de propagation des ondes, résistivité et permittivités électriques, densité...) caractérisant les couches investiguées. Les méthodes géophysiques sont caractérisées par leur résolution (capacité à discerner un objet d'une taille donnée) et leur profondeur de pénétration. En général, la résolution diminue lorsque la pénétration augmente.

L'application de méthodes géophysiques à la reconnaissance de falaises est d'obtenir des informations quantitatives sur la fracturation à l'intérieur du massif, à partir de mesures réalisées sur la paroi et sur le plateau.

Les principales méthodes géophysiques utilisées dans le cadre de la reconnaissance des mouvements de terrain sont brièvement décrites. Pour plus d'information, une liste d'ouvrages et d'articles est fournie dans le chapitre référence.

En fin de chapitre, les principales conclusions concernant l'applicabilité des techniques géophysiques à la reconnaissance des falaises calcaires autour de Grenoble seront tirées.

### 2.2.1 **Radar Géologique**

La prospection radar de surface ou GPR (Ground Penetrating Radar) est, dans son principe, proche de la méthode de sismique réflexion. Un transmetteur (Tx) émet des ondes radar qui pénètrent dans le sol et se réfléchissent, et le signal résultant est enregistré par un récepteur (Rx). Par contraste avec les méthodes sismiques, les instruments radar utilisent des ondes électromagnétiques (EM) dont la fréquence est beaucoup plus élevée et varie entre 25 MHz et 2 GHz. En général, ces ondes ne pénètrent pas aussi profondément que les ondes sismiques mais se caractérisent par une très haute résolution. La résolution est d'autant meilleure que la fréquence est élevée.

Le radar est un outil bien adapté à la localisation d'objets ou de structures de faible dimension situés à relativement faible profondeur. La propagation des ondes électromagnétiques dans les terrains naturels dépend de la permittivité diélectrique et la conductivité électrique du terrain. La permittivité diélectrique affecte la vitesse de propagation des ondes EM qui augmente lorsque la permittivité diminue, jusqu'à atteindre la vitesse de la lumière dans l'air (30cm/ns). La conductivité électrique affecte l'amplitude des ondes électromagnétiques qui sont d'autant plus atténuées que les terrains sont conducteurs. Dans les terrains électriquement très résistifs (roches compactes, non argileuses et non fracturées), la profondeur de pénétration atteint des dizaines, voire des centaines de mètres. Dans les terrains moyennement résistifs (roche fracturée, sable propre, gravier, ...), la profondeur de pénétration est de l'ordre d'une dizaine de mètres et, dans les terrains conducteurs (roches et sols argileux, eau minéralisée, béton armé, ...), la profondeur de pénétration peut devenir inférieure à un au mètre. La profondeur de pénétration des ondes radar diminue également lorsque leur fréquence augmente. Les ondes EM se réfléchissent sur les interfaces montrant un contraste de permittivité diélectrique (stratification, fracture). Ce sont les ondes réfléchies qui sont utilisées dans la technique radar pour imager l'intérieur d'un massif géologiques. Le choix de la fréquence des ondes (donc de l'antenne utilisée) résulte d'un compromis entre la profondeur de pénétration et la résolution.

Plusieurs dispositifs d'antennes radar peuvent être utilisés, généralement dérivés des méthodes sismiques. Parmi ceux-ci, deux sont couramment utilisés :

- Profil radar: les deux antennes sont fixes les unes par rapport aux autres et sont déplacées régulièrement le long d'un profil. Les réflecteurs apparaissent directement sur la section radar.
- Profil CMP (Common Mid Point): les antennes radars sont écartées progressivement l'une par rapport à l'autre en ayant toujours le même point central. Cette méthode permet d'obtenir les vitesses des ondes radar dans le sol.

Enfin deux modes peuvent être distingués en fonction de l'orientation relative des antennes émettrices et réceptrices: le mode TE (Transverse Electric mode), le plus utilisé, et le mode TM (Transverse Magnetic mode).

L'application du radar pour détecter la fracturation au sein de falaises calcaires apparaît favorable puisque le massif rocheux est électriquement résistif (bonne pénétration) et que la présence de fractures, remplies d'argile ou d'air, va constituer un contraste fort de permittivité électrique. Pour être efficace, la technique doit cependant être appliquée sur la paroi pour imager les fractures sub-verticales et pour éviter la couche altérée conductrice à la surface du plateau.

### **2.2.2 Tomographique électrique**

Les méthodes de résistivité électrique sont couramment utilisées en prospection géophysique pour des applications variées, depuis le suivi temporel de pollution à la détection de failles ou de phénomènes karstiques. Le principe de la méthode est le suivant: un courant est injecté entre deux électrodes A et B et la différence de potentiel est mesurée entre les électrodes M et N. Cette mesure permet d'obtenir la résistivité apparente du sous-sol sous le dispositif de mesures.

La profondeur de pénétration est approximativement donnée par le rapport  $AB/6$  et la résolution est fonction de l'espacement entre les électrodes et de la résistivité, et diminue très vite en fonction de la profondeur. En multipliant les mesures sur une ligne avec un grand nombre d'espacements d'électrodes, on peut obtenir une image de la résistivité électrique du sous-sol (tomographie), par inversion des valeurs de résistivité apparente mesurées. Les fractures dans un massif calcaire peuvent être mises en évidence en tomographie électrique soit par des anomalies conductrices (si elles sont remplies de matériau argileux) soit par des anomalies résistives (si les fractures sont remplies d'air).

### **2.2.3 Electromagnétisme**

La méthode électromagnétique (EM31) utilisée est basée sur l'utilisation d'une boucle émettrice et d'une boucle réceptrice. Un champ électromagnétique primaire est généré au niveau de l'émetteur. Ce champ se propage à travers le sol et dans l'air. Si le sol contient un matériau conducteur, la partie magnétique du champ électromagnétique alternatif crée des courants induits dans ce conducteur. Ces derniers engendrent un champ secondaire qui est mesuré par le récepteur. Le rapport de l'amplitude du champ secondaire sur l'amplitude du champ primaire est proportionnel à la conductivité électrique (l'inverse de la résistivité électrique) du matériau. La profondeur de pénétration dépend de l'écartement entre les boucles et varie entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres. Comme dans le cas de la tomographie électrique, la présence d'une fracture se manifestera par une anomalie conductrice (remplissage argileux) ou résistive (remplissage d'air).

## 2.2.4 Tomographie sismique

Les méthodes sismiques sont d'utilisation courante en prospection géophysique, que ce soit dans le domaine pétrolier ou dans la reconnaissance des terrains de sub-surface. Les ondes sismiques générées par une source (marteau, explosifs, vibreurs) se propagent dans le milieu et se réfléchissent et se réfractent sur des interfaces présentant des contrastes de vitesse sismique et de densité. Les signaux mesurés se caractérisent par la présence de différentes ondes (ondes directes, réfléchies, réfractées, de surface) qui peuvent être utilisées pour obtenir des informations sur le milieu. Dans cette étude, seule la méthode de sismique réfraction sera utilisée. Elle consiste à pointer les premières ondes (les plus rapides) arrivant dans le signal. Si on considère un nombre de sources suffisant (une dizaine pour un profil), l'ensemble des temps d'arrivée correspondant aux distances sources-récepteurs (typiquement plusieurs centaines) sont inversés pour obtenir une image 2D du sous-sol sous le profil réalisé, en termes de vitesse de propagation  $V_p$ . La profondeur de pénétration dépend de la longueur du profil et des valeurs de vitesses. Classiquement, elle est de l'ordre du quart de la longueur. La résolution dépend de l'espacement entre capteurs et de la fréquence des signaux émis.

Pour la reconnaissance de falaises, les profils de tomographie sismique se font classiquement sur le plateau et peuvent mettre en évidence des diminutions de vitesses sismiques (ou des augmentations de temps d'arrivée) résultant de la fracturation du massif.

## 2.2.5 Application des méthodes de prospection géophysique aux falaises autour de Grenoble

Les essais géophysiques réalisés sur les trois sites ont permis de tirer les conclusions suivantes sur l'application des méthodes.

### Sur la falaise

Lorsque les conditions de sécurité et de stabilité le permettent, le radar en falaise apparaît comme la méthode la plus performante puisqu'elle permet de mettre en évidence les discontinuités à l'intérieur du massif avec une résolution de l'ordre du dcm et une pénétration de 30 m maximum dans le type de calcaire étudié (résistivité électrique moyenne de l'ordre de 1000 à 2000  $\Omega m$ ). En combinant des profils horizontaux et verticaux sur la falaise, cette technique est la seule capable d'obtenir la géométrie et la continuité des fractures à l'intérieur du massif. Sur le site du Rocher du Midi (voir Fiche 2), cette méthode a permis de caractériser la continuité des fractures observées en surface. De plus, une fracture ouverte majeure impossible à déterminer à partir d'observations de surface a été détectée. Sur le site du Rocher de la Bourgeoise (Fiche 4), le radar a permis de mettre en évidence deux fractures ouvertes d'épaisseur métrique, dont une n'apparaît pas en surface mais a été mise en évidence par la tomographie électrique sur le plateau.

La localisation des profils sur la falaise peut se faire en plaçant des pastilles réfléchissantes qui sont détectées à partir d'une reconnaissance Lidar ultérieure. Cette combinaison du scan laser (Lidar) et du radar s'est avérée très efficace pour positionner facilement les mesures radar sur la falaise.

La méthode du radar en falaise présente cependant une série de limites et de contraintes à bien prendre en compte avant son utilisation :

- La technique n'est applicable que sur un site sécurisé ne présentant pas de risques de chutes de blocs
- L'altération du rocher peut localement entraîner une diminution de résistivité et une atténuation importante des ondes radar, rendant très faible la profondeur de reconnaissance. Lors de cette étude, ce problème ne s'est posé que sur un seul profil (Rocher du Midi).
- Si la fracture présente un tracé très irrégulier (en baïonnette), les diffractions et réflexions multiples peuvent rendre difficile la détermination de sa géométrie (Fiche 2, Rocher du Midi).
- La mise en œuvre de cette technique nécessite un équipement du site et la prestation d'une équipe rompue au travail sur corde, entraînant des coûts supérieurs aux essais réalisés sur le plateau.
- Sauf si des vires naturelles sont disponibles sur le site, les acquisitions de profils horizontaux en paroi sont de réalisation plus délicate (techniques d'accès) que les profils verticaux
- La limite à 30 m de la profondeur de pénétration réserve cette technique à des objets de relativement faible volume (plusieurs dizaines de milliers de m<sup>3</sup>).

### Sur le plateau

Les investigations géophysiques réalisées sur le plateau ont pour but de déterminer la continuité des discontinuités mises en évidence en paroi. Des profils de tomographie sismique et électrique 2D ont été réalisés, en général parallèlement à la direction de la paroi (Fiche 3, Ravin de l'Aiguille). Les profils de tomographie électrique ont systématiquement permis de localiser les zones fracturées recoupant le massif, soit par une diminution de la résistivité électrique si la fracture est remplie d'argile (Fiche 3, Ravin de l'Aiguille), soit par une augmentation de ce paramètre si la fracture est remplie d'air (Fiche2, Rocher du Midi ; Fiche 4, Rocher de la Bourgeoise). La résolution horizontale est directement liée à l'écartement entre les électrodes et est d'ordre métrique. Sur les essais sismiques, les fractures se marquent par une diminution de la vitesse sismique ou, de façon équivalente, par une augmentation du temps de parcours. Sur le site du Ravin de l'Aiguille où l'utilisation du radar en paroi est impossible en raison de l'instabilité de la paroi, la taille du dièdre a pu être contrainte par des mesures électriques et sismiques sur le plateau avec une résolution métrique et une pénétration de 20 à 30 m. L'intérieur du dièdre, plus fracturé, est caractérisé par une augmentation de la résistivité électrique ainsi que par une diminution de la vitesse sismique de propagation (voir Fiche 3, Ravin de l'Aiguille), par rapport au terrain encaissant. La limite du dièdre a été bien mise en évidence à partir de la variation de temps de propagation pour des tirs en éventail.

