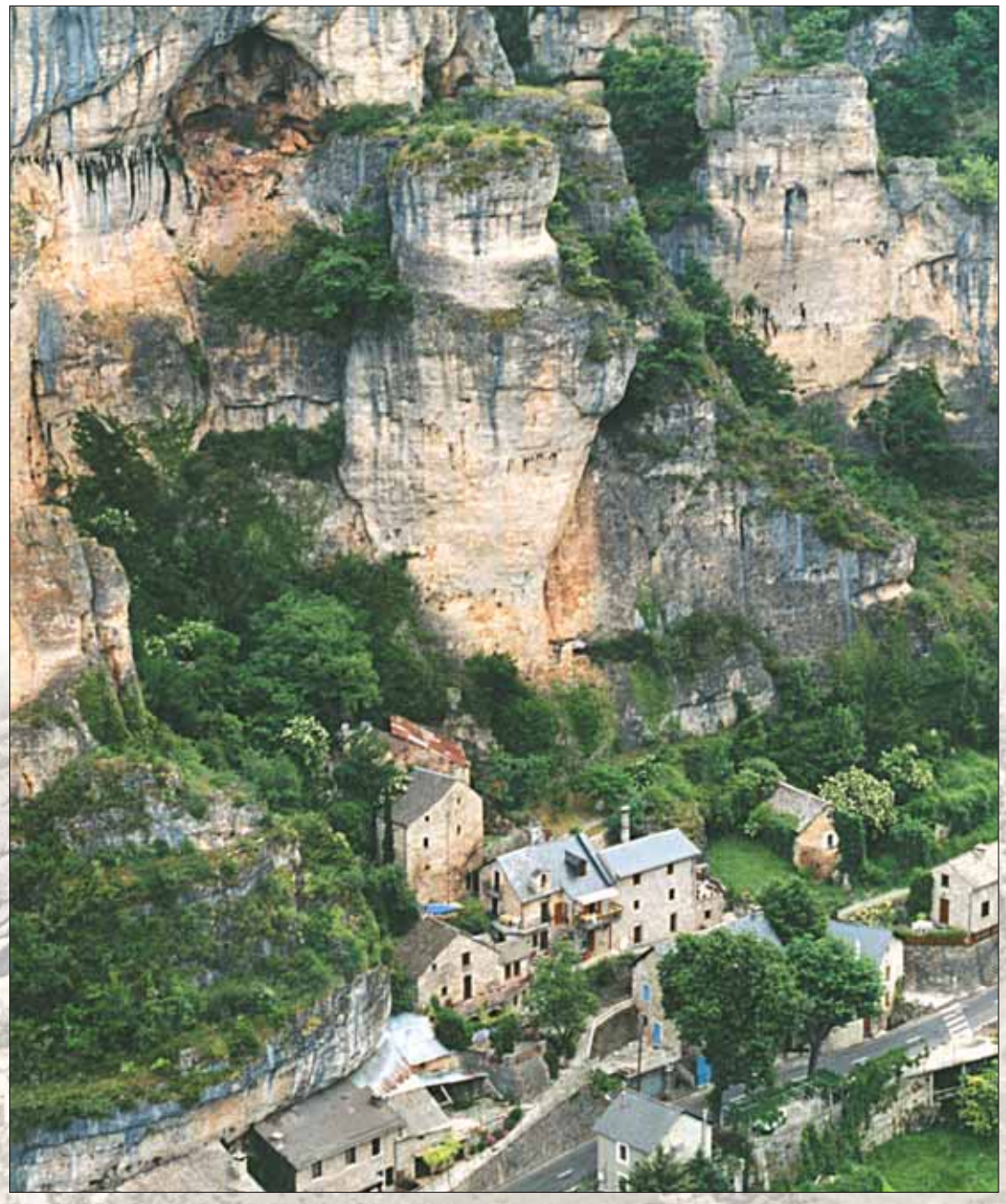
ISSN 1151-1516

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

COLLECTION ENVIRONNEMENT
Les risques naturels



Guide technique

Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.

(CC BY-NC-ND 4.0)

Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.

Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autoriser à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.

Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai

IFSTTAR

www.ifsttar.fr

Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,
de l'Aménagement et des Transports
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : diffusion-publications@ifsttar.fr

Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux

Guide technique

Juin 2004

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
58, bd Lefebvre, F 75732 Paris Cedex 15

Ce document a été élaboré par un groupe de travail animé par les Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées de Lyon et d'Aix-en-Provence, avec l'appui du ministère de l'Écologie et du Développement durable (direction de la Prévention des pollutions et des risques).

Il a été rédigé par :

- Laurent Effendiantz (LRPC de Lyon),
- Pierre Guillemin (LRPC de Lyon),
- Louis Rochet (LRPC de Lyon),
- Jean-Claude Pauly (LRPC d'Aix-en-Provence),
- Michel Payany (LRPC d'Aix-en-Provence).

Les auteurs remercient les Laboratoires régionaux des Ponts et Chaussées de Clermont-Ferrand, Nice et Toulouse pour leur contribution et Jean-Louis Durville, CETE de Lyon, pour la relecture du document.

Pour commander cet ouvrage :

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
IST-Diffusion des éditions
58, boulevard Lefebvre
F-75732 PARIS CEDEX 15
Téléphone : 01 40 43 50 20
Télécopie : 01 40 43 54 95
Internet : http:/www.lcpc.fr

Prix : 21 Euros HT

En couverture : Habitations construites au pied de parois rocheuses dans les Gorges du Tarn (Lozère).

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE
DE L'ÉCOLOGIE
ET DU DÉVELOPPEMENT
DURABLE

ministère
de l'Équipement
des Transports
du Logement
du Tourisme
et de la Mer

Ce document est propriété du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son directeur général (ou de ses représentants autorisés).

© 2004 - LCPC
ISSN : 1151-1516
ISBN : 2-7208-0363-4

Sommaire

Préambule 5

Chapitre 1. Structure de la démarche 7

1.1 La couche sources 7
1.2 La couche évaluation 7

Chapitre 2. Formulation de la démarche Définition du cahier des charges 11

Chapitre 3. Collecte des données préliminaires et approche d'ensemble. Couche sources 13

3.1 Recherche documentaire 13
3.2 Approche historique 14
3.3 Approche géologique 15
3.4 Approche structurale 16
3.5 Approche morphologique 19
3.6 Approche hydrogéologique, hydrologique et climatique 20
3.7 Données relatives au couvert végétal 21
3.8 Mécanismes d'évolution des versants rocheux 21
3.9 Sectorisation 22
3.10 Les techniques de représentation du terrain 27

Chapitre 4. Identification et caractérisation des instabilités. Couche évaluation 35

4.1 Localisation et identification des instabilités potentielles 35
4.2 Qualification de l'aléa de rupture 44
4.3 La propagation - Approche qualitative - Trajectographies 52

Chapitre 5. Détermination des aléas résultants 59

Chapitre 6. Annexe : Fiches de cas 63

Chapitre 7. Glossaire. Bibliographie 83

Préambule

Le réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées couvre l'ensemble du territoire français et mobilise ses moyens, son expérience et ses compétences, principalement au service de l'État, des Collectivités locales et des organismes publics et parapublics. Les Risques naturels font partie des domaines d'action prioritaires des Laboratoires.

Depuis le début des années 1970, les Laboratoires des Ponts et Chaussées ayant des territoires montagneux dans leur champ d'action ont progressivement affirmé une doctrine concernant l'étude des aléas d'éboulements rocheux.

Le présent guide a pour objectif de formaliser les expériences et les pratiques mises au point, affinées et reconnues au travers de nombreuses études d'aléa rocheux. Ces études de type ingénierie, caractérisées par leur exhaustivité et ayant finalité à déboucher sur des propositions de parades, également appelées études spécifiques, sont orientées vers la réduction du risque, alors que les études amont se situent à un niveau préliminaire et sont destinées préférentiellement à l'affichage des risques et aux zonages réglementaires. Ces études générales amont, très brièvement évoquées dans le présent guide, font l'objet de guides particuliers.

L'approche de terrain a été privilégiée par rapport à d'autres méthodes plus globales. Ce parti pris est justifié par l'exigence de précision et d'exhaustivité des études de type ingénierie. Il a été admis dans ce guide que la Géologie et la Mécanique des Roches étaient des disciplines familières au lecteur.

Seuls sont traités les aspects détection, qualification et affichage des aléas. Les mesures de sécurisation ont été exclues car ce domaine fait l'objet d'un guide particulier qui concerne plus particulièrement la définition des parades.

Indépendamment de l'aspect « recueil des bonnes pratiques » orienté vers la transmission des connaissances, ce guide à pour objet de codifier les critères de mise en évidence et de caractérisation des aléas ainsi que le rendu des documents d'études géomécaniques. Quelques exemples d'études sont présentés en annexe.

L'essentiel du document traite de l'aléa d'écroulement, encore appelé aléa de rupture ou de départ. L'aléa de propagation est abordé en introduction à l'utilisation des outils d'analyse de propagation et permet d'aboutir à l'aléa dit résultant.

Ce document accorde une grande importance à l'établissement et à l'utilisation des plans à grande échelle et aux prises de vues terrestres, aériennes ou héliportées. Le recours à ces techniques est largement justifié par l'exigence de qualité et de précision de la démarche, par les difficultés d'accès et par les problèmes de repérage inhérents à la configuration sauvage et escarpée de la plupart des sites d'études. Une description détaillée des exigences propres à ces techniques est présentée en encarts au texte.

Chapitre 1

Structure de la démarche

Pour garder une vue d'ensemble sur la finalité de la démarche, les différentes étapes du processus sont énoncées brièvement ci-après, le détail étant accessible dans les chapitres concernés.

La problématique de formulation de la commande par le « service », ou d'une manière plus générale le « demandeur », est abordée en premier lieu au *chapitre 2. Formulation de la commande. Définition du cahier des charges*. Le contexte de responsabilité particulier au domaine risques naturels implique en effet de bien cadrer, dès la phase d'initialisation de la commande, l'extension géographique et le niveau de l'étude.

La méthodologie de l'étude spécifique proprement dite procède d'une approche par *couches successives d'informations*, démarche permettant de bien identifier les étapes du travail et d'éviter de recommencer les mêmes choses, notamment dans le cas, très courant, d'interventions successives sur un même site.

On distingue chronologiquement la *couche sources* et la *couche évaluation* qui font appel toutes les deux à des investigations sur le terrain et à des collectes de documents (Fig. 1).

1.1 La couche sources

Ces sources d'information dont la liste est donnée dans le diagramme (Fig. 1) font l'objet du *chapitre 3 - Collecte des données préliminaires et approche d'ensemble.*

Elles sont renseignées par l'exploitation et l'interprétation de l'ensemble de la documentation existante ainsi que par les données de terrain concernant la zone étudiée, tous éléments permettant d'aboutir à une première sectorisation du périmètre d'étude ou à une application directe à un secteur déterminé.

1.2 La couche évaluation

Cette couche dont la teneur est donnée ci-après fait l'objet du *chapitre 4 - Identification et caractérisation des instabilités.*

L'évaluation porte sur les différents constituants de l'aléa, en particulier l'aléa de rupture et l'aléa de propagation, afin d'aboutir *in fine* à l'aléa résultant qui concerne l'ensemble du versant.

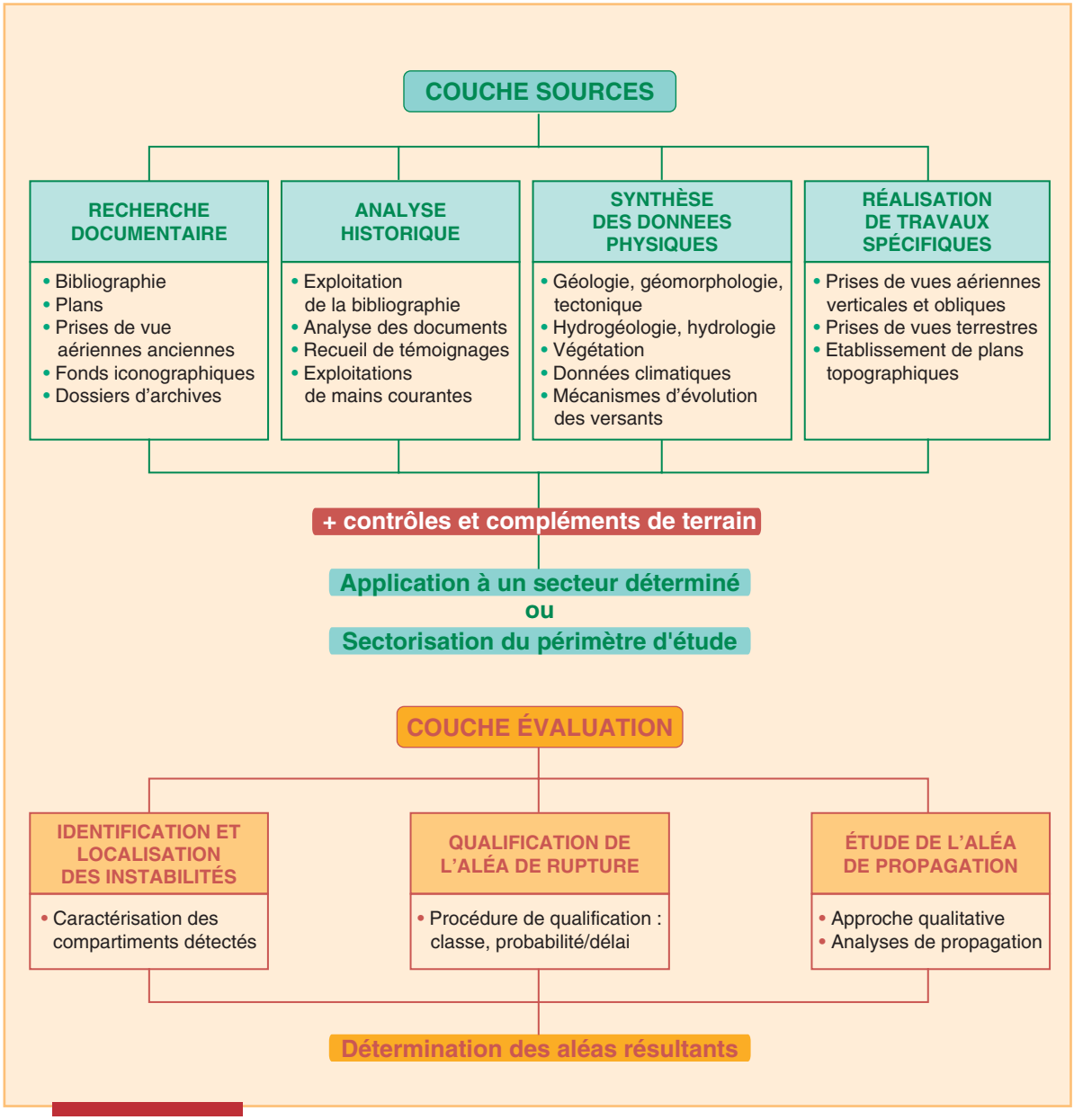


Figure 1
Diagramme présentant les principaux éléments d'une étude de risque rocheux.

La démarche précédente s'applique aux études d'une certaine importance, concernant par exemple un linéaire de falaises (de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres) à l'origine de chutes de blocs récurrentes et impliquant une action de sécurisation. Cependant, même pour les interventions très ponctuelles ou « à chaud », on s'efforcera de faire référence à toutes les rubriques de la figure 1, en signalant le cas échéant les raisons pour lesquelles certaines rubriques n'ont pu être renseignées.

Les recommandations de ce guide ne sont pas applicables telles quelles aux études de cartographie d'aléa réalisées notamment dans le cadre des plans de prévention des risques : si la démarche est la même, l'importance des surfaces couvertes ne permet pas, en général, de travailler avec le détail et la précision exigés pour les études spécifiques.

Chapitre 2

Formulation de la commande. Définition du cahier des charges

Le cahier des charges d'une étude spécifique est établi par le demandeur avec le concours éventuel d'une expertise extérieure.

L'*objectif et le niveau de l'étude* doivent être clairement précisés. Il peut s'agir :

- d'une étude à finalité de zonage, dans une optique d'aménagement du territoire,
- d'une étude de niveau préparatoire comportant une estimation de référence du coût des parades,
- d'une étude opérationnelle devant permettre la réalisation des parades. Pour certains travaux importants ou complexes (grands ouvrages de confortement, galeries pare-blocs, merlons, etc.), un projet d'exécution particulier est à établir sur la base des dispositions du dossier d'étude spécifique,
- d'une étude orientée vers la surveillance en tant que moyen de sécurisation d'une zone. Ce type d'étude comporte la faisabilité technique de la surveillance et l'interprétation des résultats des mesures,
- d'une étude destinée à mettre en place des mesures préventives d'évacuation dans le cadre de l'application de la loi Barnier,
- d'une intervention « à chaud » après un événement particulier.

Les demandes d'interventions « informelles » devront être reformulées et soumises au donneur d'ordre avant toute intervention.

La *délimitation de la zone d'étude* présente un caractère contractuel qui nécessite en général une réunion préalable et une visite de la zone concernée :

- les limites seront, de préférence, calées sur des limites topographiques et morphologiques caractéristiques et significatives vis-à-vis de la localisation et de l'évaluation de l'aléa d'écroulement et de propagation (lignes de thalwegs et de crêtes définissant un découpage naturel du site),
- à défaut d'être connues ou prédéterminées par le client, les limites devront être précisées explicitement dans la proposition d'étude,
- il peut s'avérer éventuellement nécessaire de modifier la délimitation au cours de l'étude en fonction des données mises en évidence par celle-ci. Ces nouvelles limites feront l'objet d'une procédure de validation par le donneur d'ordre,
- les instabilités perçues à l'extérieur du périmètre d'étude, lors des phases de travail sur le terrain, seront portées à connaissance du donneur d'ordre.

La *détermination de la période d'étude* devra tenir compte des contraintes particulières au site :

- choix de la saison pour les travaux photo-topographiques (masque dû au feuillage des végétaux ou à la neige),
- choix de la saison d'intervention sur le terrain pour la visibilité (végétation), l'accessibilité (neige en altitude) et la sécurité du travail.

La *teneur de l'étude* est à définir dans chaque cas en reprenant tout ou partie du canevas ci-après :

- étude historique spécifique,
- exploitation des archives et des études antérieures,
- analyse des cartes thématiques, des photos aériennes, des documents et bibliographies spécifiques,
- travaux photo-topographiques,
- levés de terrain, morphologiques, structuraux, lithologiques,
- étude de propagation, simulations trajectographiques,
- interprétation, synthèse, caractérisation de l'aléa,
- définition des parades (prédimensionnement ou dimensionnement, estimation des coûts, spécifications techniques)*,
- assistance pour la rédaction des pièces techniques intégrables au DCE, assistance pendant les travaux*.

On se référera à la norme NF P 94-500 « Missions géotechniques», juin 2000.

* *Parties non abordées dans le présent document.*

CHAPITRE 3

Collecte des données préliminaires et approche d'ensemble. Couche sources

3.1 Recherche documentaire

3.1.1 Objectif

Une exploitation optimale des archives est un élément important de la maîtrise des coûts et des délais ; elle permet notamment d'éviter de refaire des études ou investigations déjà réalisées.

Par ailleurs, un des objectifs du présent guide est d'inciter les praticiens à organiser un archivage efficace.

3.1.2 Méthode

Il s'agit de faire l'inventaire des documents en rapport avec l'étude ou pouvant servir à celle-ci, de les consulter et d'évaluer leur pertinence (au regard du sujet de l'étude).

3.1.3 Les axes d'investigation bibliographique

- Consultation des fonds d'archives événementielles, de bibliographies et de documents divers disponibles aux Archives départementales ou municipales, etc.,
- consultation des fonds de documentation et d'archives des Laboratoires et des Services (études antérieures générales ou de détail, suivis, etc.),

➢ consultation des fonds cartographiques : plans à grande échelle résultant de commandes particulières, cartes topographiques de l'IGN, cartes thématiques (géologiques, morphologiques, géotechniques), fonds de plans numériques (SCAN 25, BD CARTO, etc.),
➢ photographies aériennes : missions particulières archivées dans les services, couvertures systématiques de l'IGN.

3.1.4 L'exploitation des archives

Il convient de toujours conserver une trace écrite de la démarche, même en ce qui concerne les actions qui se sont révélées infructueuses.

3.2 Approche historique

3.2.1 Définition

Il s'agit d'appliquer les méthodes d'études historiques à l'analyse des sources d'information historiques et documentaires contenues dans divers fonds d'archives.

3.2.2 Objectif

D'une manière générale, la recherche historique vise à donner des repères, dans le temps et dans l'espace, à des phénomènes qui se reproduisent de façon apparemment aléatoire. Il s'agit pour cela :
➢ d'extraire des fonds d'archives des informations relatives à l'existence et au degré d'activité des phénomènes naturels dans la zone concernée par l'étude, sous forme de textes ou d'illustrations (fig. 2),
➢ de fournir une base historique à l'identification des éboulements antérieurs (contribution à la détermination de l'aléa de référence),
➢ de fournir une base historique qui appuie les hypothèses relatives à la qualification de l'aléa (sites importants où la qualification est parfois difficile),
➢ de traduire la « dimension historique » de l'évolution géologique du site.

Figure 2
Entrée des Pas de souci, gorges du Tarn. Dessin de Vuiller, 1882.

3.2.3 Méthode

Cette phase consiste essentiellement à :

- Identifier les sources potentielles :
  - presse locale,
  - archives départementales et communales,
  - sociétés et associations d'histoire locale,
  - témoins, personnes âgées, « conteurs », etc.,
- établir un cahier des charges de l'étude historique en ne négligeant pas l'approche toponymique,
- analyser les archives techniques (subdivision territoriales, DDA, ONF, RTM, Gendarmerie et autres services de l'État),
- croiser fréquemment les informations historiques et techniques,
- identifier, dans la mesure du possible, les éléments relatifs aux circonstances et à la périodicité des événements,
- évaluer le degré de fiabilité et de représentativité de chaque information.

On prévoira un délai assez long car cette phase historique peut se dérouler sur toute la durée du programme général de l'étude. Pour les études de grande envergure, il pourra être intéressant de confier la recherche et l'analyse critique des sources historiques à un historien confirmé.

> *Remarque : Il existe manifestement des relations étroites entre des événements naturels violents ou soudains et les récits traditionnels que l'on retrouve sous forme de contes et de légendes.*
>
> *Attention cependant aux mots ou mentions qui ont changé de sens. Par exemple, dans les gorges du Lot, on trouve le terme de « séisme » à propos du saccage et de la destruction des villages qui eurent lieu en août 1562 pendant les guerres de religion. Aucun tremblement de terre ne s'est produit à cette époque !*

3.3 Approche géologique

3.3.1 Définition

L'approche géologique consiste à analyser des données lithologiques, stratigraphiques et de l'histoire géologique régionale en vue d'établir le contexte géologique d'un site.

Cette approche ne peut se concevoir sans compléments sur le terrain.

3.3.2 Objectifs

- Établir un modèle géologique d'ensemble et des modèles locaux représentatifs des différents secteurs ou sous-ensembles identifiés sur le site d'étude,
- déterminer les éléments dominants de l'histoire géologique du site (histoire tectonique, phases glaciaires),
- caractériser les éléments représentatifs du style tectonique à l'échelle régionale.

3.3.3 Méthode

➢ Analyse des cartes géologiques (1/50 000, 1/80 000) et consultation des guides géologiques régionaux (éditions Masson, Dunod, etc.),
➢ recherche des travaux d'études faits sur un secteur (projets routiers, recherche appliquée, diplôme universitaire, etc.),
➢ analyse bibliographique (manuels, publications, thèses, monographies, autres études ou campagnes de reconnaissances antérieures),
➢ un levé géologique du site peut s'avérer nécessaire, en particulier lorsque les données existantes sont soit insuffisantes, soit insuffisamment différenciées, soit erronées. De toutes façons, il convient de contrôler la carte géologique officielle qui peut être imprécise, voire obsolète dans certains cas,
➢ l'exploitation des observations géologiques d'ensemble sur les sites environnants peut être précieuse,
➢ dans les cas où la géologie est complexe, il est souhaitable de solliciter le concours d'un géologue universitaire ayant une forte expérience régionale.

> ***Remarque*** *: Dans cette démarche, l'approche géologique n'est pas une fin en soi comme peut l'être la réalisation d'une carte géologique, mais elle constitue un des éléments qui sera utilisé par l'étude.*

3.4 Approche structurale

3.4.1 Définition

Bien qu'elle soit une partie de l'approche géologique, l'approche structurale a été volontairement séparée de la précédente, compte tenu de son importance. Elle consiste à identifier les traits caractéristiques de la structure (accidents géologiques, plissements, chevauchements, directions de fracturation) à différentes échelles (du local au régional) et à déterminer leurs relations avec les traits morphologiques observés.

La pratique a montré qu'une étude structurale était difficilement concevable sans l'apport de la photo-interprétation. Les photographies aériennes verticales sont disponibles auprès de l'IGN (échelles courantes du 1/20 000 à 1/30 000, et localement missions particulières du 1/4 000 au 1/15 000). Le recours à l'utilisation des images satellitaires est plus occasionnel compte tenu du caractère souvent réduit des secteurs d'étude et du prix de ces images.

À une échelle plus locale, il est possible d'utiliser des photographies prises du sol ou par survol en hélicoptère avec un axe horizontal ou oblique (Fig. 3).

3.4.2 Objectifs

➢ Établir un modèle structural d'ensemble et des modèles locaux représentatifs des différents secteurs ou sous-ensembles,
➢ identifier les différents systèmes de discontinuités, leur hiérarchie, leur organisation et leur signification sur le plan tectonique (caractérisation du ou des styles de discontinuités).

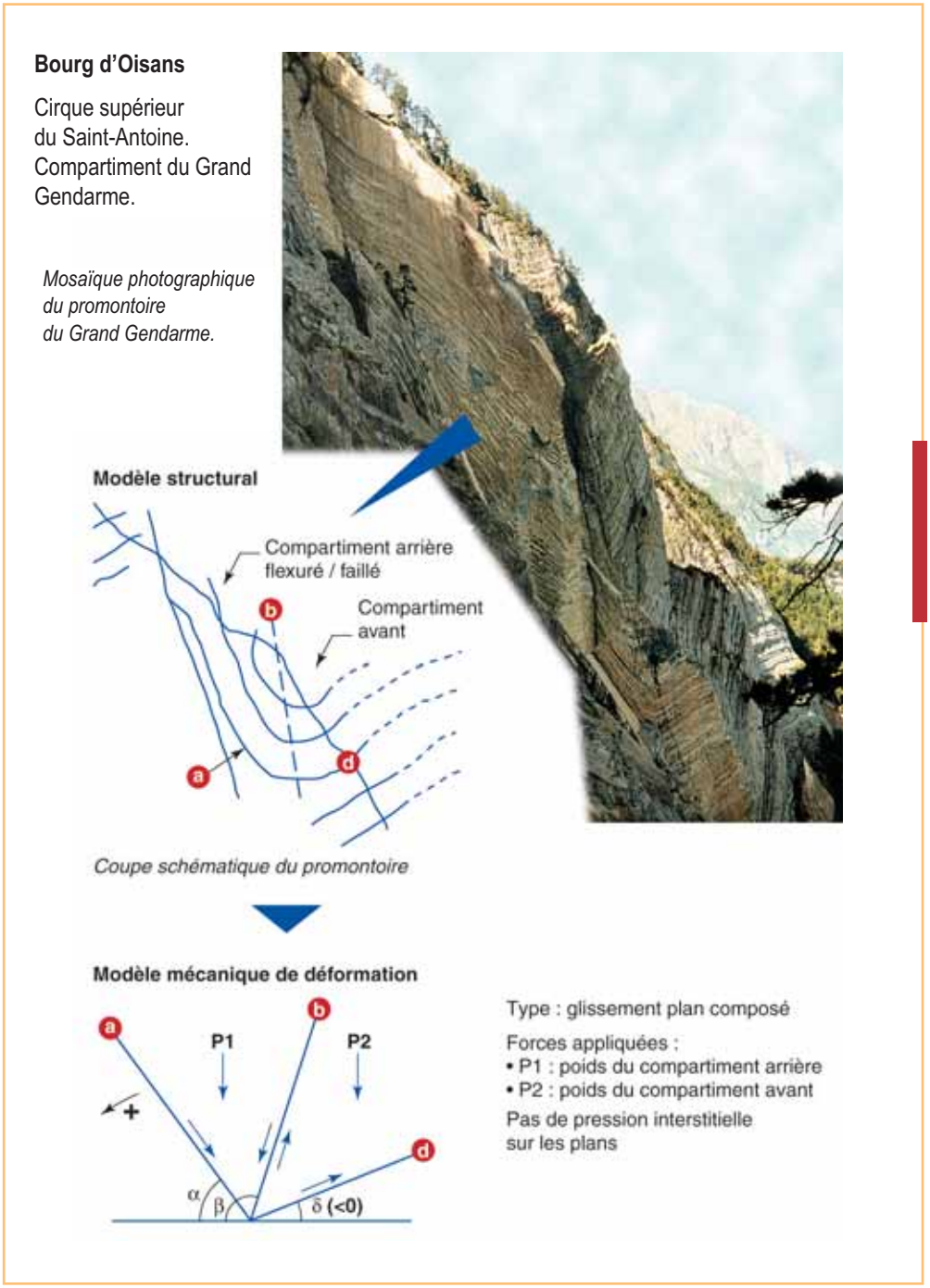
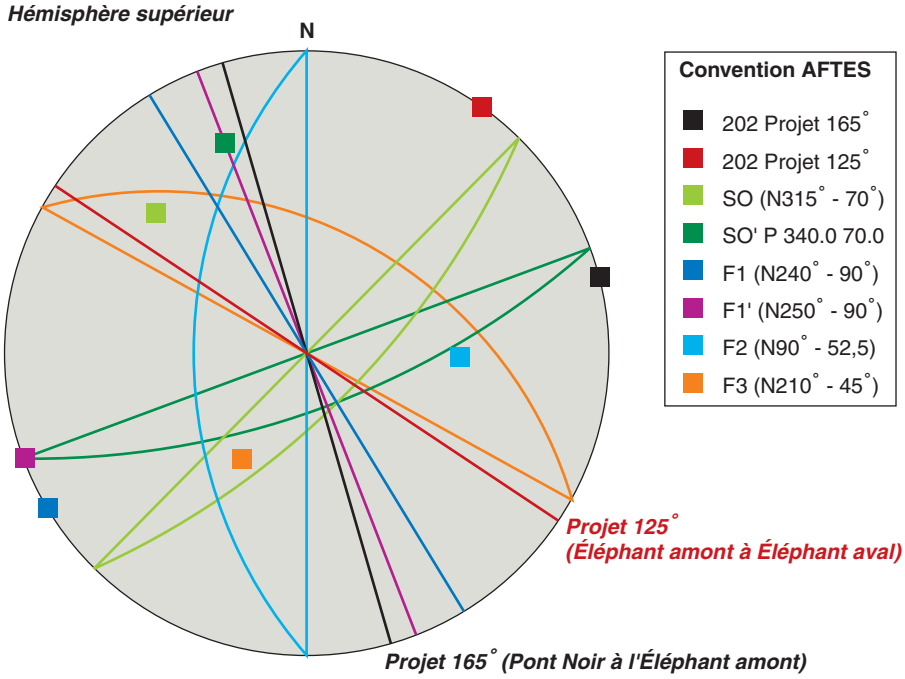


Figure 3
Approche structurale et proposition d'un modèle de déformation (source LRPC Lyon, novembre 2000).

3.4.3 Méthode

- Photo-interprétation (établissement d'esquisses structurales synthétiques),
- analyse des données morphologiques (plans, modèles de terrain),
- levers particuliers effectués lors des reconnaissances détaillées sur le site (cohérence d'ensemble des données structurales),
- prises de vues des éléments représentatifs,
- application des outils de la géologie structurale (mesures systématiques à la boussole et au clinomètre, stéréogrammes) (Fig. 4) et de la microtectonique (stries, linéaments, etc.),
- utilisation d'outils de représentation spatiale et statistique.