Les techniques géophysiques sur le plateau présentent les limites et restrictions suivantes :

- La profondeur d'investigation est réduite à quelques dizaines de mètres et la résolution diminue avec la profondeur. Les techniques permettent donc principalement de localiser les fractures à proximité de la surface du sol.
- La réalisation et la localisation des profils peuvent être rendues difficiles par la présence d'une végétation boisée.

La technique de tomographie électrique, facile à mettre en œuvre et rapide à interpréter, est recommandée sur le plateau.

## 2.3 Méthode de morphométrie numérique

### 2.3.1 Intérêt des méthodes de morphologie numérique

Les progrès technologiques réalisés récemment dans les domaines de l'imagerie numérique et du positionnement spatial ont fait apparaître de nouveaux outils pouvant être utilisés dans le cas particulier de l'analyse structurale des parois rocheuses. La morphologie numérique regroupe un ensemble de techniques permettant de caractériser et modéliser la forme d'objets comme dans le cas qui nous intéresse, celle des parois rocheuses. Ces techniques reposent sur deux types de données :

- des images numériques, stéréoscopiques ou non, mais dont on connaît les caractéristiques géométriques qui s'y rattachent (position du centre de perspective, orientation de la vue, distorsions éventuelles résultant des optiques)
- des scannerisations laser (lidar) opérées par rotation depuis un point fixe ou par balayage. Cette scannerisation aboutit à la connaissance 3D de plusieurs millions de points constitutifs de l'escarpement.

L'emploi de ces méthodes permet une analyse qualitative et quantitative des escarpements en bureau d'étude. A partir de ce type de données, il est possible de déterminer les coordonnées tridimensionnelles d'un point particulier de l'image. A l'inverse, il est aussi possible de retrouver la position image d'un point de l'escarpement connu par ses coordonnées tridimensionnelles. Par conséquent, il devient possible de :

- mesurer des distances terrain entre des points de l'image ;
- analyser la planéité de certaines surfaces caractéristiques ;
- mesurer l'orientation de surfaces planes identifiées comme des discontinuités ;
- retrouver l'orientation de discontinuité par simple suivi de leur trace d'intersection avec la surface ;
- digitaliser en 3D les arêtes concaves ou convexes ;
- caractériser les faces limites des limites de blocs ;
- estimer des volumes ;

Cette approche permet donc de réaliser, au bureau, une étude complète de fracturation. Les principales familles de fractures sont caractérisables, en orientation et en densité. Un modèle 3D simplifié de l'escarpement peut être élaboré et servir ensuite de paramètre d'entrée à un calcul de stabilité par diverses méthodes de calcul simplifiées ou raffinées (e.g. éléments distincts).

### 2.3.2 Conditions d'application

Les images numériques sont obtenues soit par numérisation de tirages argentiques soit par prises de vue directement numériques. Quelles que soient les images utilisées dans ces méthodes leur qualité doit être métrique, c'est à dire qu'elles ne doivent pas être affectées de défauts géométriques non corrigeables qui les rendraient impropres à des mesures. On doit connaître avec précision les caractéristiques d'orientation interne, à savoir :

- La distance focale utilisée lors de la prise de vue ;
- La position sur l'image du point principal ;
- Les caractéristiques de la distorsion sur l'image liée aux optiques utilisées.

Pour permettre une analyse quantitative complète il faut en outre connaître les paramètres d'orientation externe relatifs à chaque image. Ces paramètres correspondent à la

localisation ( $X_0, Y_0, Z_0$ ), dans un repère connu, du centre de perspective de chaque photo ainsi qu'à l'orientation ( $\omega, \phi, \kappa$ ) de l'axe principal de chaque prise de vue

### 2.3.3 L'approche photogrammétrique

Un minimum de deux images, partiellement chevauchantes, est nécessaire à cette approche. Les orientations externes et internes doivent être connues. Comme chacune des images représente une projection plane centrale de l'objet 3D, il est possible, par recoupement des deux projections, de déterminer les coordonnées 3D de tout point de la zone commune.

Deux possibilités sont offertes par cette approche : examen manuel ou analyse automatique de corrélation entre les deux images.

Dans *l'examen manuel*, le couple d'images est examiné en stéréoscopie à l'aide d'un dispositif et d'un logiciel appropriés. C'est l'opérateur qui décide des points dont il veut retrouver les coordonnées. On parle alors de restitution 3D.

*L'analyse automatique de corrélation* entre images permet quant à elle de mettre automatiquement en correspondance les pixels homologues d'image à image et de recalculer leur position tridimensionnelle. Le produit de cette analyse est un semi de points décrivant la surface de l'objet étudié.

### 2.3.4 La scannerisation LIDAR

La scannerisation laser lidar est une technique nouvelle qui permet de disposer rapidement de la position 3D d'un très grand nombre de points d'une surface rocheuse naturelle. La position de ces points est obtenue à l'aide d'un faisceau laser infrarouge qui balaye la surface à étudier.

Le scanner laser lidar reprend le principe de la télémétrie laser orientée. Celle-ci repose sur la mesure du temps de parcours d'une impulsion laser pour faire l'aller-retour entre l'ensemble émetteur-capteur et l'objet (ici la surface rocheuse). Un dispositif optique oriente le faisceau de manière à en limiter sa divergence et donc la taille de la zone de terrain éclairée. Le temps nécessaire à une mesure élémentaire étant très court, il est possible d'opérer ces mesures au rythme de plusieurs milliers par seconde.

La couverture de l'objet à scanneriser peut être réalisée à partir d'un point fixe par un balayage dans un plan dont l'orientation tourne séquentiellement autour d'un axe contenu dans le plan de balayage. On parle alors de scannerisation laser lidar *terrestre*. Ce mode opérationnel permet, en fonction des appareils et des conditions de terrain, de mesurer les coordonnées de semis de points à espacement pouvant aller jusqu'à quelques millimètres. La portée maximale de ce type d'instrument se situe autour du kilomètre, mais les meilleurs résultats sont obtenus pour des distances de l'ordre de quelques centaines de mètres. La précision finale est d'ordre centimétrique.

Un autre mode d'acquisition peut être opéré en combinant un balayage plan du faisceau laser avec le déplacement du capteur dans une direction approximativement perpendiculaire au balayage. La surface est alors « peignée » par le laser. C'est cette technique qui est utilisée par la scannerisation LIDAR *aéroportée ou héliportée*. Sa mise en œuvre est cependant beaucoup plus lourde que la technique terrestre. Son utilisation requiert des mesures complémentaires (GPS, centrale d'orientation) à fréquence comparable et synchronisée avec celle du laser. La résolution et la précision sont réduites d'un facteur 10 par rapport à la technique précédente

### 2.3.5 Le nuage de points

Le nuage de points issu de la scannerisation laser lidar peut être utilisé directement pour examiner certaines particularités morphologiques de l'escarpement. Pour percevoir la 3D de celui-ci, il est possible d'utiliser soit l'effet « traveling » en vision monoscopique (impression visuelle de relief qui naît du changement de point de vue), soit directement l'effet stéréoscopique binoculaire. Dans ce deuxième cas, un dispositif d'affichage stéréoscopique est nécessaire.

Le nuage de points peut être colorisé pour permettre un meilleur rendu. On affecte alors à chaque point une couleur équivalente à celle du pixel terrain correspondant. Pour cela il est nécessaire de disposer d'une image co-référencée avec le nuage de points.

L'utilisation des nuages de points souffre de l'impossibilité d'éliminer les parties cachées. On est donc limité à des perspectives proches de celles de la prise de vue initiale.

### 2.3.6 L'image de synthèse et l'image drapée

*L'image de synthèse* est une image virtuelle créée généralement à partir de la triangulation 3D d'un semis de points sur laquelle une texture synthétique est appliquée. Plusieurs scènes virtuelles peuvent être créées. Une scène donnée résulte du choix d'un point de vue et de la définition de une ou plusieurs sources de lumière virtuelle. Pour être réaliste et ressemblante, une image virtuelle doit être basée sur un maillage 3D suffisamment fin et sur des textures comparables à l'objet naturel. Pour ce faire, il est possible de « piquer » ces textures directement sur une ou plusieurs images de l'objet réel. Une image virtuelle créée reposant sur une triangulation permet l'élimination des parties cachées et une figuration des parties ombrées, augmentant ainsi la perception 3D. Le principal défaut de ce type d'image est de mal représenter les arêtes des objets. Les différentes réalisations présentent le plus souvent des aspects émoussés.

Une image virtuelle simplifiée peut aussi être créée simplement à partir d'un nuage de points, éventuellement colorisé par la valeur radiométrique du pixel correspondant. Dans ce cas néanmoins, il n'y a pas élimination des parties cachées. La perception du relief vient alors essentiellement de l'animation de l'image et de l'effet traveling correspondant.

*L'image drapée* correspond à une image de l'escarpement que l'on projette dans une géométrie différente de celle correspondant à la prise de vue initiale. La résolution s'en trouve diminuée et des effets particuliers apparaissent (trous, et zones ultracondensées). L'image drapée peut être utilisée pour créer des vues stéréoscopiques virtuelles à partir d'une seule image.

Notons que ces différentes images, souvent d'effet visuel spectaculaire, ne permettent généralement qu'une inspection qualitative des escarpements. Elles sont très utiles pour les présentations et certaines figurations (e.g. représentation du départ d'un bloc).

### 2.3.7 L'image solide ou image géoréférencée dans sa géométrie d'origine

Une image numérique sous sa forme classique comporte une structuration en pixels. Chaque pixel correspond à un petit élément du terrain qui est caractérisé par sa radiométrie : une valeur unique pour les images panchromatiques (images « niveau de gris ») ou 3 valeurs (ou plus) dans le cas d'images multispectrales (images « couleur » et « fausse couleur IR »). Le concept d'image solide rajoute à l'information radiométrique une couche « positionnement » qui renseigne sur la position spatiale 3D de chaque pixel. À l'aide d'un logiciel spécifiquement adapté il est théoriquement possible, à partir d'une image solide, de réaliser la plupart des opérations détaillées au paragraphe 2.3.1

Il faut noter qu'il est préférable de travailler avec une image solide plutôt qu'avec une image correspondant à un orthophotoplan. En effet, aucun ré-échantillonnage n'étant nécessaire pour créer l'image solide, sa résolution n'est donc pas altérée.

### **2.3.8 Application des techniques de photogrammétrie numérique aux falaises calcaires**

Seules à même d'apporter une qualité homogène dans la représentation de la paroi, les techniques de morphologie numérique compensent les difficultés d'accès et d'observation terrestre. Elles apportent en outre, par rapport aux techniques de photo-interprétation classiques, une plus grande finesse d'analyse et la possibilité de relever l'orientation des discontinuités. L'applicabilité de ces méthodes sera discutée selon des critères de mise en œuvre et de performance. Par rapport aux investigations classiques, l'examen des parois en technique alpine ne sera utilisé ici qu'en complément ponctuel et en calage des techniques de morphologie numérique.