Figure 4
Route Nationale 202.
Lieu-dit « Les Éléphants » - Alpes-de-Haute-Provence.
Représentation stéréographique des plans de discontinuité et du projet de déblai pour le recalibrage de la RN 202.
(source LRPC Aix-en-Provence - septembre 2001).



Site du futur déblai amont (élargissement de la Route Nationale).

3.5 Approche morphologique

3.5.1 Définition

C'est l'analyse des traits dominants de la morphologie du site et l'identification de ses composantes principales à plusieurs niveaux : falaises, versants, thalwegs, pente générale, accidents morphologiques (escarpements intermédiaires). L'approche morphologique se fait en cohérence avec les approches géologique et structurale.

3.5.2 Objectifs

- Reconstituer l'histoire de l'évolution dynamique des versants ayant abouti au modelé topographique actuel,
- déterminer un (des) modèle(s) morphologique(s) à l'échelle de la zone d'étude,
- caractériser la configuration générale du site (zones de concentration, de dispersion, d'arrêt des éboulis, trajectoires potentielles, etc.),
- identifier les indices d'événements antérieurs (traces, cicatrices, empreintes),
- identifier et délimiter des zones morphologiquement homogènes sur la base des critères précédents.

3.5.3 Méthode

- Analyse des données issues du fond topographique (modèle de terrain, plans à l'échelle du 1/500 au 1/5 000),
- analyse en photo-interprétation (exploitation des missions disponibles, spécifiques ou générales). L'utilisation de documents à plusieurs échelles donne en général des informations complémentaires, certains indices n'étant visibles qu'à une échelle donnée. Par exemple, ce n'est pas en travaillant à la plus grande échelle que l'on a la meilleure perception de la tectonique régionale,
- examen depuis le versant opposé lorsque cela est possible ou à une distance suffisante pour avoir une vue d'ensemble,
- report sur fond de plan (échelle 1/5 000 à 1/10 000 selon l'étendue du site) des lignes caractéristiques du relief, notamment pour les sites les plus vastes.

Le travail d'analyse morphologique est, en particulier, indispensable dans le cadre des études d'analyse de propagation. Le « compartimentage » du versant est en effet principalement dicté par la morphologie, composante essentielle du tracé en plan des trajectoires d'éboulement possibles.

3.6 Approche hydrogéologique, hydrologique et climatique

3.6.1 Définition

Étude des apports hydriques et des écoulements hydrauliques dans les massifs et sur les versants.

Étude des régimes karstiques dans les massifs calcaires.

Le cas échéant, étude hydro-dynamique en contexte de frange littorale (marnage, courants, choc des vagues, etc.).

3.6.2 Objectifs

➢ Caractériser les apports hydriques, leur nature, régime et importance, les conditions d'infiltration de l'eau, etc.,
➢ déterminer les écoulements à l'intérieur du massif à partir des écoulements et des manifestations hydrologiques superficielles : exutoires, alimentation, etc.,
➢ définir les configurations climatiques agressives (gel, dégel, contrastes thermiques, etc.),
➢ identifier, le cas échéant, les sources des données hydro-météorologiques (Météo-France, sociétés de spéléologie, EDF, etc.).

3.6.3 Méthode

➢ Caractérisation hydro-météorologique :
- ➜ nécessaire lorsque l'influence d'une commande hydraulique apparaît probable,
- ➜ recueil des données auprès des services de la météorologie et des organismes compétents (EDF, stations de sports d'hiver, CEMAGREF, etc.),
- ➜ analyse des données par décades et caractérisations des événements,
- ➜ la prise en compte des données climatiques historiques peut permettre de caler un modèle ou un événement particuliers.

➢ Caractérisation hydrogéologique du site (étude spécifique si commande hydraulique envisagée) :
- ➜ bassin versant hydrogéologique : croisement des données topographiques, géologiques et structurales (+ éventuellement sondages, reconnaissances géophysiques),
- ➜ réseaux d'écoulement : géométrie en liaison avec les données structurales, régime (identifier si de type karstique ou non),
- ➜ réservoir : évaluer le volume de stockage en relation avec les données géo-structurales,
- ➜ exutoires : recensement et localisation, observations à différentes saisons (étiage, alimentation, colmatage par le gel, etc.),
- ➜ données climatiques (plus particulièrement température). Lorsque les phénomènes cycliques de gel-dégel apparaissent critiques, une analyse

particulière des données climatiques représentatives du site sera nécessaire. Recueil auprès des stations météo et interprétation des données en tenant compte des conditions locales du site et des données climatiques des années précédentes.

3.7 Données relatives au couvert végétal

3.7.1 Définition

Identification et caractérisation du couvert végétal des versants : espèces, types d'associations, densité, évolution prévisible ou possible (incendies, exploitation forestière, etc.).

3.7.2 Objectifs

- Préciser à partir de l'analyse du couvert végétal et en complément de l'approche morphologique, certains éléments (contacts géologiques, niveaux aquifères soulignés, etc.) relatifs à la géologie et l'hydrogéologie. Ces critères sont à interpréter avec prudence (attention aux artéfacts),
- aider à l'identification des zones instables (zones en mouvement, zones non colonisées liées à des éboulements actifs),
- identifier les zones dans lesquelles les racines des végétaux jouent un rôle dans la dislocation du massif,
- évaluer la contribution éventuelle de la végétation à la protection du versant (nature, taille, densité des peuplements).

3.7.3 Méthode

- Exploitation des photos aériennes et des plans,
- observations au sol,
- report sur plan sous forme de zonage,
- indiquer les risques de déstabilisation en cas d'incendie, d'exploitation de la forêt (coupes à blanc), d'ouverture de pistes forestières, etc.

3.8 Mécanismes d'évolution des versants rocheux

3.8.1 Définition

Identification des principaux phénomènes actifs (Fig. 5) et des processus d'évolution qui les régissent à l'échelle du site.

Figure 5
Évolution d'une corniche rocheuse par ruptures dièdres et surplombs. Noter, en amont, un phénomène ancien, identique.

3.8.2 Objectif

➢ Mise en évidence des mécanismes dominants sur le site (*exemple* : éboulements régressifs, grands écroulements, altération superficielle, érosion, chutes de blocs isolés, effet déstabilisateur de la végétation, etc.) par le relevé et l'observation des indices d'évolution (*cf.* tableaux du paragraphe 4.1),
➢ croisement des mécanismes d'évolution avec les autres informations de la couche sources.

3.8.3 Méthode

➢ Synthèse des éléments provenant des approches morphologique, géologique, structurale, historique,
➢ observations de terrain (lors de la reconnaissance générale),
➢ identification, typologie des mécanismes actifs (*cf.* les schémas de la figure 6 et les photographies 6a, 6b, 6c, 6d, 6e, 6f, 6g, 6h).

3.9 Sectorisation

3.9.1 Définition

C'est la délimitation de secteurs homogènes du point de vue de la caractérisation de l'aléa en considérant de manière synthétique les aspects topographiques, morphologiques, géologiques, structuraux et géomécaniques, couvert végétal, accessibilité, etc. (la pondération des critères est variable et adaptée à chaque site).

La sectorisation comporte un aspect technique et un aspect organisationnel.

Figure 6
Typologie des instabilités rocheuses.

Mécanisme d'instabilité	Configuration
Glissement plan (fig. 6a et 6b)	
Glissement plan composé	
Glissement de dièdre (fig. 6c et 6d)	
Rupture de surplomb ou de dalle en toit (fig. 6e et 6f)	
Rupture d'écaille en paroi (fig. 6g)	
Basculement de bloc, de panneau ou colonne	*l* *h* *Colonne si h/l > 2* *Écaille si h/l < 2*
Rupture de pied de colonne (fig. 6h)	

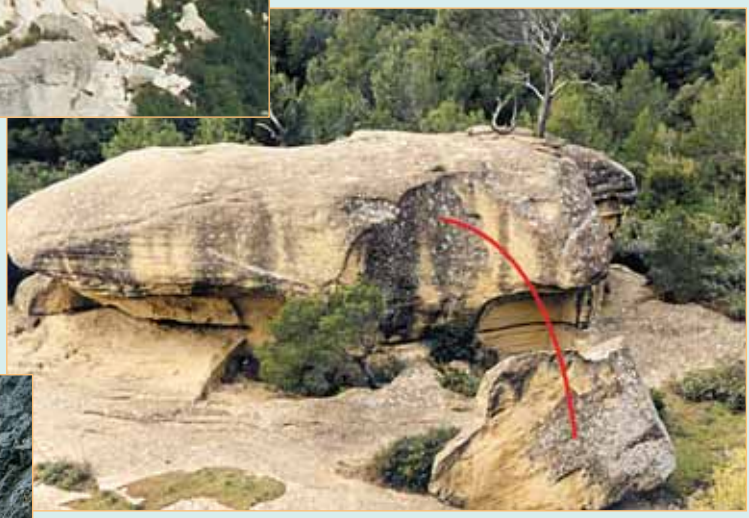
6a
Glissement plan.

6b
Vue générale de l'éboulement du Blancou (RN 122 d'Aurillac à Massiac par le Lioran), survenu en 1994.
Il intéresse un talus subvertical de 35 mètres de hauteur réalisé en 1975 dans des gneiss fracturés mais non altérés.
La rupture s'est produite suivant un plan de faille incliné défavorablement de 40 à 60° (N65° - 40 à 60 °S) avec des possibilités de régression suivant le même plan.

6c
Dièdres instables.

6d
Rupture dièdre au-dessus de la RN 202.

6e
Décollement de dalle en toit (présence d'une carrière souterraine) aux Baux de Provence.



6f
Rupture de surplomb.

6g
Écaille en paroi.

6h
Basculement d'une colonne par rupture du pied à Lançon de Provence.

3.9.2 Objectifs

➢ Découper la zone d'étude en secteurs plus réduits présentant un certain degré d'homogénéité. Dans chaque secteur, les problèmes rencontrés et les investigations à réaliser constituent un ensemble d'éléments communs,
➢ identifier des secteurs géographiquement distincts qui présentent des caractéristiques comparables,
➢ se donner les moyens de prendre le recul nécessaire à une perception d'ensemble du site d'étude,
➢ mieux organiser la programmation des interventions et de la mobilisation des moyens d'étude,
➢ déterminer les zones d'études spécifiques lorsque le secteur géographique concerné est étendu.

3.9.3 Méthode

➢ Extraire, des couches successives précédemment élaborées, les critères ou les aspects jugés significatifs et croiser ces critères pour établir un découpage en secteurs homogènes vis-à-vis du critère considéré,
➢ condensation des secteurs résultants en fonction d'une pondération de critères,
➢ le processus de sectorisation peut être itératif et adapté en fonction des données recueillies au cours de l'étude.

> ***Remarque*** *: Dans les cas particuliers d'études de territoires ou d'itinéraires, la sectorisation pourra aboutir à une typologie des versants de manière à travailler sur des « échantillons » représentatifs (Fig. 7).*

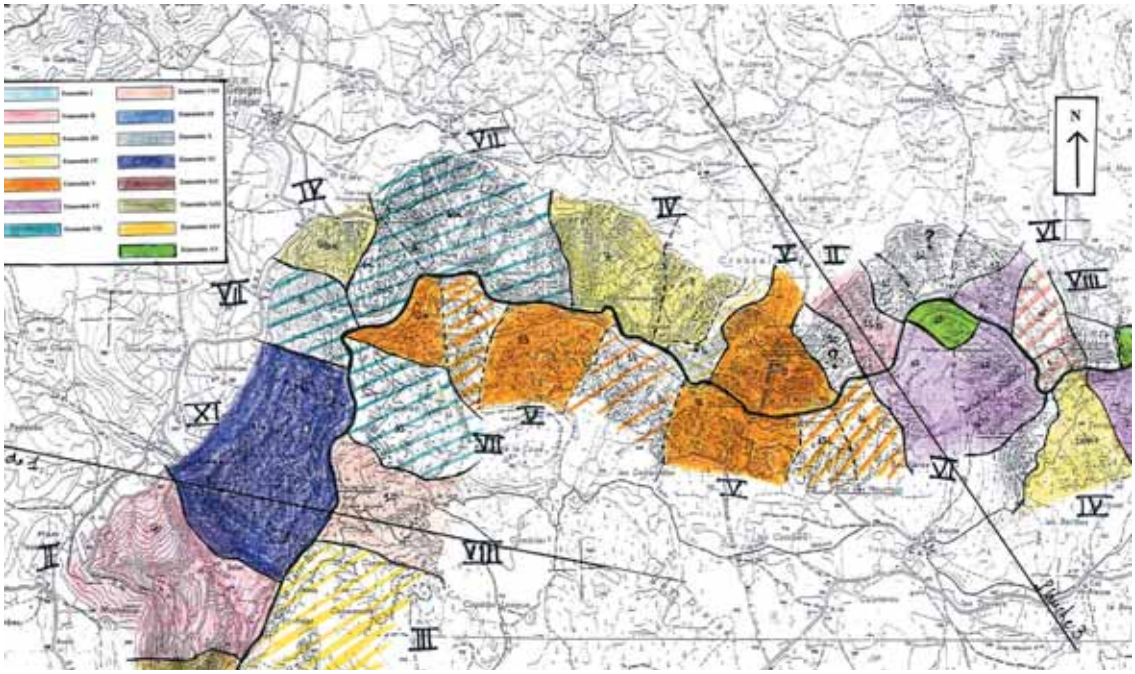


Figure 7
Classification des formes de versants (indiquée par des chiffres romains). Gorges du Tarn (Lozère).

3.10 Les techniques de représentation du terrain

La localisation et le report des informations de terrain utilisent principalement les supports cartographiques établis par photogrammétrie, mais aussi le report direct sur clichés.

Il est important d'insister sur le caractère déterminant de l'approche topographique et géométrique en tant que composante indissociable des études globales et ponctuelles de stabilité du massif (constitution de modèles géométriques) ainsi que des études de propagation.

3.10.1 Représentativité des plans. Choix des supports topographiques

Les plans, supports privilégiés d'information et d'analyse, doivent être adaptés au contexte de l'étude. Une bonne représention de la morphologie est un élément important de l'étude en raison de son rôle dans l'interprétation géologique et structurale.

Une *représentativité* convenable vis-à-vis de la morphologie des affleurements rocheux nécessite que :

- les courbes de niveaux figurent sur le plan,
- des conventions graphiques adaptées soient choisies (par exemple, les figurés traditionnels de falaise sont inadaptés).

D'une manière générale, il est important que figurent sur le plan tous les éléments indispensables à l'étude, et uniquement ceux-là. Dans des conditions de visibilité suffisante du sol, la représentativité d'un plan photogrammétrique vis-à-vis de la morphologie est généralement meilleure que celle issue d'un levé au sol. Pour la phase d'analyse, le critère de la représentativité est plus important que la précision intrinsèque du plan.

Une *échelle* adaptée à la spécificité des problèmes rencontrés sur chaque site :

- l'utilisation des couvertures topographiques existantes est souvent inadaptée (par exemple le 1/25 000 agrandi au 1/10 000 ou au 1/5 000),
- un lever de plan spécifique à une échelle adaptée s'impose impérativement dans les cas suivants :
  - études trajectographiques détaillées, notamment lorsque la topographie du versant est irrégulière,
  - études comportant des ouvrages importants ou d'implantation complexe (ouvrages de confortement, merlons de protection, écrans de filets pare-blocs, etc.),
- l'échelle 1/500 ou plus exceptionnellement 1/200 est recommandée pour une zone localisée.
- Il est possible, sur des versants d'extension importante, d'utiliser complémentairement deux échelles différentes :
  - 1/500 ou 1/200 pour les zones proches des secteurs sensibles (notamment, bande de 200 mètres au bas des versants),
  - 1/2 000 pour les zones éloignées des secteurs sensibles (parties médianes et supérieures des versants). Le plan à 1/2 000 couvrira la totalité du secteur d'étude, y compris les zones levées à plus grande échelle. À défaut de 1/2 000, un lever photogrammétrique à 1/5 000 peut être utilisé.

➢ Dans les autres cas, l'utilisation des couvertures topographiques existantes (sous réserve de leur qualité) est généralement possible en adaptant convenablement, par agrandissement, leur échelle graphique pour permettre un report commode des observations :

- plans à 1/5 000 (généralement obtenus directement par restitution),
- plans à 1/10 000 (agrandissement du 1/25 000).

3.10.2 Opérations de prises de vues et de levers de plans spécifiques

3.10.2.1 Couvertures photographiques simples

Il s'agit essentiellement de prises de vues aériennes permettant une observation qualitative et la description du site suivant des angles favorables et à des échelles variables. Ces photographies permettent, en outre, l'examen détaillé rapproché des zones de départ potentielles, ainsi que le repérage des accès. Elles aident au positionnement lors des déplacements en paroi (*cf*. encadré 1).

Les prises de vues terrestres éloignées sont possibles lorsque les versants sont en vis-à-vis.

Bien que la « qualité métrique » ne soit pas indispensable pour ces prises de vues, celles-ci sont couramment effectuées avec une chambre photogrammétrique qui garanti l'optimisation des critères de qualité du piqué, de champ et de capacité d'agrandissement.

■ Spécifications techniques

➢ Orientation :

- choix des orientations offrant la meilleure visibilité ou la meilleure lisibilité de la structure,
- prise en compte de l'exposition des versants et des contre-jours,
- prises de vue suivant des angles différents, etc.

➢ Focales :

Les focales ouvertes (28 mm, 35 mm pour du format 135) sont très utilisées pour les vues globales (prises de vues rapprochées ou très rapprochées en falaise lorsque l'on manque de recul).

➢ Filtrage :

Utiliser des filtres pour éliminer les effets de voile atmosphérique (filtre UV, filtre polarisant, etc.).

➢ Recouvrement des clichés :

À adapter dans chaque cas en fonction des contraintes spécifiques (possibilité de stéréoscopie notamment, photomontage, etc.).

➢ Émulsion :

Couleur ou noir et blanc (panchromatique), sensibilités de 100 à 800 ISO, film négatif ou diapositives (préférer le négatif plus facile à reproduire).

➢ Photo numérique :

Ce système est très prometteur, notamment en ce qui concerne les performances de sensibilité et de définition.

Visibilité du sol

➢ Choix des conditions d'éclairage :

Il est plus souple pour les prises de vues au sol que pour les prises de vues aériennes. Il est recommandé de découpler ces deux types de prises de vues.

➢ Végétation :

Réaliser des prises de vues en hiver en cas de couvert végétal à feuilles caduques. Une fine couche de neige au sol, après fonte de celle déposée sur les arbres, facilite la restitution photogrammétrique des zones boisées.

Réitération des prises de vue à partir de points fixes

➢ Importance du choix des points fixes.

➢ Nécessité de fixer avec précision les paramètres de la prise de vue : focale, émulsion, heure, éclairage, échelle, etc.

➢ Permet un suivi périodique par photo-comparaison.

Édition

➢ Tirages papier.

➢ La réalisation de mosaïques impose de respecter la cohérence d'échelle dans les montages (lignes d'assemblage suivant les lignes de même échelle). Préférer les photos à grand axe vertical pour les assemblages panoramiques.

➢ Duplication par photocopie couleur.

Archivage

➢ Utilisation d'un classement systématique avec clé d'entrée simple (par exemple alphabétique ou numéro d'affaire + composante alphabétique par site).

➢ Numérisation des photos (directement à la prise de vue ou ensuite par scannérisation). Ce concept est très prometteur, notamment sous l'angle de l'accessibilité, de la compacité, de la reproductibilité de l'archivage (CD ROM) et de la transmission des fichiers.

3.10.2.2 Couvertures photogrammétriques

La qualité métrique étant imposée, les prise de vues aériennes sont obligatoirement réalisées avec une chambre photogrammétrique.

L'opération consiste à effectuer les prises de vues de qualité photogrammétrique nécessaires à l'établissement d'un plan par restitution photogrammétrique.

Ce type de clichés de haute définition peut également être utilisé en première intention pour une observation qualitative (couples stéréographiques) dans le repérage et l'examen de zones susceptibles de générer des aléas d'éboulement (ceci impose des contraintes techniques précisées plus loin). Cette option, moyennant quelques opérations de repérage de terrain complémentaires, peut, dans certains cas, permettre une restitution photogrammétrique ultérieure (*cf.* encadré 1).

Spécifications techniques

➢ Stéréopréparation (matérialisation sur le terrain de repères identifiables sur les photos, à l'initiative de l'opérateur).

➢ Orientation (verticale, oblique, horizontale, etc.).

➢ Échelle (cohérence avec échelle des plans).

➢ Recouvrement des clichés.

- Émulsion : certaines émulsions sont intéressantes pour les observations spécifiques) (infrarouge pour l'eau, etc.).
- Calage de(s) l'axe(s) de vol.
- Altitude de vol, etc.

Conditions de visibilité du sol

- Végétation.
- Voile atmosphérique.
- Éclairage (attention aux zones à l'ombre).
- Angles morts.

Édition

- Traitement (compensation de contraste).
- Format (contact ou agrandissement).
- Duplication (possibilité de faire des copies laser).
- Vues d'ensemble.
- Tableau d'assemblage indispensable (sur photos ou sur fond topographique).

Contrôles

- Vérifications au sol.
- Qualité et positionnement de la couverture.
- Qualité de tirage des clichés (contraste notamment).

Archivage

- Banque de données photographiques.
- En l'absence de structures organisées, il est recommandé de confier l'archivage des négatifs et des tirages à un organisme technique au niveau régional ou départemental ou encore chez le prestataire.

Délais

- Prévoir d'anticiper la commande des photos par rapport aux délais globaux de production de l'étude.
- Établir une collaboration entre le prestataire des prises de vues et le service ou le bureau en charge de l'étude spécifique. Il est exclu que le donneur d'ordre réalise de manière indépendante le cahier des charges de la prise de vues.

3.10.2.3 Les plans photogrammétriques

- Le niveau de précision et la qualité du rendu sont largement déterminés par les options de la prise de vues :
  - rapport d'échelle n'excédant pas 4 à 6 en moyenne,
  - incidence du niveau de stéréopréparation dans la phase de stéréoprojection,
  - incidence de la qualité de la prise de vue.
- Restitution des clichés :
  - représentation en courbes de niveau de couleurs différentes,
  - courbes de niveau établies par un filé en continu sans lissage (et non par ajustement sur un semis de points),

- équidistance des courbes adaptée en fonction du relief et de l'échelle :
  - 1/5 000 - espacement 2 m (ou 5 m en zone de falaise),
  - 1/2 000 - espacement 1 m (éventuellement 2 ou 5 m).
- Utilisation des possibilités de sorties graphiques, sélection à partir de fichiers de type.dwg.

➢ Sorties graphiques :
- spécifications propres aux figurés à préciser dans le CCTP. Il est important que les types de figurés retenus ne masquent pas les détails importants,
- mention particulière pour le report des chemins et des sentiers et, d'une manière générale de tout élément facilitant le repérage.

➢ Documents livrés (à préciser dans le CCTP) :
- format (A0, A1, etc.),
- support (papier, calque, rhodoïd, etc.),
- nombre de copies,
- types et format des fichiers informatiques.

3.10.2.4 Orthophotoplans

La commande doit obligatoirement préciser l'échelle, les clichés de référence utilisés, l'espacement des courbes de niveau, les éléments planimétriques à représenter, etc.

3.10.2.5 Levers au sol

➢ Domaines d'application :
- pour une extension de zone réduite,
- lorsqu'il y a impossibilité de réaliser un plan photogrammétrique (problèmes de visibilité, de délai, etc.),
- en complément au sol d'un plan photogrammétrique pour l'implantation d'un ouvrage important comme un merlon par exemple,
- en complément au sol d'un plan photogrammétrique dans une zone boisée,
- levers spécifiques pour l'implantation d'ouvrages (lever classique ou rustique, topographie de chantier),
- levers sommaires pour déterminer la position de compartiments rocheux (boussole, clinomètres, télémètres, altimètres, photos avec échelle),
- pour relever des trajectoires (topofil, boussole, altimètre). Les indices matérialisant les traces de trajectoires récentes de blocs constituent des informations fragiles et fugaces qu'il est intéressant de sauvegarder.

➢ Spécifications techniques :
- échelle : ces levers, d'extension limitée, peuvent être faits à grande échelle comme le 1/200 voire le 1/100 ou le 1/50,
- spécifier les éléments caractéristiques à reporter sur le plan (lignes topographiques caractéristiques, crête, sommets, faciès, gros blocs rocheux, affleurements, éléments d'ouvrage, etc.),
- rattachement : préciser le système et les références adoptées,
  - planimétrie référencée en système LAMBERT si nécessaire, un système local est souvent suffisant,
  - altimétrie rattachée au NGF si nécessaire, une altimétrie relative est souvent suffisante.

> ***Remarque*** *: Dans le cas ou l'étude déboucherait sur la prescription d'un* suivi topométrique, *prendre garde au fait que les spécifications relatives à la conception d'un réseau d'auscultation sont en général plus sévères que pour un levé topographique courant.*

ENCADRÉ 1

Exemple de cahier des charges : Prise de vues obliques sériées et rapprochées à partir d'un hélicoptère

Conditions météorologiques

L'éclairement doit être suffisant, les ombres portées minimales. Pour cela, l'idéal serait de photographier par ciel voilé (couverture homogène de cirrus qui tamisent le soleil sans affecter sensiblement la luminosité). Sauf heureux hasard, de telles conditions ne pourront pas être groupées sur un laps de temps suffisamment long pour réaliser l'ensemble des prises de vues.

On veillera donc à choisir les moments de prise de vues au mieux, en fonction de l'exposition des parois, et à ce qu'il n'y ait aucune ombre liée aux conditions météorologiques (ombres portées des nuages).

Nombre et résolution des photographies

Il est important d'optimiser le rapport nombre de clichés/échelle des clichés pour un site donné. Pour cela les prises de vues seront réalisés avec une chambre photogrammétrique à film de format 13 × 18 cm (format utile 11 × 16 cm). Outre le grand format, l'excellente qualité de l'optique permet d'observer les images avec d'importants rapports d'agrandissement.

Les clichés seront réalisés sur émulsion panchromatique (noir et blanc) (Fig. 8).

Figure 8
Massif du Vercors, promontoire de La Buffe. Chute d'une écaille sur la RD 218. Itinéraire abandonné. Prise de vue par hélicoptère (chambre métrique UMK 13 × 18). Échelle approximative 1/3 000. (La reproduction ci-contre est réduite).

Facilité d'observation et d'analyse

Ces clichés doivent permettre une analyse qualitative aussi aisée et fine que possible. Un fort recouvrement entre les images (80 %), tout en réduisant les angles morts, facilitera l'observation stéréoscopique.

Une première série de photos, à l'échelle 1/6000 environ et à axes subhorizontaux, permettra une analyse qualitative, mais aussi une analyse quantitative. En réduisant les différences d'échelle, des évaluations différentielles seront possibles dans une certaine mesure.

ENCADRÉ 1

Pour une observation morphologique plus détaillée, deux séries de photos à axes obliques (environ 30° en site descendant et 30° en azimut dans les deux sens) seront réalisées à l'échelle approximative du 1/3 000, avec un recouvrement longitudinal de 80 % (15 à 16 clichés au kilomètre).

Dans tous les cas, l'échelle de prise de vue sera adaptée pour que, dans le sens vertical, une seule bande de photos soit suffisante pour couvrir l'ensemble du site.

Documents livrés

Chaque image sera numérotée de façon univoque et positionnée sur un tableau d'assemblage.

Les photos seront livrées on trois exemplaires, sur des agrandissement au format A4 :

- un agrandissement photographique du négatif sur papier mat,
- deux photocopies LASER à la même échelle.

D'autres exemplaires pourront être réalisés à tout moment à partir des négatifs originaux.

Archivage des négatifs

Les négatifs originaux seront remis au Maître d'œuvre qui aura la charge de les archiver.

Exploitation photogrammétrique

L'exploitation photogrammétrique (photo-restitution) n'est pas prévue dans un premier temps, aussi aucun marquage au sol ne sera réalisé avant les prises de vues.

Cependant il sera toujours possible, à la demande, de réaliser des plans ou toute autre mesure à partir des négatifs. Pour cela une stéréo-préparation sera nécessaire (détermination en coordonnées XYZ de points caractéristiques visibles sur les images). La précision absolue dépendra alors de la qualité des points qu'il sera possible d'identifier et de mesurer, la précision relative, quant à elle, sera en relation avec l'échelle des clichés (pour 1/3 000, $\sigma \sim 7$ cm, pour 1/6 000, $\sigma \sim 15$ cm.

Délais

La qualité du résultat étant un objectif primordial, le délai de réalisation des prises de vues sera essentiellement fonction des conditions météorologiques.

Le prestataire tiendra informé le Maître d'œuvre de l'avancement des travaux, et restera seul juge de l'opportunité d'intervention sur le terrain.

CHAPITRE 4

Identification et caractérisation des instabilités. Couche évaluation

Cette phase de travail consiste à désigner les sous-ensembles rocheux (compartiments) présentant un risque d'éboulement ou de remise en mouvement dans chaque secteur défini au stade de la sectorisation (Fig. 9a et 9b).

L'identification et la caractérisation des instabilités potentielles débouchent *in fine* sur la phase de qualification des aléas.

4.1 Localisation et identification des instabilités potentielles

4.1.1 Objectifs

➢ L'objectif est de faire l'inventaire des éléments ou facteurs déterminants permettant de caractériser les compartiments rocheux potentiellement instables pour déboucher sur la phase de qualification de l'aléa d'écroulement :

- nature du compartiment,
- paramètres géométriques,
- paramètres géomécaniques.