#### *Conditions et restrictions d'utilisation des techniques basées sur une approche photogrammétrique.*

Idéalement, les clichés doivent être pris perpendiculairement à la paroi étudiée, avec un recouvrement compris entre 60% et 80%, selon des axes approximativement parallèles et un entre-axe du même ordre de grandeur que la distance à la paroi. De telles conditions ne peuvent généralement pas être réalisées depuis le sol. La nécessité de recourir à une haute résolution empêche l'utilisation de prises de vue avion. Le recours à l'hélicoptère est donc imposé. Avec l'avènement de la photographie numérique haute définition (e.g. 10 mégapixels), la réalisation de clichés exploitables en photogrammétrie ne nécessite plus d'avoir recours à des bureaux spécialisés. Il suffit de disposer d'un appareil équipé d'un objectif à focale fixe et grand angulaire qui aura été calibré. Lors de la réalisation des prises de vues, on définit au pilote une trajectoire à suivre, approximativement linéaire et équidistante de la paroi. Cette trajectoire sera suivie à faible vitesse (quelques m/s) et les clichés seront pris en très grand nombre de manière à pouvoir ensuite sélectionner les meilleures combinaisons.

L'exploitation quantitative complète des clichés nécessite, préalablement à prise de vue, la matérialisation de points d'amer. Plus que leur nombre, la géométrie selon laquelle se disposent ces points d'amer est importante. Sur un couple donné, ils doivent être répartis de la manière la plus tridimensionnelle et la plus dispersée possible. La position des points d'amer doit être déterminée avant toute exploitation des clichés mais peut être réalisée après la prise de vue. Il n'est en principe nécessaire d'orienter un seul couple de photos, l'orientation de suivantes pouvant se déduire par la technique dite d'aérotriangulation. En l'absence de points d'amer, il sera nécessaire d'utiliser des détails naturels du terrain comme points d'amer. Cela n'est pas toujours possible et les sources de confusions et d'imprécision sont alors nombreuses. Si aucune de ces techniques n'est possible, il faudra alors nécessairement faire appel à une technique d'orientation directe des clichés nécessitant l'usage combiné de GPS et d'une centrale d'orientation.

Même si l'ensemble des opérations préalables à réaliser (stéréo-préparation, prise de vue, orientation des clichés) ne présente pas de complexité apparente, nous recommandons néanmoins de sous-traiter cette opération auprès de bureaux spécialisés pour en assurer une réalisation parfaite. Cela est d'autant plus intéressant qu'un nombre croissant de ces cabinets

dispose maintenant des outils d'orientation directe dispensant de points d'amer (points de référence).

L'observation des photos en couples stéréoscopique doit être réalisée avec un équipement informatique de vue stéréoscopique et un logiciel spécifique. Plusieurs solutions techniques existent actuellement sur le marché. La plupart des applications de ce type étant développées pour la photogrammétrie aérienne classique, il convient de s'assurer que la solution technique retenue est à même de traiter convenablement les cas de photogrammétrie dite terrestre (à vues horizontales).

Une fois le travail préalable réalisé, l'opérateur dispose d'un modèle stéréoscopique de la paroi sur lequel il peut identifier et hiérarchiser des discontinuités. Cette phase qualitative est suivie d'une phase quantitative de calcul de l'orientation et du positionnement spatial des surfaces détectées.

Les **contraintes** relatives à cette démarche sont principalement :

- Les facteurs inhérents à la prise de vue (choix d'un jour ou l'éclairage est favorable) ;
- La disponibilité d'un hélicoptère et du matériel de prise de vue spécifique (appareil calibré métrique (cf. 2.3.2)) ;
- La nécessité d'un créneau météo favorable ;
- La végétation arbustive (rare mais pas impossible en paroi) (éviter la saison de pousse des feuilles).
- La possibilité matérielle de mettre en place des points d'amer et de les mesurer avec précision si aucun dispositif d'orientation directe n'est utilisé.

La **restriction principale** de la photogrammétrie est liée à l'affleurement : les plans parallèles à la paroi sont sous-échantillonnés pour des raisons géométriques car peu recoupés par celle-ci. Du fait de l'irrégularité généralement constatée des plans de falaise, cette restriction tombe dans la plupart des cas.

Néanmoins, le recours à cette technique de photogrammétrie est incontournable, surtout en cas d'impossibilité d'examen visuel rapproché.

#### Conditions et restrictions d'utilisation des techniques basées sur les images solides.

La mise en œuvre de la scannerisation laser lidar terrestre requiert des stations d'acquisition (deux ou plus) au niveau de la ligne de crête, de part et d'autre de l'objet à reconnaître. Des photos sont systématiquement prises avec la même orientation que le dispositif laser lidar pour y greffer les données numériques issues de l'acquisition laser et donner une image solide. Ceci ne peut se faire sans un référencement commun des deux sources de données. De petites cibles réfléchissantes de type plaquettes catadioptriques peuvent pour cela être disposées dans le champ du scanner. Ces petits objets apparaissent comme des points brillants. Il faut néanmoins s'assurer que le scanner utilisé n'utilise pas un dispositif d'élimination des cibles trop réfléchissantes. Si c'est le cas, il faudra alors utiliser des objets de forme (e.g. sphères de diamètre adapté) pour assurer le géoréférencement des données. Ces cibles devront être localisées à l'aide de moyens topométriques classiques. Les conditions requises au niveau de l'appareil photographiques sont identiques à celles de la photogrammétrie (appareil calibré métrique petit au moyen format).

Les **contraintes inhérentes à la scannerisation terrestre** sont les suivantes :

- trouver des points de vue permettant le balayage du site avec un angle suffisamment ouvert, faute de quoi les zones d'ombre générées par l'effet de masque des parties en saillie prendront une importance rédhibitoire. Le contexte morphologique du site (alignement ou indentation de la ligne de crête) doit avoir été évalué avant de lancer l'opération ;
- être en mesure de disposer les cibles réfléchissantes dans le champ commun de prise de vue du scanner et des photographies.

Les mesures faites sur l'image solide doivent être assorties des **restrictions** suivantes:

- les plans parallèles (ou proches de la parallèle) à l'axe du faisceau laser ne sont pas bien échantillonnés (imprécision par manque de points). Cette restriction tombe en utilisant plusieurs images solides, établis à partir de scannerisations d'orientations significativement différentes
- les plans parallèles à la paroi sont sous-échantillonnés pour des raisons géométriques car peu recoupés par celle-ci (restriction identique à celle de l'approche photogrammétriques).

### Stratégies d'utilisation :

Dans le cas où la configuration topographique permet une bonne implantation des points d'acquisition LIDAR, l'approche image solide permet l'identification de plans mais renseigne mal sur leur continuité dans le terrain et sur l'ouverture des discontinuités détectées. Le recours à l'examen stéréoscopique des couples de photos de qualité photogrammétrique permet en complément une première appréciation de ces critères. Si la qualité du rocher l'autorise (du point de vue de la sécurité), quelques descentes sur corde permettront de vérifier, d'apprécier l'ouverture et le remplissage des discontinuités identifiées.

Dans le cas où la configuration topographique ne permet pas une bonne implantation des points d'acquisition il reste le recours à la scannerisation laser lidar hélicoptée. Cette technique présente en outre l'avantage de pouvoir se passer de points de référence terrestre car elle est nécessairement accompagnée d'un positionnement et d'une mesure d'altitude obtenus par une combinaison GPS-centrale d'orientation. Les performances actuelles de telles plateformes d'acquisition ne permettent pas d'obtenir des pixels de taille inférieure à 10cm. Le recours à cette technique est donc limité aux sites qui présentent des discontinuités dont la surface est de l'ordre de 50 dm<sup>2</sup> minimum.

### Stratégies et développements futurs des techniques de morphologie numérique :

Une amélioration significative des performances de la technique de scannerisation laser lidar hélicoptée permettrait d'envisager son utilisation systématique, voire l'abandon des acquisitions terrestres. Cela lèverait la limitation due à l'aspect rasant des acquisitions terrestres.

Dans l'immédiat nous retiendrons l'aspect synergie et complémentarité des deux méthodes, la photogrammétrie offrant en plus de l'absence de "zones d'ombre", la possibilité d'un examen stéréoscopique détaillé et confortable de la paroi. L'approche image solide reste néanmoins plus simple d'emploi pour mesurer l'orientation de discontinuités tout en donnant une bonne restitution 3D de la paroi.

### **3 STRATEGIE DE RECONNAISSANCE :**

Le projet CAMUS a montré l'intérêt du recours aux nouvelles techniques de morphologie numérique (laser ou photogrammétrie) et de géophysique (radar, électrique et sismique) pour la caractérisation de l'aléa.

Ces méthodes nécessitent des moyens techniques plus lourds (hélicoptère) et conséquents (portage de matériel, travaux sur cordes) que les méthodes classiques, et sont de mise en œuvre relativement coûteuse. Elles comportent également des phases de traitement et d'interprétation plus complexes.

Il convient donc d'éviter les redondances, de n'utiliser que les méthodes strictement adaptées au contexte du site d'étude et d'optimiser au mieux l'ordre des interventions sur le terrain afin de réduire les délais et de limiter les allers-retours. Les méthodes de calcul de stabilité, hors du sujet de l'action de recherche RDT, n'ont pas été abordées ici.

La stratégie de reconnaissance (voir fiche 1, annexe 1) proposée est scindée en trois parties principales (phase préparatoire, phase de reconnaissance, phase de synthèse).comportant chacune plusieurs étapes. Les différentes phases et étapes sont synthétisées par des fiches 2 à 14 présentées en annexe.

#### **3.1 Phase préparatoire :**

La phase préparatoire comporte 4 étapes (fiche 2):

- Etape E1 : Recherche documentaire
- Etape E2 : Visite préalable de site
- Etape E3 : Acquisition de photos géoréférencées hélicoptère
- Etape E4 : Etablissement plan de reconnaissance

##### **3.1.1 Recherche documentaire (E1 : fiche 3)**

Comme dans les pratiques "classiques", cette étape comporte la collecte des données disponibles dans les cartes et rapports existants, dans le cadre de recherches historiques et éventuellement dans des témoignages. Le lecteur est renvoyé au § 2.1.2. et 1.2 pour le détail de cette étape.

##### **3.1.2 Visite préalable du site (E2 : fiche 4) :**

Le but de cette visite est d'établir les conditions d'accessibilité du site sur le plateau et en paroi pour les étapes ultérieures, de déterminer la faisabilité du Lidar terrestre (points de vue sur le site) et des méthodes géophysiques (qualité du rocher vis à vis de la sécurité du travail en paroi), et de réaliser les premières observations géologiques. .

##### **3.1.3 Mission héliportée (E3 : fiche 5):**

Le projet Camus a montré l'importance de disposer de photos stéréoscopiques de la paroi de la falaise site dès les premières étapes de la reconnaissance. Sauf si ces photos sont disponibles via une étude antérieure, une mission héliportée doit être programmée afin de réaliser les prises de vue avec géoréférencement au GPS. Les photos doivent faire l'objet d'une interprétation géologique juste après l'acquisition.

### **3.1.4 Plan de reconnaissance (E4 : fiche 6)**

Sur la base de l'ensemble des éléments relevés lors des trois premières étapes, un plan de reconnaissance sera élaboré, avec la chronologie des interventions et une estimation des coûts.