Fig. 9a

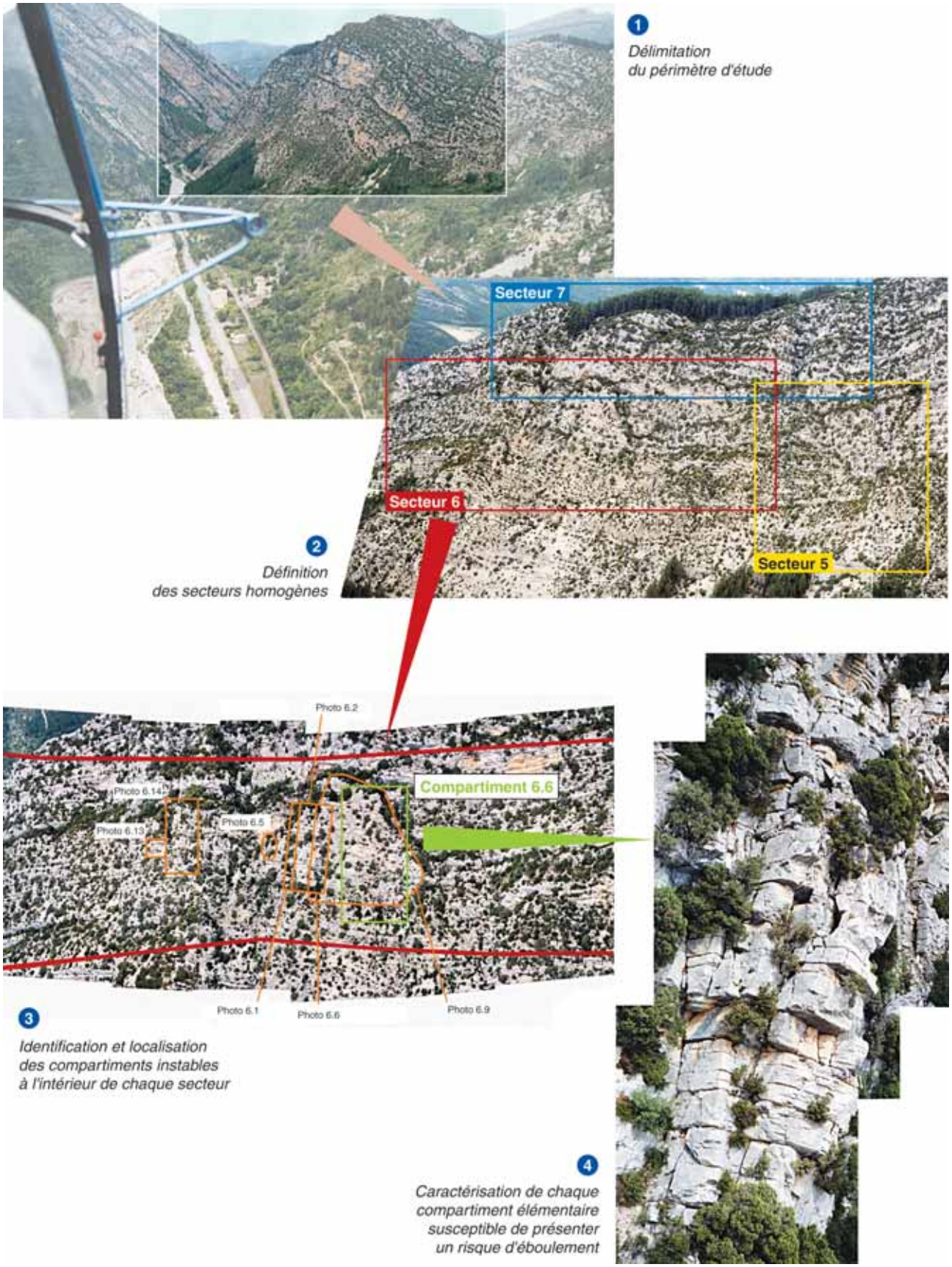
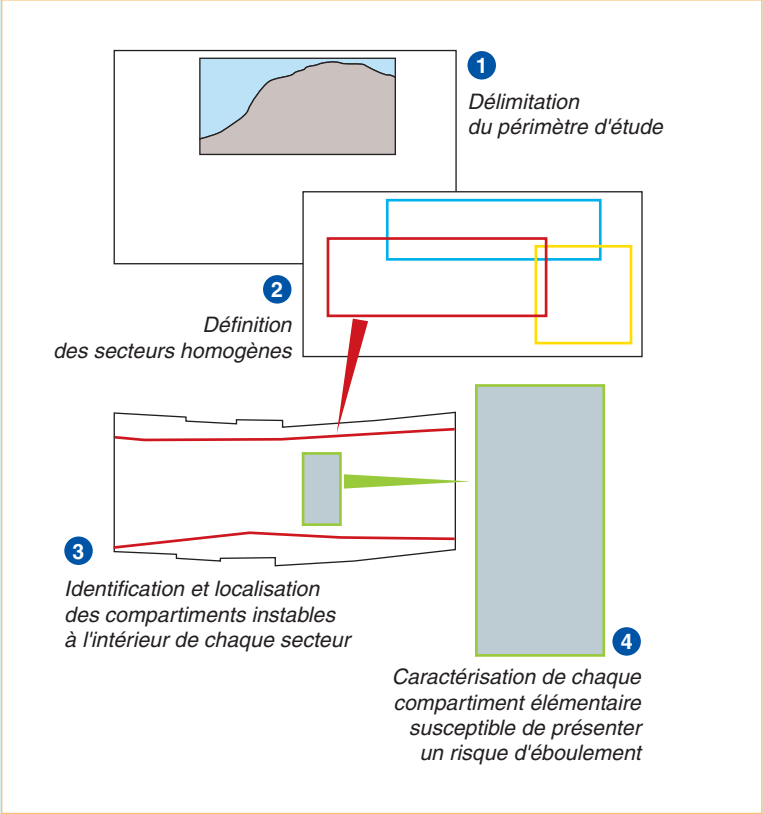

1
Délimitation
du périmètre d'étude
Secteur 7
Secteur 6
Secteur 5
2
Définition
des secteurs homogènes
Photo 6.2
Compartiment 6.6
Photo 6.14
Photo 6.13
Photo 6.5
Photo 6.1
Photo 6.6
Photo 6.9
3
Identification et localisation
des compartiments instables
à l'intérieur de chaque secteur
4
Caractérisation de chaque
compartiment élémentaire
susceptible de présenter
un risque d'éboulement

Fig. 9b



Figures 9a et 9b
Définition des compartiments rocheux.

4.1.2 Méthodes

➢ Repérer sur un support topographique (plan ou photos) les différents compartiments instables et leur attribuer une désignation particulière (numérotation),

➢ à adapter la reconnaissance de terrain aux conditions locales :

- ➜ visibilité (recul, angle d'observation),
- ➜ sécurité (pour les riverains et usagers aussi bien que pour l'équipe de reconnaissance sur place),
- ➜ conditions d'accès (techniques, moyens mis en oeuvre),
- ➜ exhaustivité de l'examen (compléments éventuels par observation depuis un hélicoptère).

Trois grandes méthodes de reconnaissance rapprochée ont été distinguées : le parcours classique du terrain, les techniques alpines en falaise et l'observation aérienne (*cf.* encadré 4).

4.1.3 Caractérisation des facteurs déterminants

Les facteurs déterminants constituent les paramètres fondamentaux qui favorisent le déclenchement d'un éboulement rocheux.

C'est la conjugaison de ces différents facteurs qui conduira à l'identification de chaque système potentiellement instable et à la caractérisation de l'aléa correspondant.

4.1.3.1 Éléments descriptifs du compartiment rocheux

La description des compartiments rocheux potentiellement instables correspond à une démarche à la fois qualitative et quantitative. Par compartiment instable, il faut entendre un élément ou plusieurs éléments dont la stabilité est liée.

Chaque compartiment considéré fera l'objet de photos d'ensemble et de détail permettant notamment le report des données principales d'étude et éventuellement de confortement.

- Nature du compartiment
  - Typologie : la description du compartiment considéré sera une caractérisation de son type général par une première approche des mécanismes de rupture :
    - écaille (simple ou faisceau),
    - bloc isolé,
    - chaos,
    - colonne,
    - paroi altérée affectée par la gélifraction,
    - surplomb en cours d'évolution régressive.
  - Lithologie : nature pétrographique, faciès, aspect, état d'altération, etc.
  - Données structurales principales :
    - détermination,
    - identification, localisation, orientation, persistance,
    - remplissage.
  - Hydrogéologie - Hydraulique :
    - présence ou non de venues d'eau,
    - contexte géologique particulier (karst),
    - nature des écoulements (superficiels, émergences),
    - débit, régime.
- Paramètres géométriques
  - Position sur le versant, accessibilité.
  - Forme, géométrie, schéma descriptif.
  - Dimensions : longueur, hauteur, épaisseur, dévers (longueur, profondeur, hauteur par rapport au sol pour un surplomb). Les dimensions sont définies pour le ou les différents éléments constituant le compartiment rocheux. Utilisation possible des distancemètres laser (nouveaux matériels utilisables sans réflecteurs, d'une portée maximum de 800 m).
  - Estimation des volumes :
    - volume total de l'ensemble,
    - volume des différents éléments constitutifs.
  - Hauteur de chute :
    - hauteur de la falaise,
    - premier impact probable.

Il convient d'apprécier la représentativité des dimensions mesurées compte tenu de la géométrie du compartiment rocheux considéré et d'adapter le métré en conséquence. Il faudra faire particulièrement attention aux estimations de dimensions effectuées à distance, à partir d'un hélicoptère par exemple, qui entraînent des erreurs grossières du fait du manque de référentiel. Il faut de toute façon avoir conscience que ce « facteur personnel » doit toujours être pris en compte dans ce type d'estimation (utilité de mentionner le nom de la personne ayant procédé à l'estimation).

L'évaluation des dimensions doit être effectuée, chaque fois que c'est possible, par une mesure au moyen d'un dispositif suffisamment précis (décamètre, télémètre, etc.). Enfin, il est nécessaire de déterminer la position de la surface de rupture au point de rupture supposé du compartiment par rapport au massif.

➢ Paramètres géomécaniques des discontinuités (surfaces de rupture).
C'est la détermination des paramètres fondamentaux des surfaces de rupture qui impose la visite au plus près du compartiment considéré.

- Caractérisation de leur nature :
  - stratification,
  - schistosité,
  - diaclases,
  - failles.
- Caractérisation de leur origine mécanique :
  - traction,
  - cisaillement.
- Quantification de leur fréquence (décimétrique - métrique - décamétrique).
- Caractérisation et quantification de la continuité ou persistance, directe ou par relais (*cf.* Méthodes de classification des massifs rocheux).
- Quantification de l'ouverture et de ses variations éventuelles.
- Caractérisation des épontes :
  - nature, aspect, régularité, état de surface, rugosité,
  - altération, nature du remplissage, minéralisations, ponts de matière,
  - présence de végétation, etc.
- Quantification de la géométrie (orientation et pendage) qui permettra l'analyse structurale.

Par ailleurs, pour les mécanismes de rupture impliquant la matrice rocheuse, il pourra être nécessaire de caractériser cette dernière du point de vue de sa résistance intrinsèque et de son altérabilité (altération acquise, gélivité). Ce critère pourra s'avérer déterminant dans le cas de parties soumises à un mécanisme de flambement ou de rupture en compression comme par exemple la zone d'appui d'une colonne.

4.1.3.2 Processus d'évolution d'un compartiment rocheux

Ces processus, décrits dans le tableau I, page 41 font passer un compartiment rocheux de la stabilité à la rupture, de façon plus ou moins rapide.

4.1.3.3 Mécanismes de rupture

Les principaux mécanismes (*cf.* Fig. 6 du paragraphe *3.8.3 Méthode*) sont décrits dans les tableaux II et III. On a distingué les cas de mécanismes simples, impliquant un petit nombre de discontinuités, pouvant éventuellement faire l'objet d'un calcul simple de stabilité, et les cas de mécanismes complexes relevant si nécessaire d'une modélisation spécifique.

L'expression de « statiquement stable » a été utilisée pour désigner une configuration d'équilibre éloigné de la rupture, dans laquelle les processus d'évolution défavorable (modifiant les caractéristiques géométriques ou mécaniques) sont très lents (Fig. 10).

Un système est dit « statiquement instable » s'il est en équilibre, mais si cet équilibre repose sur des résistances mécaniques de type fragile, difficiles à appréhender et pouvant se dégrader rapidement (exemple d'un surplomb limité par une discontinuité qui travaille en traction). Les seules caractéristiques géométriques et les propriétés mécaniques de base (résistance à l'écrasement, frottement résiduel) ne permettent pas d'assurer la stabilité (Fig. 11).

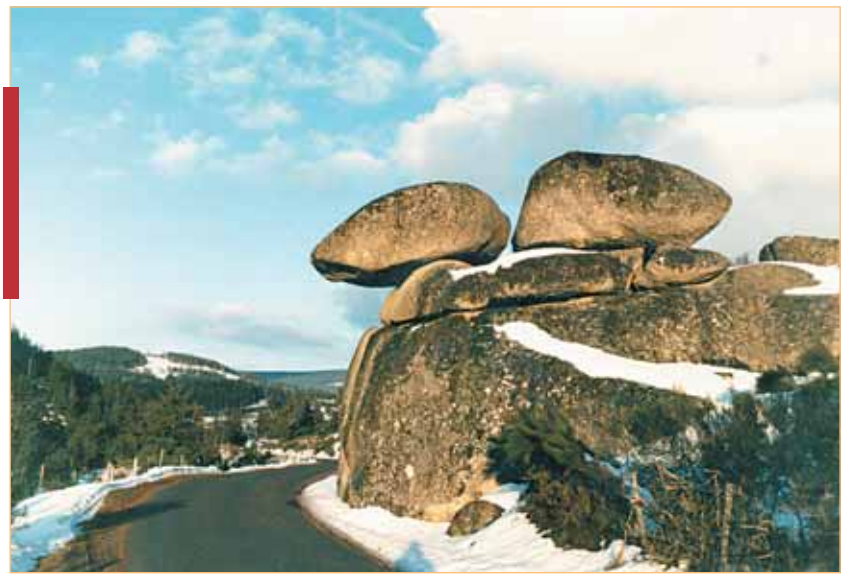


Figure 10
Blocs de granite statiquement stables (RD 7, Sainte Eulalie - Lozère, Cliché LRPC Clermont-Ferrand).

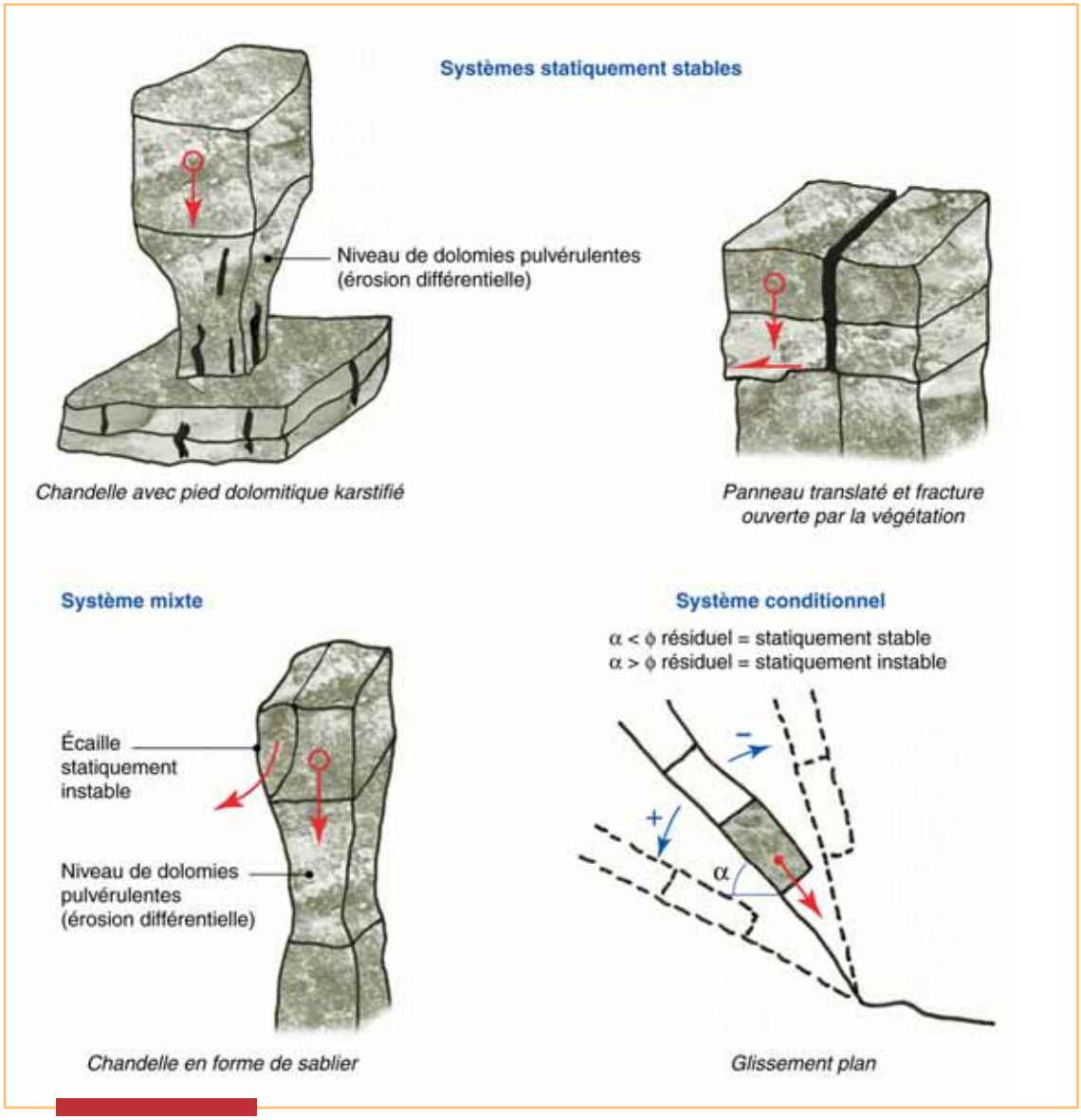


Figure 11
Extraits du dossier « Cartographie d'aléa, gorges du Tarn et de la Jonte », LRPC Aix-en-Provence.