## **3.2 Phase de reconnaissance :**

La phase de reconnaissance comprend 4 étapes (fiche 7) :

- Etape E5 : un levé topographique de la surface du plateau
- Etape E6 : la réalisation d'observations géologiques détaillées géoréférencées
- Etape E7 : La réalisation des essais géophysiques
- Etape E8 : La réalisation des mesures laser lidar

### **3.2.1 Levé topographique de surface (E5 : fiche 8)**

En raison de la végétation, la morphologie du plateau est en général difficile à obtenir à partir des techniques de morphométrie numérique. Un levé topographique détaillé de la surface du plateau (plan au 1/500<sup>ème</sup>) doit être réalisé en utilisant des techniques de géodésie classique. Cette étape doit être simultanée avec les observations géologiques détaillées du site, afin de localiser ces dernières avec précision.

### **3.2.2 Observations géologiques détaillées (E6 : fiche 9)**

Le levé géologique du plateau a pour but de relever tous les indices morphologiques permettant de repérer les fractures apparaissant à la surface et de réaliser des mesures structurales sur les affleurements existants. Si possible et/ou nécessaire, une étude géologique de la paroi peut être réalisée pour résoudre des problèmes précis mis en évidence sur les photos stéréoscopiques. En parallèle, les conditions et la localisation des profils radar en paroi seront définies.

### **3.2.3 Essais géophysiques (E7 : fiche 10)**

Des essais sismiques et électriques (tomographie) sont à réaliser sur le plateau afin de définir les caractéristiques physiques du massif rocheux et de repérer sous la zone d'altération les fractures observées lors du levé géologique détaillé. Si la stabilité de la paroi le permet, des profils radar verticaux et horizontaux seront réalisés sur la falaise afin de déterminer l'état de la fracturation du massif en profondeur. Lors des essais, des témoins réfléchissants seront collés sur la paroi afin de positionner les profils lors des mesures Lidar.

### **3.2.4 Mesures Lidar (E8 : fiche 11)**

Si il existe deux points de vue de qualité sur le site, les mesures Lidar peuvent être réalisées en terrestre avec la prise simultanée de photos. Si cette condition n'est pas remplie, les mesures Lidar doivent être effectuées à partir d'un hélicoptère.

## **3.3 Phase de synthèse :**

La phase de synthèse comprend les deux étapes suivantes (fiche 12) :

- Etape E9 : Interprétation et synthèse des données
- Etape E10 : Etablissement d'un modèle géométrique 3D

### **3.3.1 Interprétation et synthèse des données**

L'ensemble des données prises et existantes, géophysiques, géodésiques et géologiques, sont interprétées et synthétisées. Pour l'analyse structurale, l'utilisation de l'image solide permet de réaliser une étude homogène de la fracturation en paroi qui est corrélée aux données radar fournissant la géométrie des fractures à l'intérieur du massif.

### **3.3.2 Etablissement d'un modèle géométrique 3D**

L'ensemble des résultats, géodésiques, géologiques et géophysiques, contribue à établir un modèle géométrique 3D, permettant d'identifier la géométrie précise des blocs potentiellement instables et servant de donnée de base pour l'étude de stabilité.

## 4 Références

### Caractérisation de l'aléa d'éboulement

- Etude du risque d'éroulement sur les falaises du Y Grenoblois, Schéma de Cohérence Territoriale (ex SDAU), 2000-2001-2002-2003.
- Groupe "FALAISES", Programme Interreg 2C (2001). Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises - Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin.
- Pauly J.-C., Payany M. (2002). Méthodologies mises en œuvre pour la cartographie de l'aléa lié aux instabilités rocheuses sur un bassin géographique : cas des gorges du Tarn et de la Jonte. Bull. des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 236, p. 37-57.
- Rouiller, J-D., Jaboyedoff, M., Marro, C., Philippossian, F. et Mamin, M. (1998). MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Rapport final PNR 31, VDF, Zurich, 239 p.

### Prospection Géophysique

- Dubois J. et M. Diament, Géophysique, 2ème édition, 2001, Dunod.
- Jongmans D. and Garambois S., Geophysical investigation of landslides: a review, Bull. Soc. Geol. France, in press.
- Kearey P. & M. Brooks, 2000, An introduction to Geophysical Exploration, second edition, 2000, Blackwell Science.
- Reynolds J.M., An introduction to applied and environmental geophysics, 1997, Wiley.
- Sharma P.V., Environmental and engineering geophysics, 1997, Cambridge University Press.
- Telford W.M., L.P. Geldart, R.E. Sherif, D.A. Keys, Applied Geophysics, 1990, Cambridge University Press.

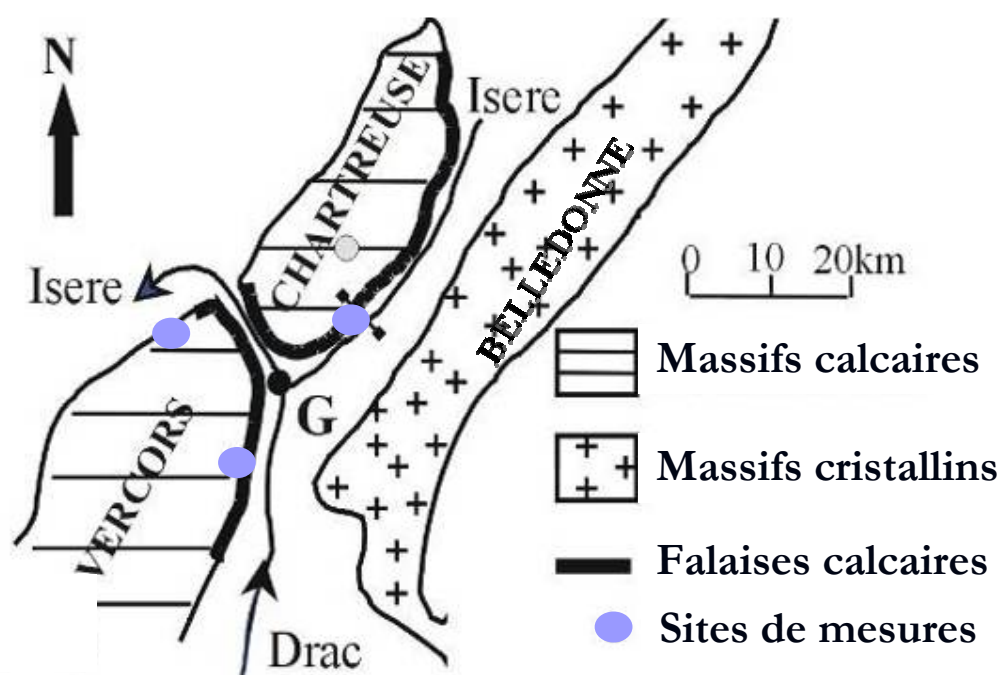
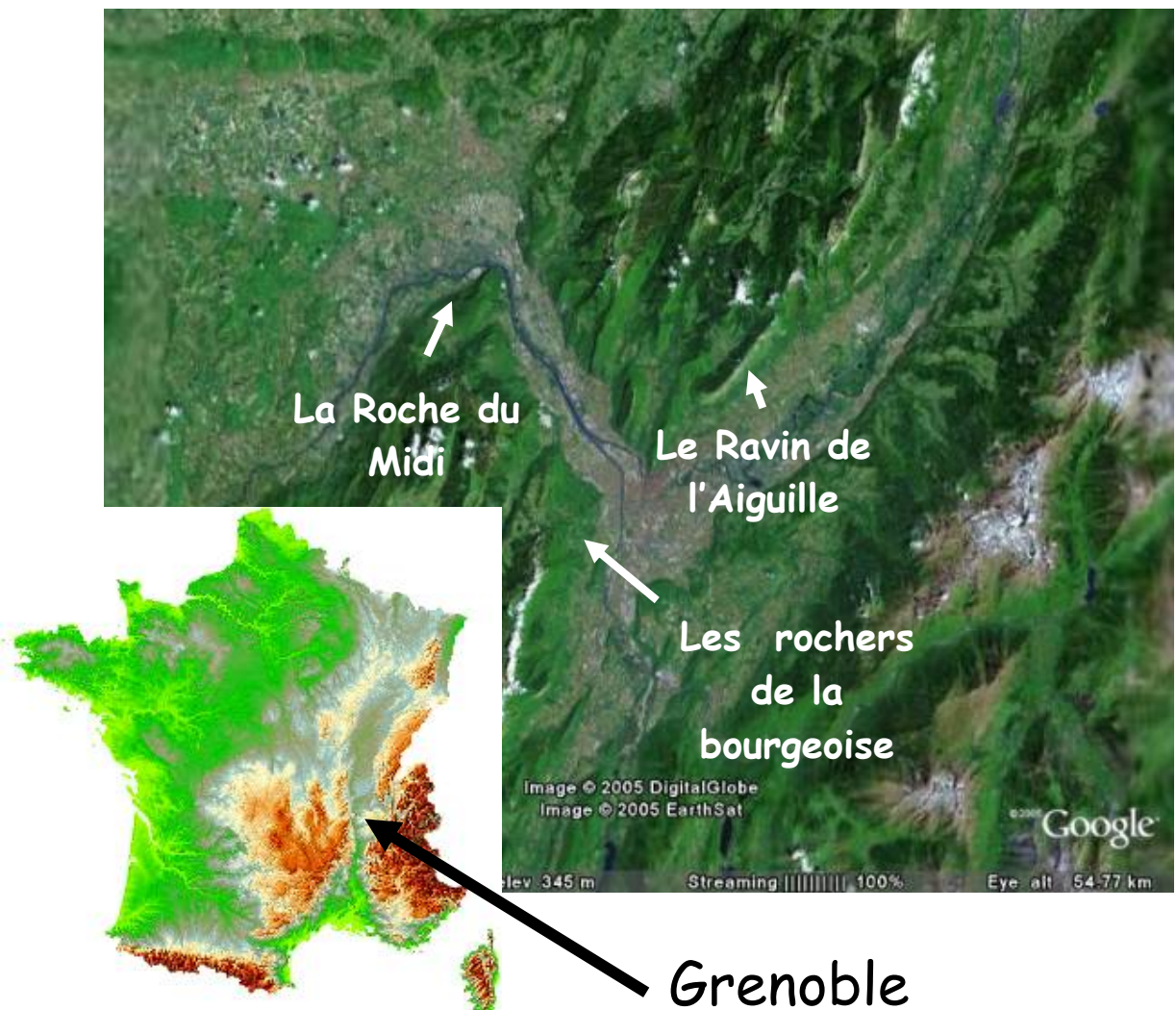
### Morphométrie numérique

- Alberts C-P. 2004. Surface reconstruction from scan paths. Future Generation Computer Systems 20, pp.1285–1298
- Bern, M. 1997. Triangulations, in: J.E. Goodman, J. O'Rourke (Eds.), Handbook of Discrete and Computational Geometry, CRC Press, New York, pp. 413–428.
- Bornaz L., Dequal S. The Solid Image: a new concept and its applications. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12
- Gupta R. P. 2003 Remote Sensing Geology Springer Ed. 656 p.
- Kasser M., Egels Y. 2002 Photogrammétrie numérique. Taylor & Francis Ed. 351 p. LCPC. 1999. L'utilisation de la **photo**-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain. LCPC Ed. 132 p.
- Mikhail E.M., Bethel J.S., McGlone J.C. 2001. Introduction to modern photogrammetry. John Wiley & Sons Ed. 479p.
- Skaloud J., Vallet J., Keller K., Vessière G., Kölbl O. 2005. Helimap: Rapid Large scale Mapping Using Handheld LiDAR/CCD/GPS/INS Sensors on Helicopters. ION GNSS Congress, Long Beach, sept. 2005.
- Wilfried L. 2006 Digital Photogrammetry- A Practical Course. Springer Ed. 214 p.

## **5 Annexes**

### **5.1 ANNEXE 1 Fiches de site**

# FICHE 1: Localisation géographique des 3 sites étudiés



## FICHE 2: Ecaille de la Roche du Midi

Le compartiment potentiellement instable est constitué d'une colonne de 100 m de haut (Fig.1), limitée par plusieurs réseaux de fractures N20°E à 30 °E et N130 °E à 140 °E. Une fracture ouverte majeure est visible sur le plateau (Fig. 2).

La paroi a été reconnue par 4 profils radar verticaux et 2 profils horizontaux, ainsi que par 4 tomographies électriques sur le plateau.

L'objectif était de préciser la continuité des fractures visibles en surface à l'intérieur du massif et de déterminer l'existence de discontinuités susceptibles de compléter en face sud le découpage d'une colonne instable.

Fig. 1: Vue (de l'Est) du compartiment potentiellement instable et positionnement des profils radar réalisés sur la falaise

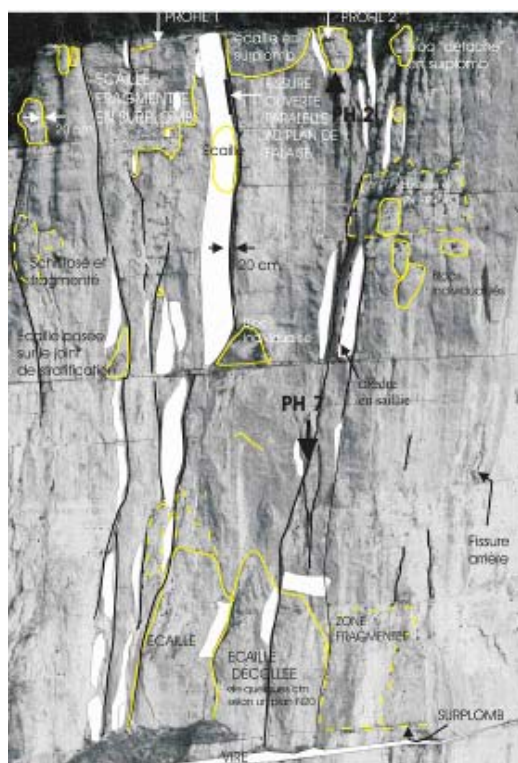
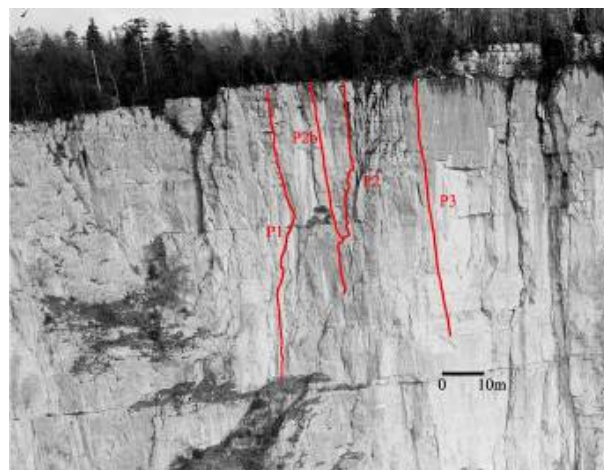


Fig. 3: Levés structuraux effectués sur la paroi

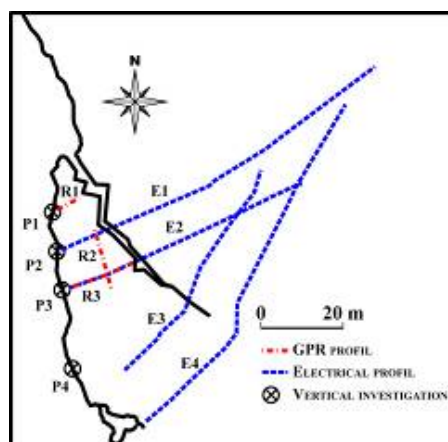


Fig. 2: Vue en plan du plateau et positionnement des profils électriques en surface

La surface synthétique (Fig. 4), obtenue par scannérisation Lidar à partir d'un point de vue situé au Nord du site est montrée à la figure 4.

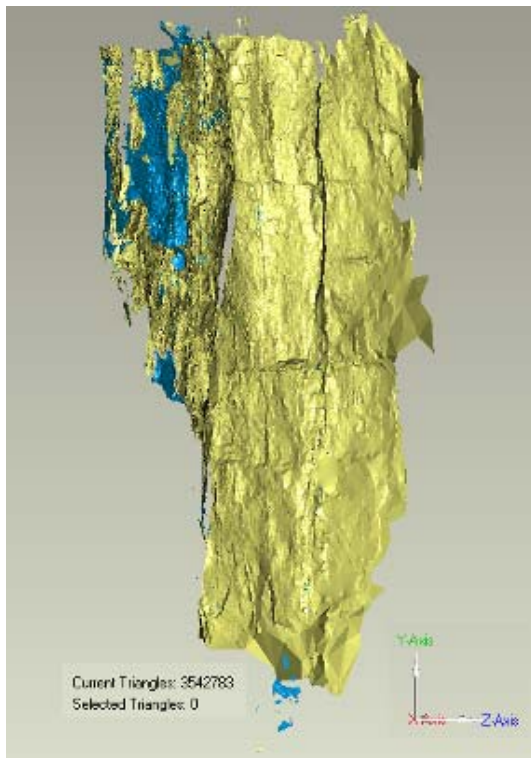


Fig. 4 : Image synthétique 3D de la paroi, obtenue à partir de données Lidar

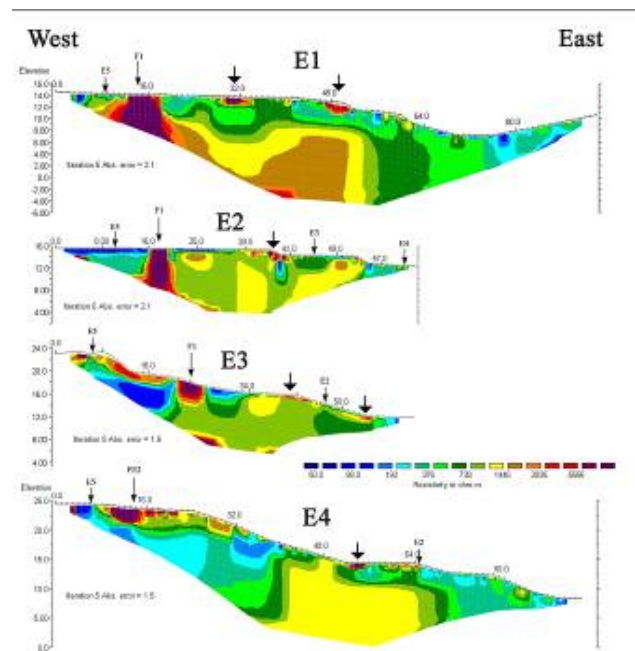


Fig. 5 : Tomographies électriques E1 à E4. L'échelle de résistivité est la même pour les quatre profils. La falaise se trouve du côté ouest

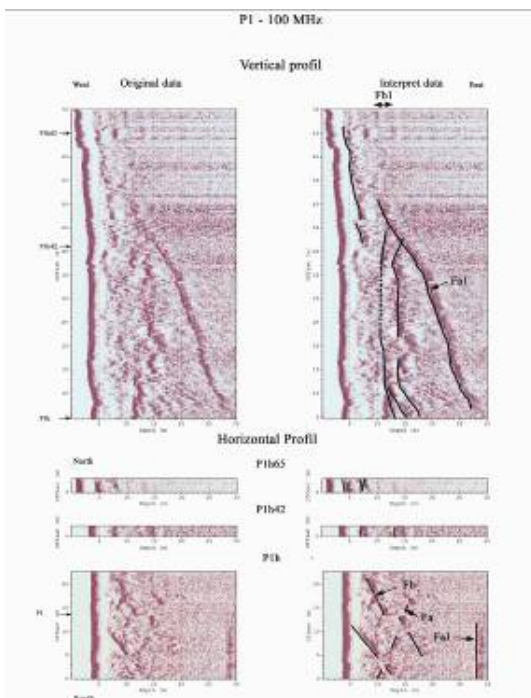


Fig. 6 : Profil radar P1 vertical (haut) et horizontal (bas). A gauche: profils non interprétés. A droite: Profils interprétés.

### Conclusions :

Le massif calcaire du Rocher du Midi est caractérisé par une résistivité électrique comprise entre 700 et 1400  $\Omega\text{m}$  (Fig. 5). La tomographie électrique montre que la fracture visible en surface se referme vers le Sud. La profondeur de pénétration maximale des ondes radar (100 MHz) générées à partir de la paroi est de l'ordre de 25 m. Les profils radar (Fig. 6) montrent la présence de plusieurs réflecteurs correspondant aux deux familles de fractures observées et d'un réflecteur majeur, penté à 60-70° vers l'intérieur du massif. Ce dernier correspond à une fracture parallèle à la faille de Montaud. L'importance et la continuité de cette fracture était impossible à évaluer à partir de données géologiques seules. L'ensemble des fractures détectées ne semble pas susceptible de provoquer une instabilité de grande masse.

# FICHE 3: Dièdre du Ravin de l'Aiguille

L'instabilité potentielle d'une hauteur de 100 m présente une forme de dièdre limité par 2 plans : côté Est, un plan régulier N65 très redressé (noté F5) – côté Ouest, un plan N130 également très redressé (noté F1). Le volume maximal a été initialement estimé à 300 000 m<sup>3</sup>.

Vu l'impossibilité de réaliser des profils radar en paroi, vu les conditions précaires de stabilité des blocs, les reconnaissances seront concentrées sur les 2 fractures latérales limitant ce dièdre et sur l'examen détaillé de la paroi par méthodes morphométriques pour y rechercher d'éventuels indices de fracturation récente.

Fig. 1 : Ravin de l'Aiguille: Vue (de l'Est) de la zone potentiellement instable

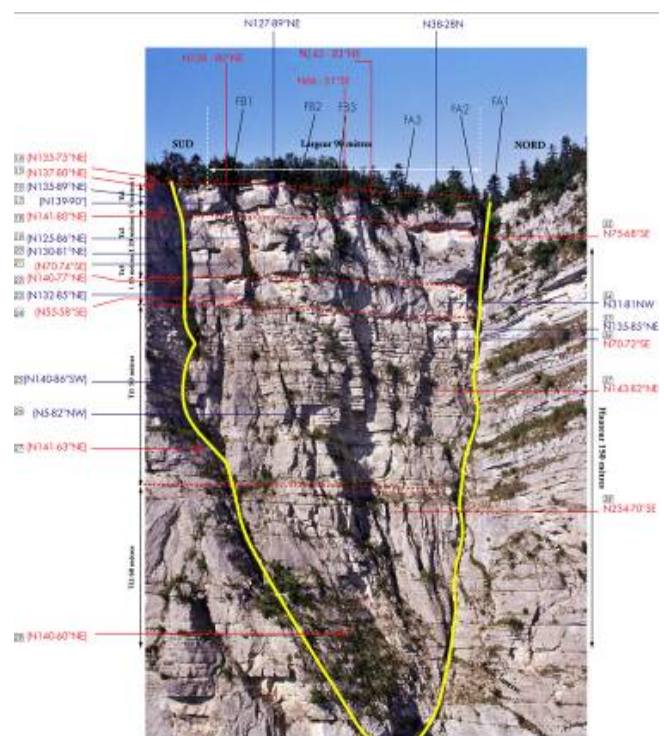
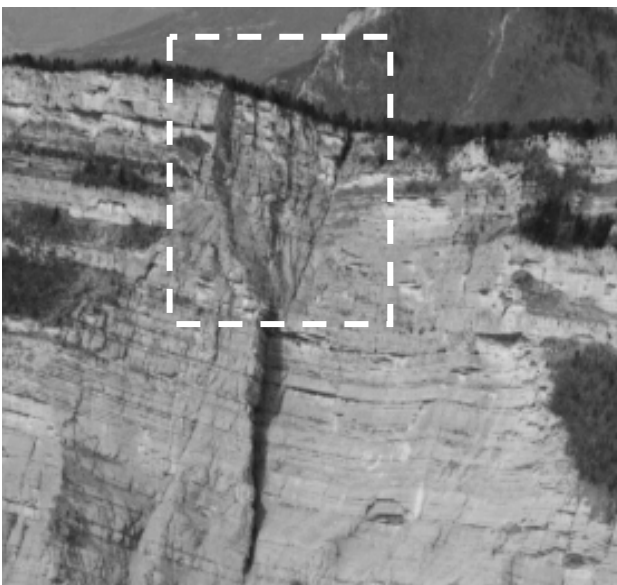