Tableau I
Processus d'évolution des parois rocheuses

Processus	Agents	Effets	Circonstances facteurs aggravants	Dynamique
Altération physico-chimique, dissolution (matrice ou (et) discontinuités)	Un peu d'eau. Cycles hydroclimatiques (contexte local). Acides humiques	Altération matricielle, abaissement des caractéristiques intrinsèques (σ_c, σ_t). Destruction des ponts de matière, perte de cohésion. Altération des caractéristiques de cisaillement	Fracturation ouverte. Lapiaz en crête de falaise	Lente et souvent masquée (évolution des ponts de matière)
Dislocation	Évolution gravitaire. Racines, effet mécanique de vérin, balancement, action chimique (pour mémoire). Effet de cliquet. Fluage d'une assise. Dislocation active d'un versant. Gel, faible profondeur	Destruction mécanique des ponts de matière. Ouverture de la fissuration, des imbrications	Lithologie, structure, nature de la végétation	Lente sous nos latitudes
Érosion mécanique, ablation, mise en surplomb, déchaussement	Écoulements d'eau (entraînement des fines et déconsolidation), abrasion (eau chargée). Érosion éolienne (roches tendres)	Mise en déséquilibre par réduction de l'appui. Perte de cohésion (entraînement des remplissages argileux)	Pluviométrie, action humaine	Variable, peut être rapide
Action mécanique de l'eau (pression hydaulique)	Infiltrations provenant d'écoulements superficiels. Circulations internes du massif. Marnage (littoral). Phénomènes karstiques	Déstabilisation par des poussées hydrauliques	Gel des exutoires naturels ou drains. Tempêtes violentes	Variable, peut être rapide. Phénomène cyclique ou accidentel
Gélifraction	Gel	Réduction des surfaces d'appui par ablation. Décohésion et dislocation des fractures. Éclatement superficiel du matériau	Présence d'eau, contexte climatique favorisant la répétition des cycles gel-dégel	Lente
Fatigue mécanique (cycles lents, cycles journaliers)	Sollicitations physiques cycliques saisonnières. Niveau moyen de contrainte élevé	Écaillage, dégradation des caractéristiques mécaniques (σ_c, σ_t). Aggravation par phénomène de cliquet	Importance des fluctuations thermiques, hydrogéologiques ou hydrauliques	Rarement processus significatif à l'échelle humaine, sauf contextes extrêmes
Application de forces extérieures	Variation d'effort transmis par un ouvrage. Déstabilisation anthropique (sous cavages, anciennes cavités, minages, vibrations, terrassements). Modification des conditions hydrauliques (rejets non contrôlés, drainages défaillants). Séismes	Déstabilisation, activation de nouveaux mécanismes de rupture	Orientation des discontinuités. Défaut d'entretien d'anciens travaux. Vieillissement des systèmes de stabilisation (dispositifs de renforcement)	Variable, éventuellement rapide. Peut être accidentel

Tableau II
Mécanismes de rupture simple (petit nombre de discontinuités en cause)

Mécanismes	Processus	Stabilité mécanique	Indices d'évolution	Cinématique
Rupture de surplomb	Décohésion	Statiquement instable*. Contrôlé par la cohésion et la résistance à la traction sur le plan arrière	Peu perceptibles à l'examen visuel	Rapide, absence de signes prémonitoires
Décollement de dalle en toit	Rupture en traction	Statiquement instable *. Contrôlé par la résistance à la traction (plan de décollement et zone d'encastrement). Effet d'arc-boutement latéral éventuel	Parfois, indices de décollement	Rapide, généralement absence de signes prémonitoires
Glissement plan	Perte de cohésion (rupture, dissolution de ponts rocheux, altération des joints) et mobilisation de frottements	Variable, fonction de l'inclinaison du plan et de la géométrie des épontes, contrôlé par la cohésion, le frottement (sur un seul plan) et les pressions interstitielles	Ouvertures de fissures arrières	Progressive avec signes prémonitoires : rejets, fraîcheur des fissures, chutes de petits blocs en lisière des gros volumes, évolution des remplissages, indices d'activité hydraulique anormale, avaries d'ouvrages proches, tous signes pouvant justifier, pour les très gros volumes, la mise en place de dispositifs d'auscultation
Glissement dièdre	Perte de cohésion et mobilisation de frottements	Variable, fonction de l'inclinaison du plan et de la géométrie des épontes, contrôlé par la cohésion, le frottement (sur deux plans sécants) et les pressions interstitielles	Ouvertures de fissures arrière et latérales	
Basculement, déversement (colonnes, grandes écailles)	Excursion progressive de la projection verticale du centre de gravité à l'extérieur du polygone d'appui	Statiquement stable, contrôlé par la résistance à la compression de la base ou de l'appui, ou par la poussée exercée par les matériaux de remplissage des fractures arrières	Ouverture de fissures arrières et latérales. Fissuration de la base, écaillage côté vide. Déformation d'ensemble	Évolution progressive avec indices d'évolution observables. Accélération rapide en fin de processus
Flambement	Excès de compression dans le plan, entraînant une instabilité mécanique	Stabilité statique limitée par les déformations, contrôlée par l'état des contraintes, les caractéristiques géométriques, structurales et lithologiques	Ventre (bombement et décollements vers le vide). Fissures de cisaillement du banc comprimé	Généralement progressive dans une phase initiale, rapide en phase terminale
Rupture en compression	Écrasement par excès de contrainte	Statiquement stable, contrôlé par la résistance à la compression	Écaillage et fissures verticales d'extension, fissures obliques de cisaillement, gonflement transversal	Évolution progressive, rupture brutale

Mécanismes associant plusieurs systèmes de discontinuités : stabilité variable suivant les configurations - Relèvent de la constitution d'un modèle spécifique dans chaque cas permettant une analyse paramétrique.

* *Degré de localisation : degré d'anastomose des fractures à la partie inférieure de la zone de déformation.*

Tableau III
Mécanismes de rupture composée

Mécanismes	Processus	Stabilité mécanique	Indices d'évolution	Cinématique
Glissement suivant une surface basale induite par du fauchage	Fauchage : cisaillement interbanc + basculement et localisation d'une surface de rupture. Suppose comme préalable structural une famille de discontinuités très affirmée, à pendage rentrant	Variable, selon la pente du versant et de la surface basale. Contrôlé par le degré de désolidarisation le long de la surface de rupture, l'altération des matériaux et les pressions interstitielles	Basculement vers le vide des têtes de couches. Indices morpholohiques actifs (fissures, escarpements, bombements)	Variable, glissement lent susceptible d'accélération en période de crise temporaire et en phase terminale. Appréciation du degré d'activité par auscultation pour les gros volumes
Déstabilisation d'un ensemble chaotique de blocs ou de blocs isolés	Perte d'équilibre d'un empilement instable (Fig. 12)	Précaire, contrôlé par l'imbrication des blocs, l'érosion et la stabilité du substratum	Traces de mouvements relatifs des blocs	Variable, reptation lente d'éboulis, éboulement brutal d'accumulation de blocs, remobilisation de blocs isolés
Glissement suivant une surface basale induite par un mécanisme de rupture interne (concerne les très gros volumes)	Aboutissement d'un processus de déformation par rupture interne	Variable selon le degré de localisation* d'une surface enveloppe de rupture basale	Indices morphologiques actifs : sillons d'effondrement, contre-pentes, ouverture de fractures	Lente dans la phase de déformation, peut être rapide (éventuellement brutale) après localisation d'une surface de rupture basale. Le suivi instrumenté de la cinématique de l'ensemble du mouvement est un bon indicateur de l'état d'évolution de l'instabilité

Mécanismes associant plusieurs systèmes de discontinuités : stabilité variable suivant les configurations - Relèvent de la constitution d'un modèle spécifique dans chaque cas permettant une analyse paramétrique.

* *Degré de localisation : degré d'anastomose des fractures à la partie inférieure de la zone de déformation.*

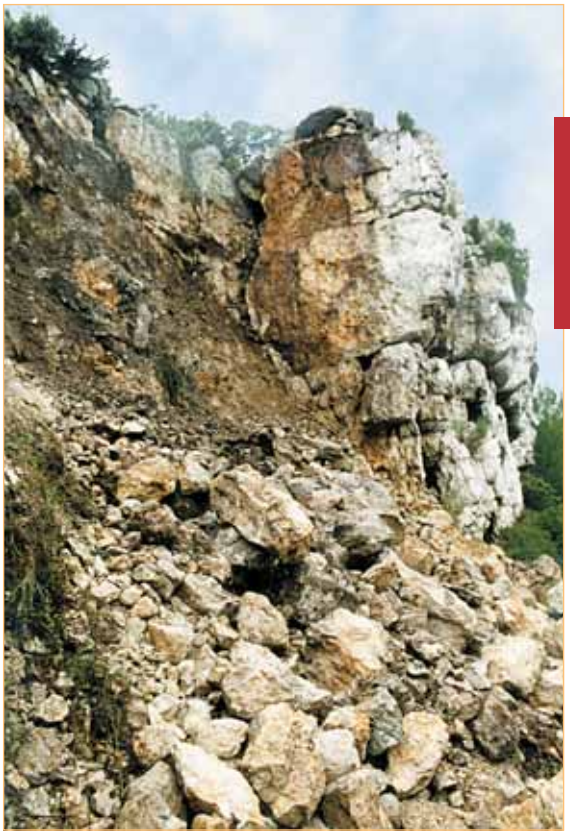


Figure 12
Exemple de massif disloqué.

4.1.3.4 Fragmentation dans la phase d'écroulement

Au moment de l'écroulement, la structure initiale va, en fonction du volume en jeu, se fragmenter plus ou moins en éléments de dimensions plus réduites. L'étude du découpage en place par les discontinuités du massif, l'appréciation du degré de dislocation et de la fragilité des blocs au choc permettront une évaluation dimensionnelle des blocs issus de l'écroulement.

L'observation et l'examen critique des éboulis anciens en pied de versant constitue un des moyens utilisables pour remonter à la « fragmentabilité » de la roche en place. Pour les aléas importants une estimation de la répartition volumétrique des blocs du compartiment éboulé est à produire.

4.1.3.5 Fiche analytique

Les informations prélevées sur le terrain (en référence à la méthodologie développée précédemment) seront reportées sur une fiche analytique. Cette fiche contient tous les éléments de caractérisation, des facteurs déterminants jusqu'à la qualification de l'aléa.

Deux exemples de fiches analytiques sont présentés (encadrés 2 et 3).

4.2 Qualification de l'aléa de rupture

La caractérisation de l'aléa à partir des éléments collectés précédemment constitue le cœur de la démarche d'expertise. Deux éléments sont à déterminer :

- la classe d'instabilité,
- le couple probabilité/délai.

4.2.1 Classes d'instabilité

Une classe d'instabilité est caractérisée par le volume total des matériaux mis en jeu lors de la phase d'écroulement ; en outre, la taille des éléments unitaires peut aussi intervenir. Les classes sont définies conformément à la grille suivante :

- les *chutes de pierres*, comprenant un petit nombre d'éléments de volumes unitaires inférieurs à quelques décimètres cubes ;
- les *chutes de blocs*, comprenant une petit nombre d'éléments de volumes unitaires atteignant quelques mètres cubes (dans le cas de formations massives, certains gros blocs peuvent atteindre voire dépasser la centaine de mètres cubes) ;
- les *éboulements en masse*, dont le volume va jusqu'à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes ; on distingue parfois les éboulements en masse limitée (volume inférieur à quelques milliers de mètres cubes) et les éboulements en grande masse (volume allant de plusieurs dizaines de milliers à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes) ;
- les *éboulements catastrophiques*, impliquant des volumes de l'ordre du million de mètres cubes ou plus, et dont la propagation répond à des processus particuliers (fluidisation) ; ils ne sont pas traités dans ce guide.

ENCADRÉ 2

CETE - LRPC de LYON **FICHE ANALYTIQUE** **Qualification de l'aléa d'éboulement**	IDENTIFICATION : ***CHAMOISE*** ***Compartiment n° 1*** LOCALISATION : ***photo A1-2*** ***falaise inférieure*** Photo : ***A1-3*** Figure : ***A3-1 et 2*** Date de rédaction de la fiche : ***octobre 1981***

1. Description

1.1 Nature

Écaille découpée à mi-hauteur de la falaise inférieure.

1.2 Paramètres géométriques

h = 7 m l = 7 à 8 m e = 1 à 1,5 m maxi.

1.3 Paramètres géomécaniques

Découpage arrière par fracture régulière et continue, visible côté est et parllèle à la falaise.
Orientation N 150°E - 85°N.
Ouverture de l'ordre du centimètre.
Base de l'ensemble partiellement sous-cavée.

2. Stabilité

2.1 Type de rupture

Rupture de pied avec glissement.

2.2 Caractérisation du compartiment

Nature : ***volume de l'ordre de 40 m^3***

« Probabilité / Délai » : élevé à moyen terme

2.3 Probabilité de formation de blocs

Blocs ***> 5 m^3*** ***peu probable***

Blocs ***de 1 à 5 m^3*** ***très probable***

3. Propagation

3.1 Données topographiques

Chute à 70-75° de pente jusqu'à l'aire de stockage (dénivelée de 20 m)

3.2 Fragmentation

Probibilité élevée pour qu'il subsiste des blocs jusqu'à 2 ou 3 m^3

3.3 Trajectoire

Direction : ***aire de stockage*** Probabilité de propagation : ***très élevée***

4. Risque résultant

Nature : ***glissement d'un volume de 40 m^3 fragmentable en blocs jusqu'à 2 à 3 m^3 avec probabilité très élevée de propagation vers la plateforme autoroutière.***

« Probabilité : Délai » : ***élevé à moyen terme***

5. Mesures de protection

Ancrages passifs

Exemple de fiche de qualification de l'aléa utilisée par le LRPC de Lyon.

ENCADRÉ 3

CETE Méditerranée - LRPC d'Aix-en-Provence

FICHE DE QUALIFICATION DE L'ALÉA — **Date :** *2 novembre 2000*

Sainte-Enimie (48) Rive Gauche - secteur n° 97 — **Echantillon n° 10**

Type d'instabilité	*surplombs*
1. Description	
- Nature du matériau	*dolomie massive (Bathonien J2b)*
- Dimension	_
- Volume	*30 à 50 m³*
- Position dans le versant	*mi versant, en partie transversale de falaise*
2. Fracturation origine de l'instabilité	
- Paramètres géométriques	
Orientation des discontinuités (notation AFTES) :	*S_0 subhorizontal, discontinuités à l'arrière*
- Paramètres géomécaniques	
Persistance	*tout le surplomb à l'arrière*
Fréquence	_
Joint	_
Epontes	*lisses à ondulées*
3. Facteurs aggravants	
3.1. Présence de végétation	
- Dans la discontinuité	*oui*
- Sur le pourtour	*oui au dessus du surplomb*
3.2. Présence d'eau	
- Écoulement	*non*
- Suintement	*traces de coulures*
3.3. Présence de cicatrices anciennes	
- Type de rupture et orientation	*oui cicatrices d'anciens surplombs*
4. Stabilité	
4.1. Processus d'évolution	
- Identification	*décohésion, rupture en traction*
- Agents d'évolution	*eau, gel, végétation*
- Indices d'évolution	*ouverture de fissures*
4.2. Mécanisme de rupture	*rupture de surplomb*
5. Qualification de l'aléa de rupture	
MODÉRÉ À LONG TERME	
6. Propagation	
6.1. Données topographiques en aval	
- Pente du versant	*pente moyenne de 35 à 40°*
6.2. Couverture du versant	*arbres et arbustes*
6.3. Nature du substrat	*rocher altéré (J2a) et éboulis*
6.4. Fragmentation (volume)	*faible, en volumes de 1 à 20 m³*
6.5. Traces d'éboulements anciens	*blocs éboulés de 30 à 40 m³ dans le versant*
6.6. Trajectoire	
- Direction	*thalweg vers le château d'eau*
- Obstacles	*arbres*
- Présence de replats, fosses	*restanques et blocs éboulés*
6.7. Probabilité de propagation	*élevée jusqu'au château d'eau et aux habitations*
7. Types de parades éventuelles	*abattage, ancrages + filets*

Exemple de fiche de qualification de l'aléa utilisée par le LRPC d'Aix-en-Provence.

4.2.2 Probabilité/délai

La prévision de la rupture d'une masse rocheuse se heurte à de très grandes difficultés, du fait notamment de l'impossibilité d'avoir accès à des régions cachées et donc d'évaluer l'état et l'évolution de parties résistantes (ponts rocheux, par exemple). On adopte donc une démarche de type probabiliste ; les probabilités dont il s'agit, dites parfois subjectives, sont qualitatives.