Fig. 3 : Levés structuraux effectués (rouge : mesure sur l'image solide; bleu : mesure sur le modèle photogrammétrique)

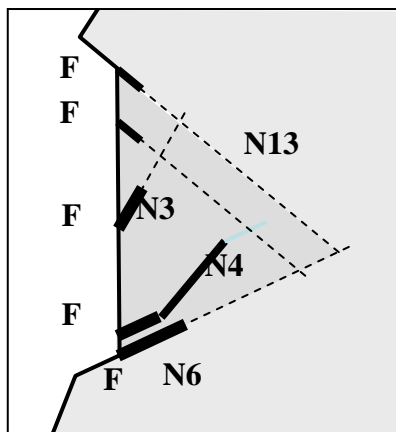


Fig. 2 : Vue en plan du réseau de fractures

Les outils de la morphologie numérique (modèle stéréoscopique et image solide) ont été utilisés dans le cadre cette étude afin d'acquérir des données structurales complémentaires au niveau des principaux plans de fractures émergeant en falaise (Fig.3). La géométrie détaillée de la paroi a été rendue accessible par imagerie Lidar (Fig. 4).

Fig. 5 : Représentation 3D des tomographies électriques

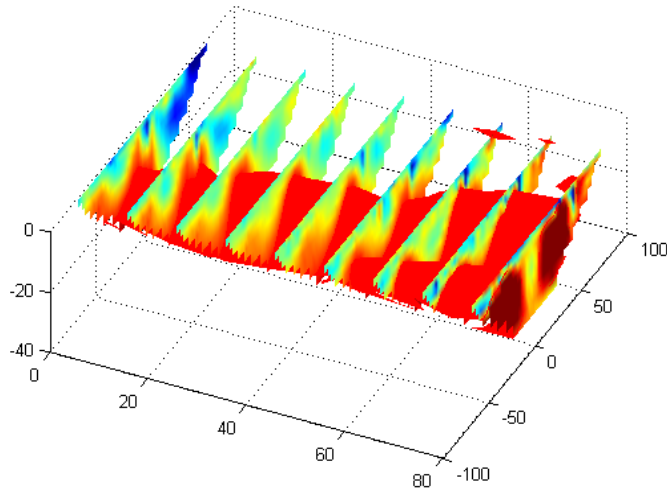


Fig. 4: Vue 3D du nuage de points colorisé (données Lidar)

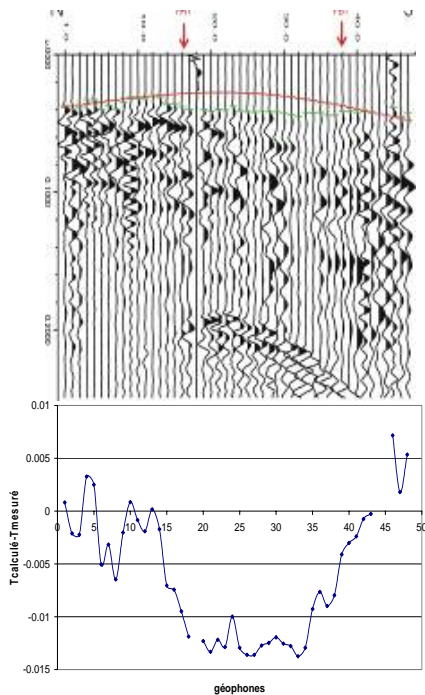


Fig.6 (a) : Tir sur la pointe du dièdre pour le profil PS1, en vert pointé réel, en rouge pointé estimé pour un milieu fracturé N 70°, (b) et différence entre les temps réel et estimé

#### Conclusions :

Les données électriques (Fig. 5) et sismiques (Fig. 6) ont permis de délimiter les limites latérales du dièdre fracturé, caractérisé par une plus grande résistivité électrique et une plus faible vitesse de propagation sismique.

L'ensemble des résultats obtenus ont permis de mieux cerner la géométrie du dièdre fracturé (190 000 m<sup>3</sup>), susceptible de s'ébouler.

## FICHE 4: Rocher de la Bourgeoise

Situé dans le Vercors, le site du Rocher de la Bourgeoise est une écaille potentiellement instable d'environ 3000 m<sup>3</sup> située au sommet d'une falaise de 400 m de haut. Il est situé dans un secteur qui, historiquement, a connu de nombreux éboulements rocheux. La cicatrice supposée d'un ancien éboulement historique datée du 17<sup>ème</sup> siècle est toujours visible sur la falaise des Rochers de la Bourgeoise. Vu la difficulté d'accès et l'absence de bons points de vue, une scannérisation Lidar avec prise de vues hélicoptérée a été réalisée (Figs. 3 et 4). Cette étude a permis d'établir le levé structural des fractures du site.

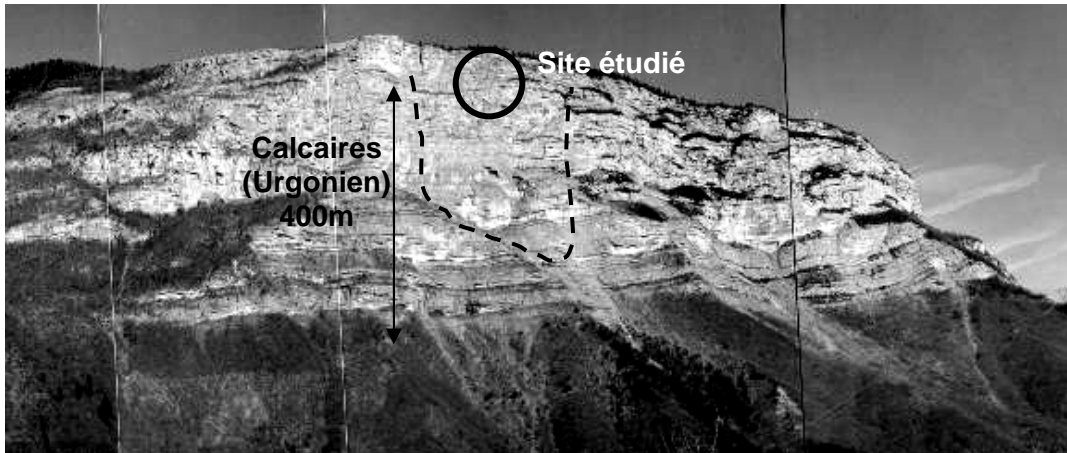


Fig. 1: Vue du site étudié et de la trace de l'éboulement historique



Fig. 2: Dispositif combiné de scannérisation Lidar et de prise de vues

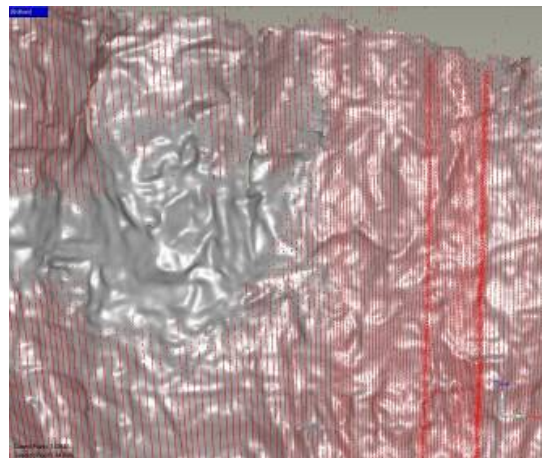


Fig. 3: Localisation des lignes de scannérisation Lidar lors d'un balayage hélicoptéré de l'escarpement.

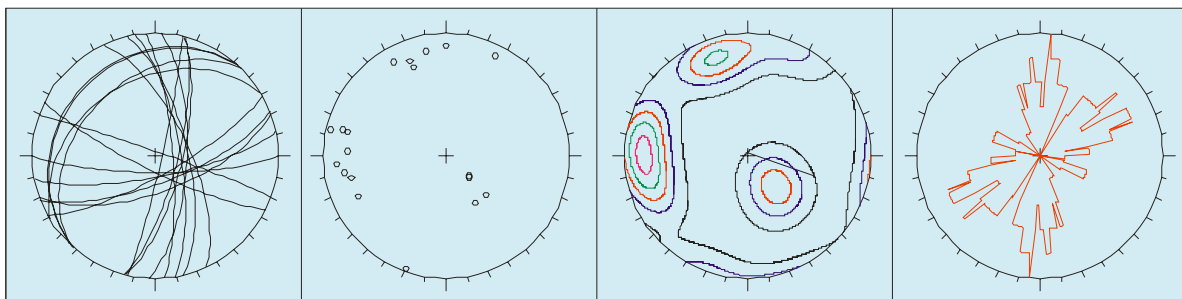


Fig. 4: Principales discontinuités, mesurées sur modèle stéréoscopique. De gauche à droite : traces des plans, pôles des plans, courbes d'isodensité de pôles et diagramme en rose.

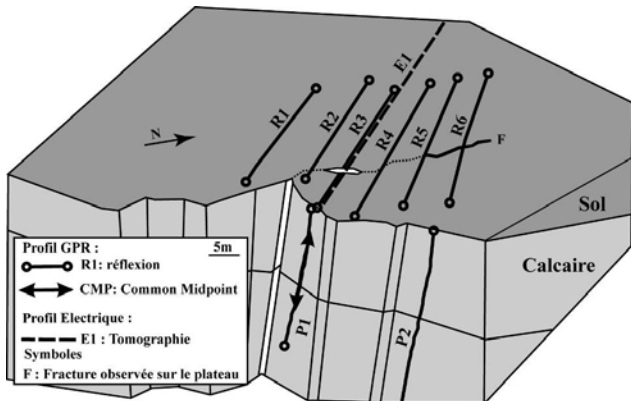


Fig. 5: Bloc diagramme montrant la localisation des mesures géophysiques

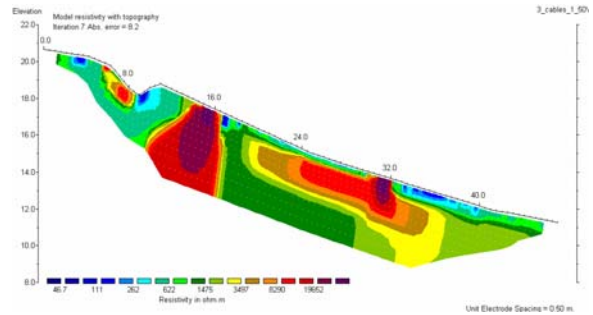


Fig. 6: Tomographie électrique sur le plateau des Rochers de la Bourgeoise.

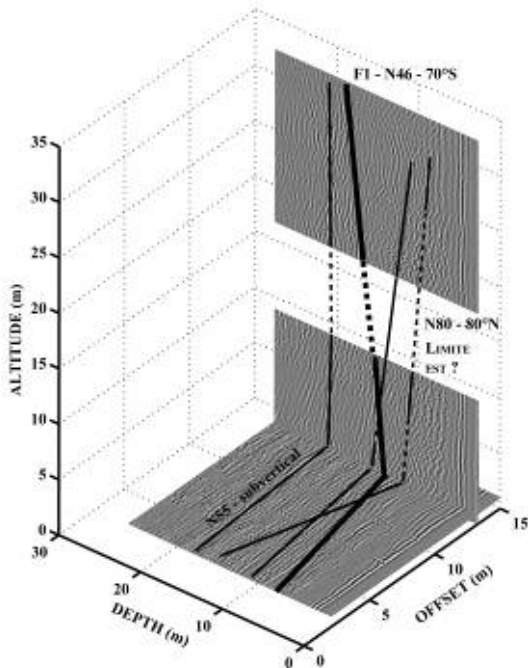
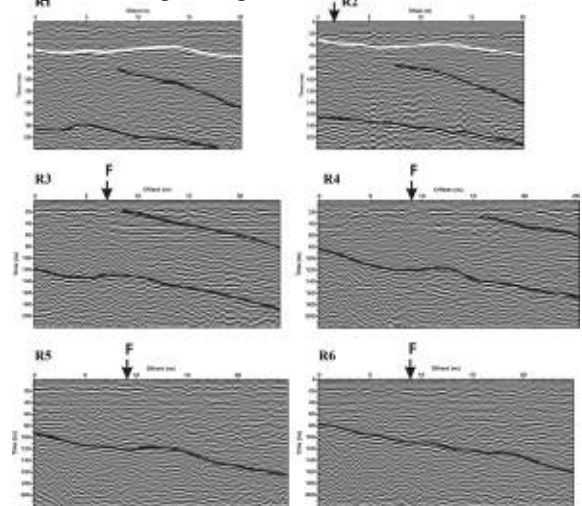


Fig. 7 Visualisation 3D du profil radar P2 avec le profil horizontal

Fig. 8: Imagerie géoradar de subsurface



Une campagne géophysique (Fig. 1) comportant trois profils radar en falaise (Fig. 7), six en surface (Fig.8) , et une tomographie électrique sur le plateau (Fig. 6) a été réalisée sur le site du Rocher de la Bourgeoise. L'objectif principal était de localiser et d'imager les principales fractures découpant le massif calcaire et susceptibles de délimiter un compartiment potentiellement instable. L'ensemble des fractures mises en évidence par le radar en falaise et la tomographie électrique délimite une configuration géométrique potentiellement instable

## 5.2 ANNEXE 2 Fiches présentant la stratégie de reconnaissance



## PROJET CAMUS

# Guide méthodologique

*Caractérisation de l'aléa d'éboulement*

Stratégie de reconnaissance

# Caractérisation de l'aléa d'éboulement

## 1. Phase préparatoire

E1: Recherche documentaire

E2 : Visite préalable du site

E3: Acquisition de photos géoréférencées hélicoptère

E4 : Etablissement plan de reconnaissance

## 2. Phase de reconnaissance

E5 : Levé topographique de surface

E6 : Observations géologiques détaillées

E7 : Essais géophysiques (surface et/ou paroi)

E8 : Mesures Lidar

## 3. Phase de synthèse

E9 : Interprétation des données

E10 : Modèle géométrique pour analyse de stabilité

1

# 1. Phase préparatoire

## E1: Recherche documentaire

- Cartes topographiques
- Cartes géologiques
- Photos aériennes
- Recherches historiques
- Rapports, témoignages

## E3: Mission héliportée \*

- Prise de photos stéréoscopiques par hélicoptère avec géoréférencement (sauf si déjà disponibles)
- Observations géologiques sur photos

\* *Étape conditionnelle*

## E2 : Visite de site

- Repérage, accessibilité en surface et paroi
- Faisabilité Lidar Terrestre
- Evaluation des risques pour intervention en falaise
- Faisabilité des méthodes géophysiques
- Observations géologiques

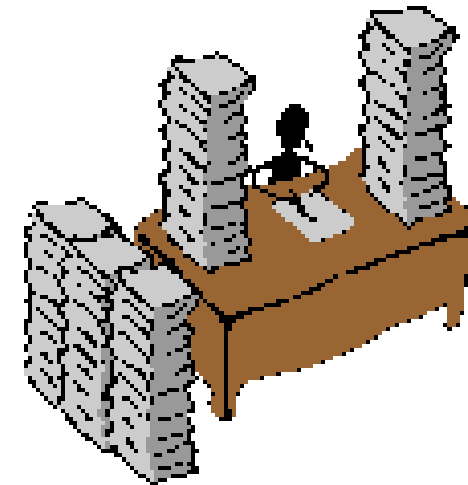
## E4 : Plan de reconnaissance

- Elaboration de la campagne de reconnaissance
- Chronologie des interventions
- Estimation des coûts

②

## E1: Recherche documentaire

- Cartes topographiques
- Cartes géologiques
- Photos aériennes
- Recherches historiques
- Rapports, témoignages

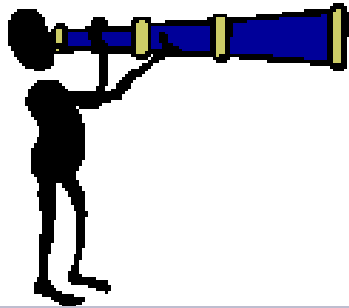


1. Phase préparatoire

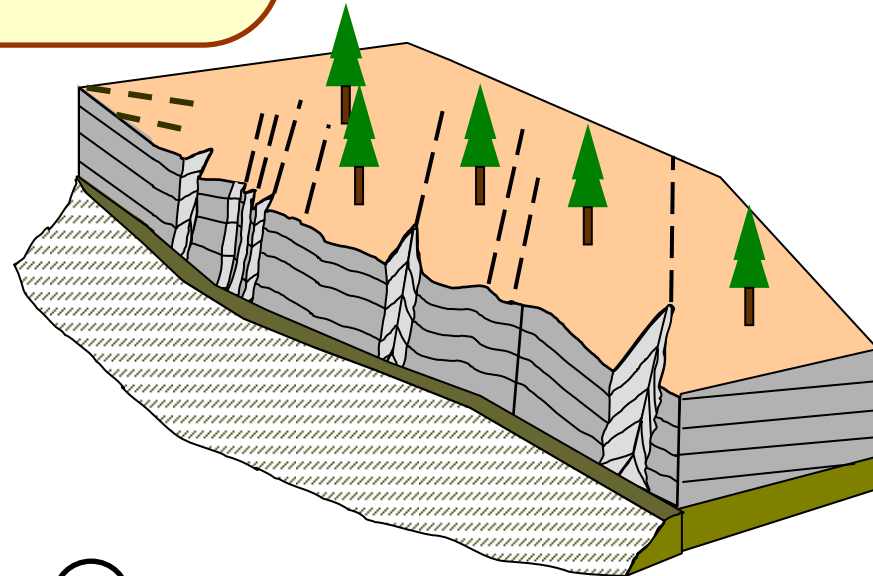
3

## E2 : Visite préalable du site

- Repérage: accessibilité en surface et paroi
- Faisabilité Lidar Terrestre
- Evaluation stabilité des blocs
- Faisabilité des méthodes géophysiques
- Observations géologiques



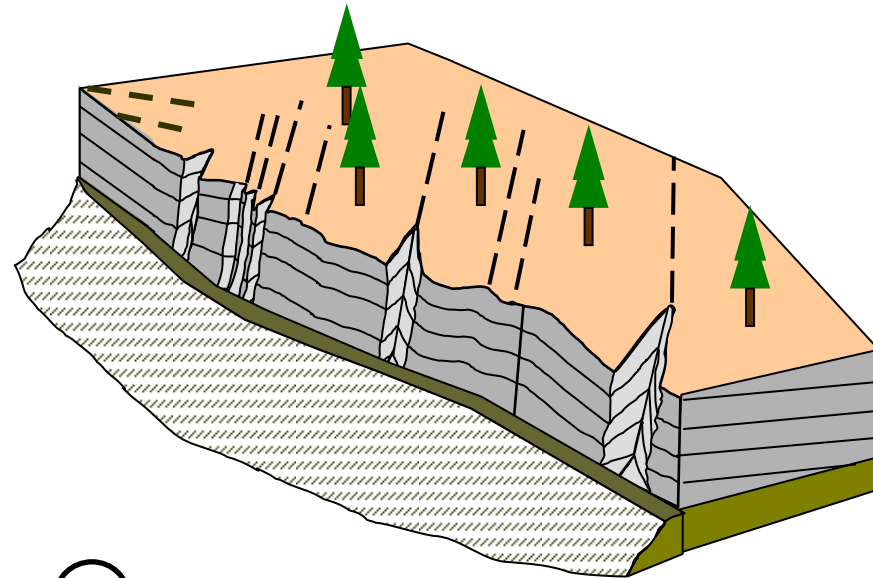
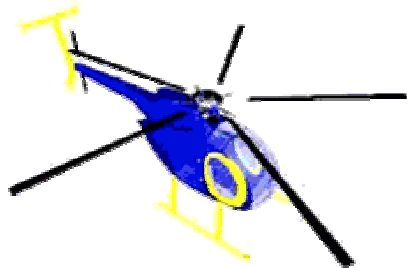
1. Phase préparatoire



4

## E3: Mission héliportée \*

- Prise de photos stéréoscopiques par hélicoptère avec géoréférencement au GPS (sauf si déjà disponibles)
- Observations géologiques sur photos

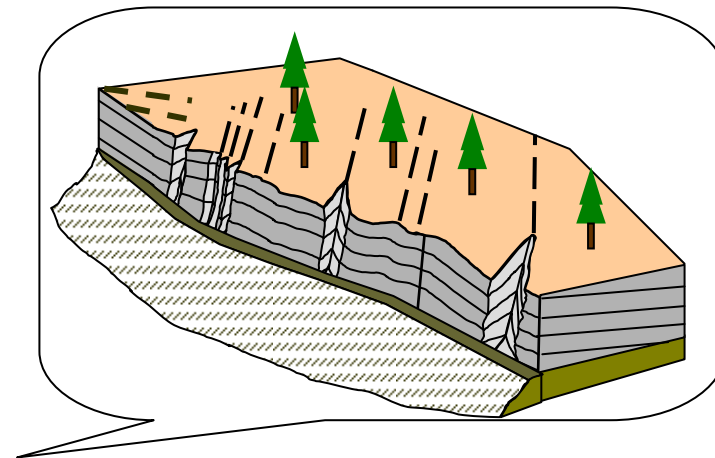
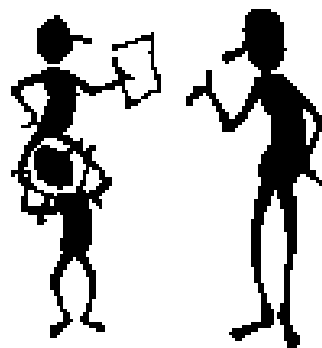
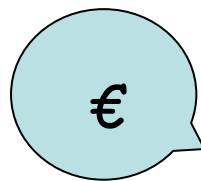


1. Phase préparatoire

5

## E4 : Plan de reconnaissance

- Elaboration de la campagne de reconnaissance
- Chronologie des interventions
- Estimation des coûts