La notion de probabilité/délai repose sur deux composantes indissociables :

- l'éventualité d'occurrence de chute (dans la période considérée), évaluée en fonction des facteurs déterminants (*cf.* paragraphe 4.1) ; l'échelle qualitative considérée va de « très faible » à « très élevée » ;
- le délai significatif à l'intérieur duquel le praticien estime que le phénomène peut se produire (selon une probabilité à estimer) ; les périodes vont de « imminent » à « long terme ».

Une ré-évaluation de la probabilité/délai devrait être envisagée périodiquement (par exemple, en ce qui concerne le moyen ou le long terme, au bout de dix ans).

Le tableau IV présente une proposition d'échelle qualitative de probabilité.

Tableau IV
Échelle qualitative de probabilité d'occurrence

Très élévée (te)	L'occurrence du phénomène est normale. Sa non-occurrence serait exceptionnelle	La probabilité est appréciée en fonction des facteurs déterminants (présence et/ou intensité)
Élevée (e)	L'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non-occurrence	
Modérée (m)	L'occurrence du phénomène est équivalente à sa non-occurrence	
Faible (f)	La non-occurence du phénomène est plus envisageable que son occurence	
Très faible (tf)	La non-occurence du phénomène est normale. Son occurrence serait exceptionnelle	

Une probabilité « modérée », qui attribue une équivalence entre occurrence et non-occurrence, traduit une incertitude maximale concernant l'éventualité du phénomène. Une qualification en termes de « très élevée » ou « très faible » traduit un engagement de l'expert qui est le reflet d'une bonne connaissance du phénomène ; mais encore une fois, il s'agit de probabilité et non de certitude…

L'échelle temporelle proposée dans le tableau V, exprimée en années, s'étale entre l'instant présent et une bonne centaine d'années. Les intervalles sont de durée croissante, du fait que les incertitudes augmentent avec l'éloignement de l'échéance.

Tableau V
Échelle temporelle proposée

Imminent	i	Prise en compte immédiate (le délai se compte en heures, jours, semaines ou mois)
Très court terme	tct	2 ans environ
Court terme	ct	10 ans environ
Moyen terme	mt	De l'ordre de 30-50 ans
Long terme	lt	De l'ordre de 100-150 ans

Au-delà du long terme, l'aléa est considéré comme relevant de phénomènes exceptionnels, à une échelle de temps d'ordre géologique. Il doit être mentionné s'il a été mis en évidence lors de l'étude, mais n'est en général pas pris en compte dans les études d'ingénierie.

4.2.2.1 Commentaires

La formation de « l'opinion » du praticien repose sur le passage en revue des éléments présentés au paragraphe 4.1, avec en particulier deux aspects :

- évaluation de la marge de sécurité naturelle, de la fragilité de l'équilibre actuel (rôle de la résistance à la traction et de la cohésion dans les plans de rupture, par exemple), rôle d'actions accidentelles (séisme) ;
- évaluation de la dynamique de régression de la stabilité : activité des processus d'évolution (par exemple dissolution dans un massif gypseux ou altérabilité des points d'appui pour la base d'une colonne), de fatigue mécanique, etc., rôle des facteurs hydrauliques.

Dans le cas où la stabilité est dépendante de la cohésion ou de la résistance à la traction sur certains plans de discontinuité, on sera conduit à prendre en compte, dans la qualification, l'existence d'un facteur aggravant lié au défaut de pérennité des caractéristiques mécaniques.

4.2.2.2 Classes d'instabilités

Le volume total de l'éboulement, les volumes élémentaires, la forme des blocs, etc. conditionnent le mode de propagation, la vitesse et l'énergie cinétique de l'éboulement ; c'est donc un élément essentiel à prendre en compte pour la définition des parades. Les classes proposées sont voisines de celles données dans la norme NF P 95-307 de 1996.

À titre d'information, en ce qui concerne les *éléments unitaires*, les coupures de volume suivantes sont habituellement utilisées :

- pierres : volumes inférieurs à quelques dm^3,
- blocs : volumes allant de quelques dm^3 à quelques m^3,
- gros blocs ou masses : volumes supérieurs à quelques m^3.

4.2.2.3 Délai

Par rapport à l'échelle proposée, certains rapprochements pourront être faits avec le rythme d'activité des phénomènes d'évolution naturelle (cycles saisonniers notamment) et avec les délais habituels des programmes de sécurisation (exemple : un délai global études et travaux de 10 ans est classique pour des travaux de protection ou de confortement sur des zones de risque à court terme). Pour des zones de risque à moyen terme, le délai de 30 - 50 ans correspond à la prise en compte de la programmation d'actions futures. Cette logique sous-tend, d'ailleurs, la nécessité de procéder à une réévaluation de la qualification de l'aléa au cours du temps.

Il est utile de se représenter la caractérisation de l'occurrence temporelle d'une instabilité individualisée, plus précisément de la connaissance que l'on en a, dans une matrice « probabilité/délai » (Tableau VI).

Dans la pratique, les informations disponibles ne permettent pas de remplir toutes les colonnes, mais il est important d'avoir à l'esprit le principe d'utilisation de cette matrice ; par exemple, on donnera une indication du type « *te/ct* » ou « *f/ct* et *e/mt* ».

Tableau VI
Matrice d'évaluation « probabilité/délai »

Délai / Probabilité	i (imminent)	tct (très court terme)	ct (court terme)	mt (moyen terme)	lt (long terme)
te (très élevée)					
e (élevée)					
m (modérée)					
f (faible)					
tf (très faible)					

Remarque : Cette déclinaison correspondant à des délais différents est généralement exploitée pour apporter la meilleure réponse face au risque : action rapide pour les classes de délais les plus courts et les enjeux les plus forts, programmation d'actions préventives pour les délais les plus longs.

4.2.3 Synthèse des aléas de rupture sur un périmètre d'étude

Les études générales d'itinéraires et toutes les études concernant les grands domaines physiographiques procèdent d'une approche d'ensemble qui donne, par rapport aux études spécifiques, une grande importance à la sectorisation. La phase proprement dite de qualification des aléas n'intervenant que comme référence de chaque secteur.

L'exemple présenté dans la figure 13 illustre les méthodes de synthèse des aléas de rupture sur un périmètre d'étude. Il s'agit d'un court extrait d'une étude préliminaire portant sur plusieurs kilomètres de linéaire de versant dans la vallée de la Tarentaise (Savoie), étude réalisée principalement à partir d'observations en hélicoptère. Les résultats sont rendus sous forme d'un tableau qui présente l'avantage de regrouper de manière synthétique toutes les observations.

Chaque compartiment est qualifié par un ou plusieurs couples «probabilité/délai ». La classe de l'aléa considéré n'est pas mentionnée, une estimation directe des volumes a été effectuée, dans un but de préparer le choix et l'implantation d'une protection passive. L'aspect propagation sera examiné dans le chapitre 5.

4.2.4 Compétences du praticien

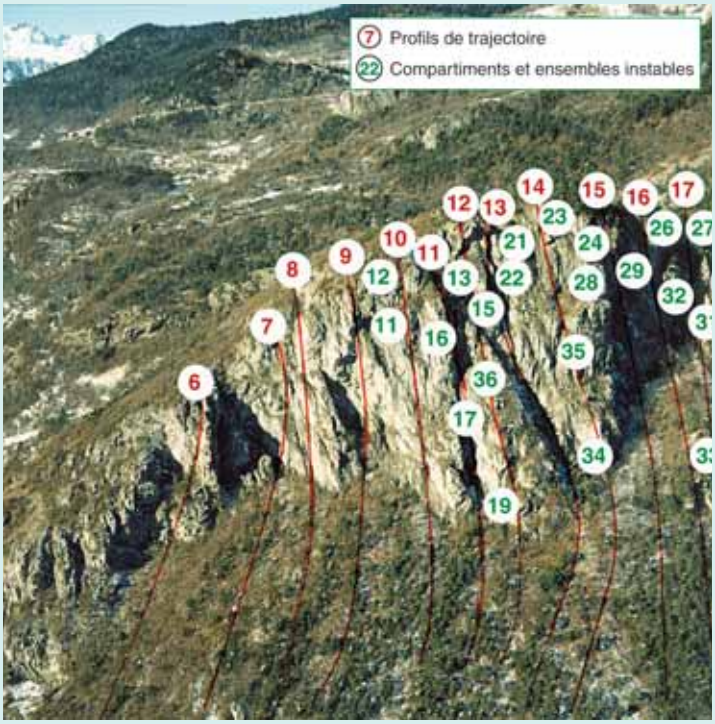
L'approche géologique est le gage d'une bonne extrapolation des données ponctuelles d'investigation à la globalité du secteur d'étude par la prise en compte des structures géologiques.

Pour une bonne mise en oeuvre de la présente méthodologie, qui relève essentiellement du jugement d'expert, il est hautement souhaitable que la personne en charge de l'étude soit un praticien confirmé.

Figure 13
Vallée de la Tarentaise.
Identification, localisation et caractérisation des compartiments instables. Qualification des aléas (source LRPC Lyon, 1997-2000)

1 - Identification et localisation des compartiments instables

Le repérage exhaustif des compartiments « douteux » nécessite une reconnaissance de terrain détaillée avec l'appui de plans précis et la prise de photos sous les angles les plus appropriés.

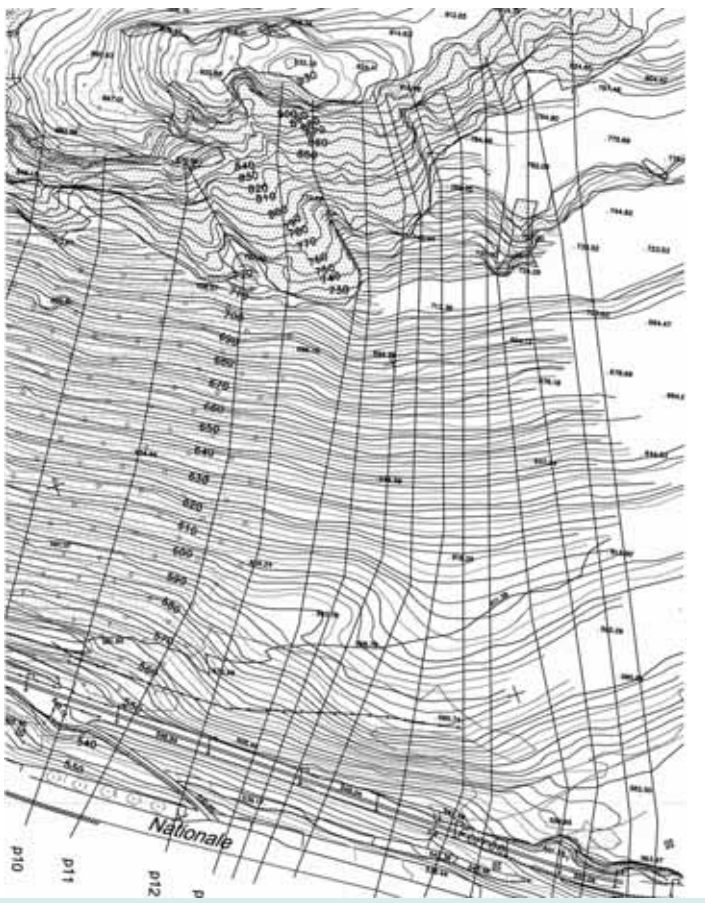


Document n° 1

Vue du secteur n° 2.

En vert : numérotation des compartiments et des ensembles à caractériser.

En rouge : numérotation et tracé des trajectoires déterminées à partir de l'analyse de la topographie sur le plan du site à 1/2 000 et pourtant, le cas échéant, être utitisées pour effectuer des simulations de propagation.

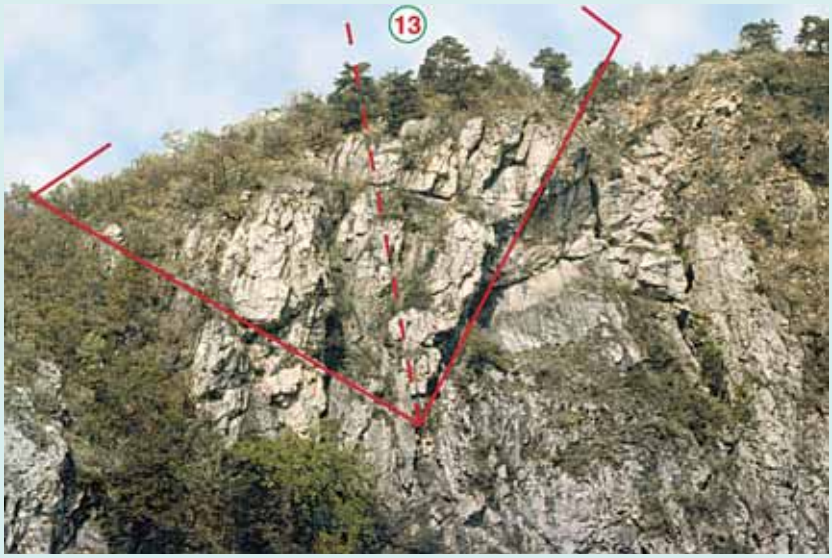


Document n° 2

Carte des trajectoires.

2 - Caractérisation des compartiments instables (compartiment P2-13)

La notion de compartiment correspond à la plus petite structure instable physiquement individualisable sur le terrain. Par compartiment instable, il faut entendre également des ensembles regroupant plusieurs éléments dont la stabilité est liée.



Document n° 3

Vue du compartiment instable n° P2-13.
Shistes à foliation sub-verticale.
Glissement de dièdre et dislocation.

L'analyse de stabilité du compartiment débouche sur une proposition de qualification - rupture. Elle est complétée par une blocométrie prévisionnelle utilisée en complément à l'analyse de trajectoire pour le dimensionnement des ouvrages pare-blocs.
L'ensemble des résultats de l'analyse de tous les compartiments instables est représentée secteur par secteur sous forme d'un tableau synthétique (*cf.* tableau VII).

Document n° 4 - *Tableau de synthèse.*

Profil	N° compartiment	Aléa de rupture	Volumes après fragmentation
11	P2-11 P2-12 P2-16	m-mt / f-mt m-mt / f-mt m-mt / e-mt	> 10 m^3 > 10 m^3 5 à 10 m^3
12	P2-13 P2-17	m-mt / f-mt m-mt / f-mt	> 10 m^3 2 à 5 m^3
13	P2-21 P2-22 P2-34 P2-34	m-mt / f-mt f-mt / e-mt e-mt / te-mt f-mt	2 à 5 m^3 5 à 10 m^3 2 à 5 m^3 2 à 5 m^3
14	P2-23 P2-23 P2-24 P2-28	m-mt / f-mt e-mt / te-mt m-mt / f-mt m-mt / f-mt	5 à 10 m^3 2 à 5 m^3 5 à 10 m^3 5 à 10 m^3
15	P2-29	m-mt / f-mt	0,5 à 5 m^3
16	P2-32	m-mt	1 à 2 m^3

4.3 La propagation - Approche qualitative - Trajectographies

4.3.1 Objectifs - Moyens

Avant d'envisager une étude de propagation de l'éboulement à l'aide d'une simulation numérique, il convient d'effectuer une approche qualitative prenant en compte les critères relatifs aux conditions de départ, ceux relatifs au versant dans lequel se propagent les éboulis et, éventuellement, les caractéristiques des zones d'épandage.

Cette approche s'appuie sur les observations de terrain, les plans et cartes et les photos aériennes utilisés pour la première partie de l'étude. Dans le cas où l'étude de l'aléa de rupture a nécessité l'établissement préalable de plans spécifiques à grande échelle (1/2 000, 1/500), il convient d'étendre suffisamment vers l'aval le secteur cartographié pour couvrir, *a priori*, toute la zone de propagation.

4.3.2 Données topographiques

L'influence de la configuration de départ sera d'autant plus grande que le versant sera court. Pour des propagations longues, les conditions rencontrées tout au long du versant deviendront alors prépondérantes en fin de trajectoire.

➢ Conditions de départ

La hauteur de l'éventuelle chute libre, la dynamique initiale, la cinématique de la rupture, la qualité du terrain au premier impact (rocher sain, rocher altéré, éboulis compact, éboulis meuble, terrain meuble, eau), vont influer de manière très directe sur le(s) premier(s) rebond(s) et l'amorçage du phénomène de propagation.