1. Phase préparatoire

6

## 2. Phase de reconnaissance

### E5 : Levé topographique de surface

- Levé topographique du plateau
- Etape simultanée avec observations géologiques (E6)

### E7: Essais géophysiques

- **a**: Essais géophysiques (sismique, électrique) sur le plateau
- **b\***: Si possible, profils radar en paroi avec mise en place de témoins réfléchissants

### E6 : Observations géologiques détaillées

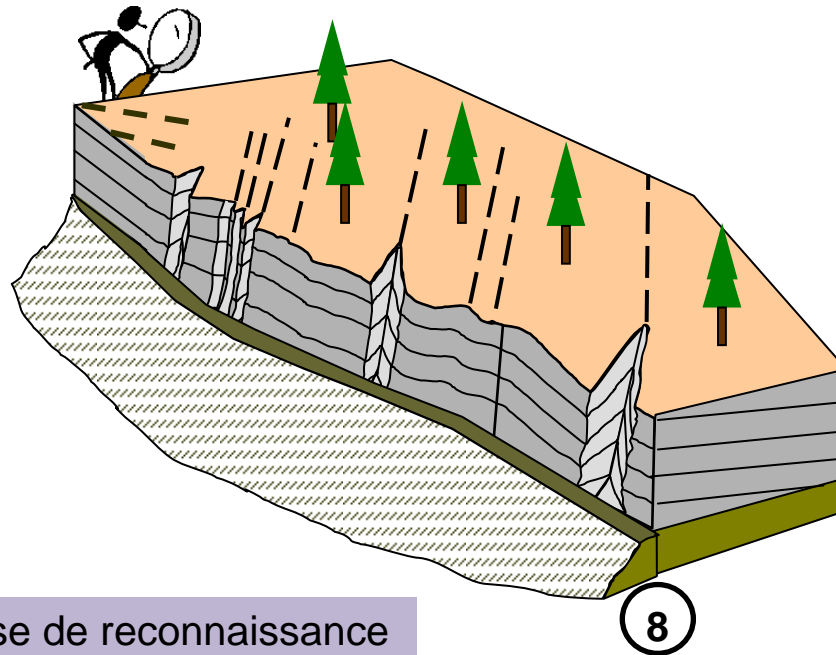
- Levé géologique du plateau (commun avec E5) pour repérage des fractures
- Si possible, étude géologique de la paroi
- Evaluation des conditions de réalisation du radar en falaise
- Exploitation détaillée des photos stéréoscopiques

### E8 : Mesures Lidar

- Si points de vue de qualité, mesures lidar terrestres avec photos
- Si pas de points de vue, mesures lidar héliportées avec photos

## E5 : Levé topographique de surface

- Levé topographique du plateau
- Etape simultanée avec observations géologiques (E6)

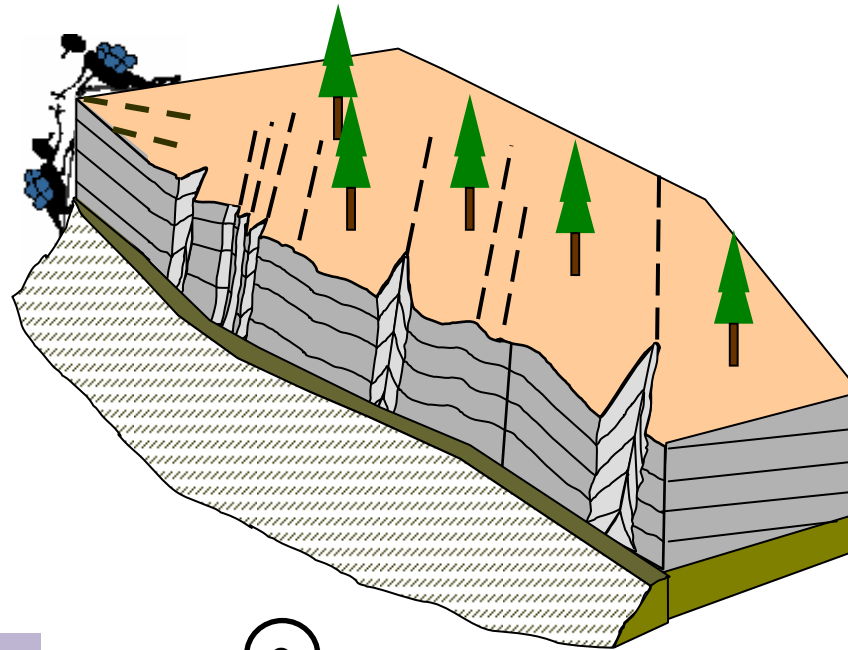


2. Phase de reconnaissance

8

## E6 : Observations géologiques détaillées

- Levé géologique du plateau (commun avec E5) pour repérage des fractures
- Si possible, étude géologique de la paroi

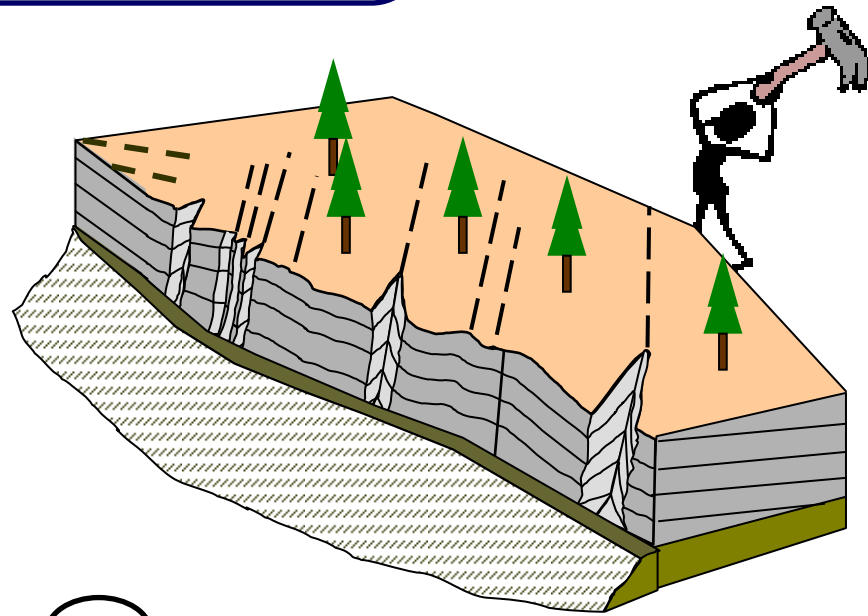


2. Phase de reconnaissance

9

## E7 : Essais géophysiques

- **a**: Essais géophysiques (sismique, électrique) sur le plateau
- **b\***: Si possible, profils radar en paroi avec mise en place de témoins réfléchissants

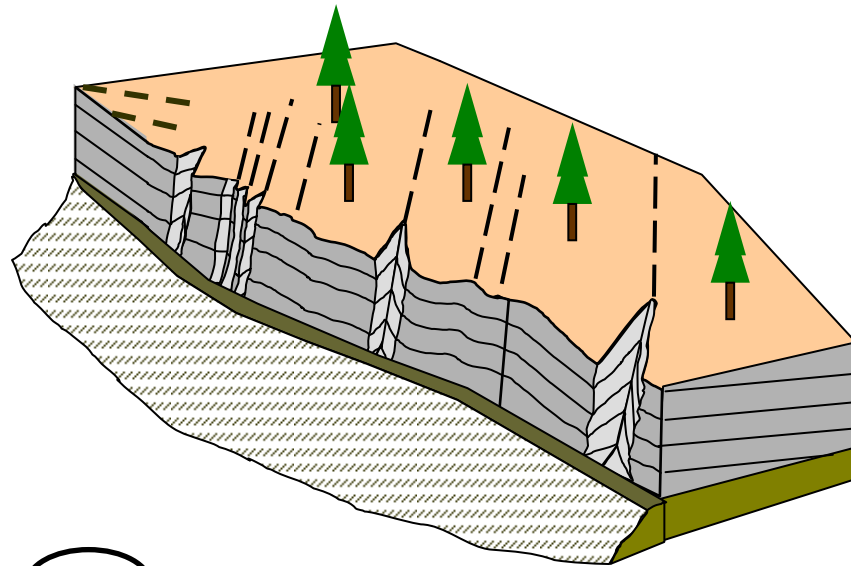


2. Phase de reconnaissance

10

## E8 : Mesures Lidar

- Si points de vue de qualité, mesures lidar terrestres avec photos
- Si pas de points de vue, mesures lidar héliportées avec photos



2. Phase de reconnaissance

11

## 3. Phase de synthèse

### E9 : Interprétation des données

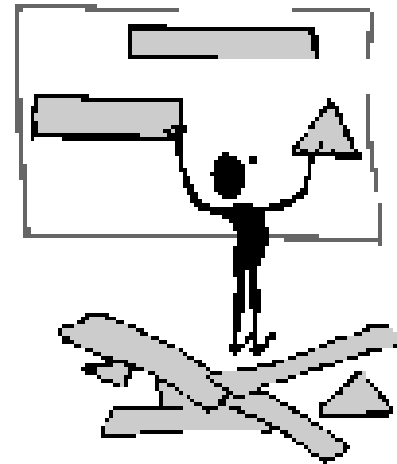
- Construction et analyse structurale de l'image solide de la paroi
- Interprétation des données géophysiques sur le plateau et en paroi
- Synthèse des données géologiques, géophysiques et géodésiques

### E10 : Modèle géométrique 3D

- Détermination de la géométrie 3D des blocs potentiellement instables pour analyse de stabilité
- Rédaction du rapport

## E9 : Interprétation des données

- Construction et analyse structurale de l'image solide de la paroi
- Interprétation des données géophysiques sur le plateau et en paroi
- Synthèse des données géologiques, géophysiques et géodésiques



## E10 : Modèle géométrique 3D

- Détermination de la géométrie 3D des blocs potentiellement instables pour analyse de stabilité
- Rédaction du rapport



# Evaluation des coûts (ordre de grandeur 12/2006)

	Personnel	Temps	Coût €
E1	1 Ing	2 j	1000
E2	1 Ing/1tech	1 j	850
E3*	1 Ing	1j	500 + 1200/h hélico
E4	1 Ing	½ j	250
E5	1 Ing/1tech	2 j	1700
E6	1Ing/1tech	2j	1700
E7a	1Ing/3tech	3 j	7500 *
E7b	1guide/1Ing/2tech	3 j	0 – 6000*
E8	<b>Terrestre:</b> 1 ing/ 1 tech <b>Hélico:</b> 1 ing/ 1 tech	1 ½ j 1j + 2j	4000* 8000*
E9	1 Ing	6 j	3000
E10	1 Ing	4 j	2000
Total			<b>24 à 34 k €</b>

\* Location et préparation matériel comprises

# Evaluation des coûts (ordre de grandeur)

	Description	Coût €
E1	Recherche documentaire	1000
E2	Visite préalable du site	850
E3*	Acquisition de photos hélicoptère	500 + 1200/h hélico
E4	Etablissement plan de reconnaissance	250
E5	Levé topographique de surface	1700
E6	Observations géologiques détaillées	1700
E7a	Essais géophysiques (surface)	7500 *
E7b	Essais géophysiques (paroi)	0 – 6000*
E8	Mesures Lidar terrestres	4000*
	Mesures Lidar hélicoptère	8000*
E9	Interprétation des données	3000
E10	Modèle géométrique	2000
Total		<b>24 à 34 k €</b>

\* Location et préparation matériel comprises