➢ Les pentes inférieures

Une fois passée la phase d'initialisation, la propagation des blocs va être conditionnée par la nature physique et morphologique du versant :

- pente générale du versant,
- régularité du profil du versant (fiabilité du pronostic),
- déviations latérales par rapport à la ligne de plus grande pente (initiées dès le départ ou provoquées par des thalwegs),
- nature et épaisseur des formations superficielles (comportement variable en fonction de l'énergie des blocs),
- nature du substratum (qui peut être atteint par poinçonnement dans le cas d'une couverture meuble peu épaisse),
- existence d'aménagements anthropiques (banquettes, plate-formes).

➢ Les obstacles, qu'ils soient naturels ou artificiels, rencontrés au cours de la propagation, sont à prendre en compte et à pondérer en fonction des énergies mises en jeu :

- couvert végétal, forêts (la qualité et la densité du peuplement peuvent jouer un rôle important en cas d'éboulement modeste),
- contre-pentes naturelles,
- ouvrages de stabilisation des versants (murets, perrés, etc., dont le rôle peut être favorable ou défavorable),
- présence d'éboulis à gros blocs,
- ouvrages de protection déjà en place (à apprécier en fonction des énergies mises en jeu).

4.3.3 Les blocs

Le volume global de l'éboulement, la taille des blocs susceptibles de se former au premier impact ou au cours des premiers rebonds, la forme des blocs, vont influer de manière très directe sur l'amorçage du phénomène de propagation.

- La blocométrie prévisionnelle est l'appréciation de la fragmentabilité de la roche en place. Elle varie en fonction de la lithologie, de la continuité des divers joints de diaclases, de la stratification, des failles, du maillage des discontinuités (nombre, espacement).
- L'élancement des blocs a une grande incidence sur la forme de la trajectoire (aérienne ou en transition au sol), élément déterminant la hauteur de vol des blocs, la dissipation de l'énergie, la distance atteinte par les blocs. Tous ces paramètres sont capitaux pour le choix et le dimensionnement des parades.

4.3.4 Estimation de la trajectoire

La trajectoire de propagation de l'éboulement jusqu'à un objectif est à apprécier à la lumière des critères précédents, à l'exclusion de toute référence à la probabilité de réalisation de l'aléa de rupture. L'expérience du géologue relative aux phénomènes rocheux est d'une grande importance vis-à-vis de l'intégration et de la pondération des données collectées.

- Appréciation de la nature physique du versant :
  - formations superficielles de pente,
  - substratum,
  - couvert végétal, forêt (qualité et densité du peuplement).
- Direction en plan de la trajectoire :
  - suivant la ligne de plus grande pente,
  - déviation (éventuelle) au passage des thalwegs,
  - intégration des indices d'anciennes propagations (arbres arrachés, trouées dans le couvert végétal, etc.), à apprécier en fonction des zones de départ probables ou reconnues,
  - cônes d'incertitude,
  - outils de détermination de la trajectoire probable : examen terrestre, photos aériennes.
- Obstacles :
  - contre-pentes naturelles,
  - arbres, densité de peuplement,
  - protections déjà en place (à apprécier au regard des volumes en jeu),
  - autres obstacles, gros blocs, etc.,
  - pérennité des obstacles à la propagation (une forêt est susceptible de disparaître progressivement ou brutalement du fait de coupes ou d'incendies…).
- Probabilité de propagation jusqu'à un ouvrage donné (de très élevée à très faible) : sera appréciée à la lumière des critères précédents, indépendamment de la probabilité de réalisation de l'aléa de rupture.
- Extension limite, enveloppe des trajectoires :
  - examen du site pour reconnaître les points d'arrivée des blocs déjà tombés,
  - outils et méthodes : examen des photos aériennes, témoignages directs (attention, tendance systématique des riverains à la minoration), recherche dans les archives des services de l'État.

L'approche qualitative va déterminer, en fonction des enjeux, si une simulation numérique de la propagation est nécessaire.

L'exemple présent dans la figure 14 décrit une simulation trajectographique faite sur un cas réel afin d'étalonner les paramètres pris en compte (LRPC d'Aix-en-Provence, étude spécifique du versant des Cayres à Ispagnac, Lozère).

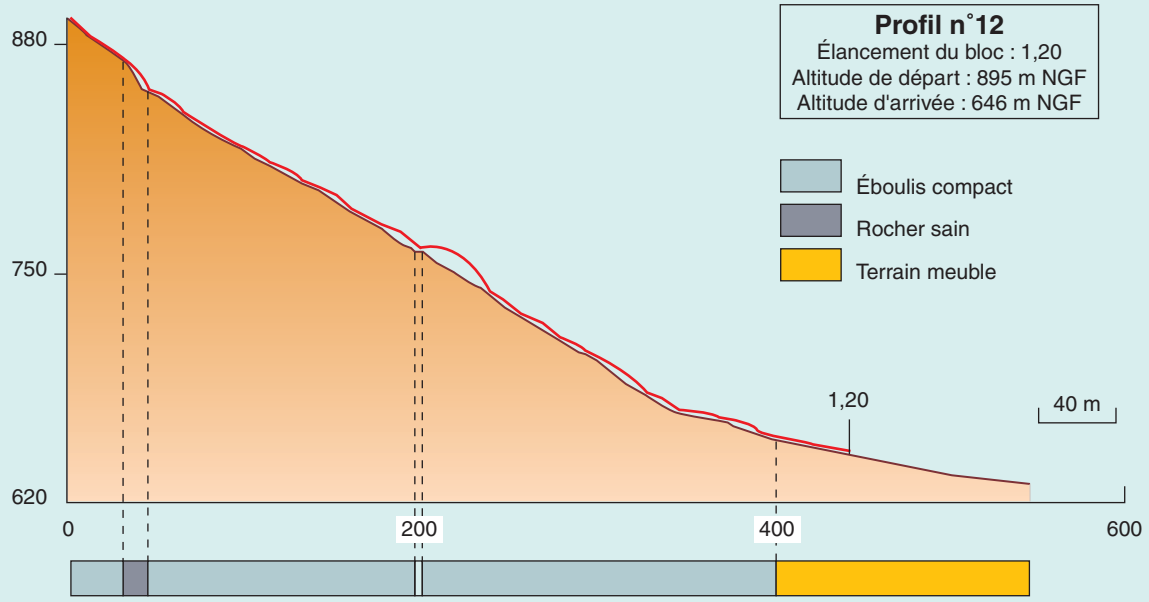
Figure 14
Prise en compte d'un événement bien identifié dans l'étude spécifique d'un versant (Ispagnac, Lozère).

En avril 2001, un bloc de 5 m^3 se détachait d'une petite falaise, traversait la forêt et s'arrêtait dans les prés après une course de plus de 500 mètres et une dénivelée de 250 mètres. Les traces de tous les rebonds ont été relevées sur un plan photogrammétrique à l'échelle du 1/5 000, ce qui a permis de caler au mieux les paramètres de la simulation trajectographique pour les réutiliser sur le reste du versant étudié.

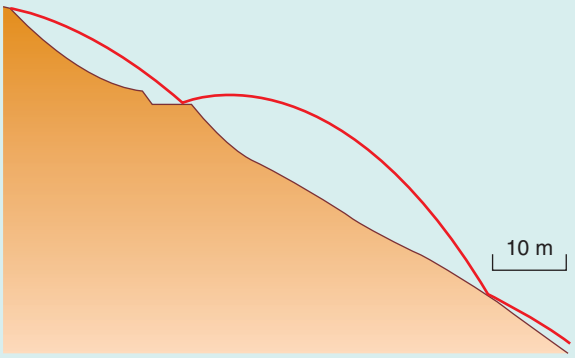
Trajectoire et impacts du bloc au droit de la piste foretière, à mi-versant.

Trajectoire et derniers impacts du bloc avant son arrêt.

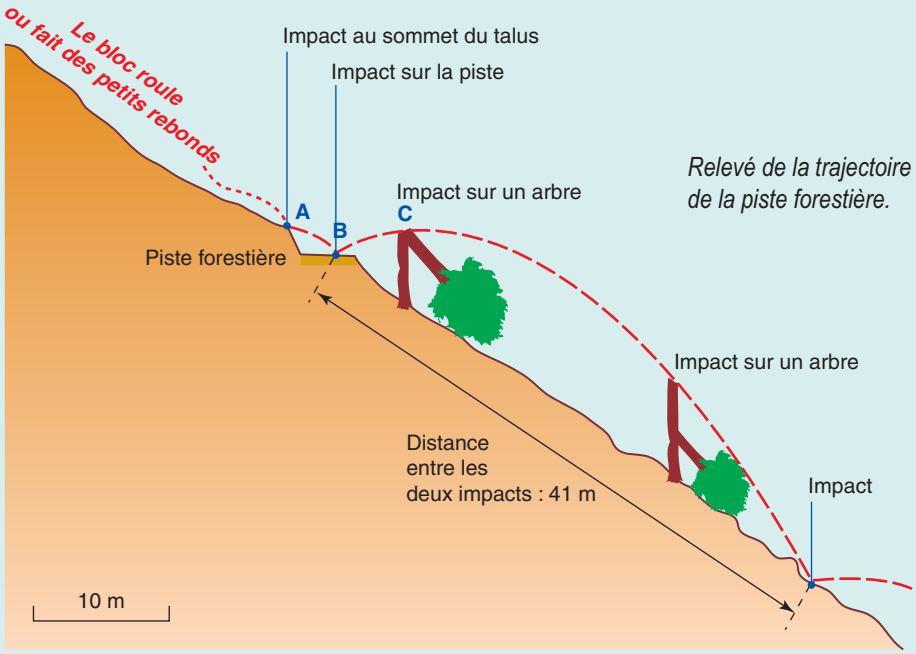
Vue du bloc de 5 m^3.



Analyse trajectographique complète.



Agrandissement de la trajectoire simulée au droit de la piste forestière.



Relevé de la trajectoire réelle au droit de la piste forestière.

ENCADRÉ 4

TECHNIQUES CLASSIQUES DE RECONNAISSANCES DE TERRAIN

Elles sont bien adaptées aux versants rocheux qui ne présentent pas de difficulté d'accès majeures (pas de recours aux techniques alpines) et bénéficient de conditions d'observation favorables (recul, absence de végétation). Elles s'appliquent également aux reconnaissances faites avec une nacelle.

➢ *Les difficultés de visibilité* dues à la végétation peuvent perturber les observations. Dans ce cas, il est nécessaire de procéder aux reconnaissances en période de repos de la végétation ou après un élagage pour des études ponctuelles. En tenir compte dans la programmation des études.

➢ *Les difficultés d'observation* dues au manque de recul peuvent dans certains cas favorables, liés à la topographie, être compensées partiellement par une observation terrestre déportée (versant opposé). Sinon le recours à une autre technique est nécessaire (reconnaissance héliportée, techniques alpines, bras de nacelle, etc.).

➢ *La sécurité des usagers des zones aval* peut imposer des mesures d'exploitation ou de protection spécifiques pendant l'intervention.

➢ *Les problèmes de repérage* se posent avec une acuité particulière dans les zones boisées, où il est évident que l'élagage ne peut apporter que des réponses ponctuelles.

- Nécessité d'un plan de bonne qualité (*cf.* paragraphe 3.2.2) permettant un repérage à partir des détails morphologiques et topographiques figurant sur le plan, à l'aide de l'altimètre, de la boussole, ou du GPS.
- Sur les sites d'extension importante, il est recommandé de procéder à l'implantation permanente de points de repérage sur le versant. Ces points seront reportés sur le plan, ce qui facilitera les reconnaissances ultérieures (repérage par bande rétroréfléchissante, peinture, panneautage, etc.).

➢ *Le marquage des compartiments rocheux identifiés*

- Le marquage doit être lisible à distance et durable jusqu'à une éventuelle phase de travaux, sans constituer pour autant une agression visuelle.
- Mettre en place également sur chaque compartiment un marquage pérennisé sur une plaquette fixée au rocher (exemple : marquage au crayon à peinture sur plaquette alu, etc.).

➢ *Les photos* ont deux objectifs principaux : le repérage dans le contexte et l'illustration des phénomènes décrits.

- Pour chaque compartiment, au minimum une photo d'ensemble (éventuellement un montage) et, à la demande, des clichés particuliers ou de détail.
- Mettre dans le champ un étalon de longueur donnant l'échelle du cliché.
- Pour les clichés destinés à un suivi dans le temps de l'évolution d'un compartiment rocheux et les conditions de prise de vue devront être précisément identifiées afin de permettre la réitération des clichés dans le temps dans les mêmes conditions :
  - focale, sensibilité du film, distance, orientation, date, heure, condition d'éclairage,
  - étalon d'échelle dans le champ (notamment pour l'observation des fissures).

ENCADRÉ 4

Techniques alpines pour la reconnaissance en falaise

Elles sont bien adaptées à l'examen rapproché de zones d'accès difficile ou impossible sans le recours à l'usage de cordes de progression ou d'assurance (falaises, versant ou pentes raides).

➢ Elles sont indispensables à la collecte des informations structurales locales (caractéristiques des épontes, géométrie des discontinuités), à la caractérisation des critères d'évolution (fissuration par exemple) et à la détermination des critères dimensionnels.

➢ Il est nécessaire de présélectionner les zones de falaise à examiner en technique alpine. Un examen exhaustif doit tenir compte des contraintes d'accès pour l'implantation des descentes, du déplacement et du temps nécessaire aux opérations encordées. Le repérage des points d'accès (localisation des descentes en rappel) sera facilité par l'utilisation des photographies générales du site (*cf.* paragraphe 3.2.2). Le repérage altimétrique des points observés sur chaque descente est indispensable.

➢ Elles ne sont pas possibles pour des raisons de sécurité (risque lié à la progression) sur des zones exposées à des chutes de pierres spontanées ou susceptibles d'être déclenchées par la reconnaissance elle-même (notamment le frottement des cordes). Il en est de même lorsque le risque de chutes de pierres, induit par la reconnaissance, met en cause la sécurité à l'aval (ex. falaise dominant des bâtiments, route en service).

➢ Elles peuvent nécessiter des mesures d'évacuation temporaire ou de coupure de circulation.

➢ Photos : le grand angle est nécessaire, possibilités de prises de vues latérales sur d'autres points de la falaise justifiant l'emploi d'un second objectif (ou d'une focale variable).

Reconnaissances détaillées par observation aérienne

Ce type d'investigations, qui intervient en général en complément des observations terrestres, peut, dans certains cas (inaccessibilité du versant notamment) et pour certains types d'études (détection d'aléas majeurs, etc.), précéder les investigations terrestres.

Les observations proviennent essentiellement :

➢ de l'analyse de couvertures spécifiques aériennes en photos obliques, essentiellement des prises de vue par hélicoptère soit avec une chambre métrique soit avec un appareil normal (*cf.* paragraphe 3.2.2),

➢ d'observations héliportées particulières (notamment pour les zones non accessibles. La reconnaissance par hélicoptère, si elle est bien préparée, peut faire gagner beaucoup de temps, ceci compensant les coûts élevés des prestations.

Les observations sont systématiquement repérées et localisées sur les clichés et reportées sur les plans. Les points particuliers devant de manière irréductible faire l'objet d'une reconnaissance spécifique en falaise seront, de même, repérés avec une indication des accès possibles.

> ***Remarque*** *: D'une manière générale, comme pour toutes les observations à distance, le recours à ces techniques impose d'être très attentif aux erreurs d'estimation des dimensions par manque de référentiel. Attention également à l'interprétation visuelle des discontinuités, aux effets de perspective et à la quasi impossibilité d'observation des détails.*

CHAPITRE 5

Détermination des aléas résultants

De l'association de l'aléa de rupture avec les conditions de propagation découle un aléa qualifié de résultant qui, en fonction de la localisation des enjeux ayant motivé l'étude, concrétisera le risque.

La prise en compte des conditions de propagation peut être résumée en considérant les situations extrêmes suivantes :

- pentes ou falaises génératrices d'aléas très proches de l'enjeu, ce qui implique, sauf configuration topographique particulière, une propagation quasi certaine jusqu'à l'enjeu. Dans ce cas, l'aléa résultant se réduit souvent à l'aléa d'écroulement,
- pentes ou falaises génératrices d'aléas éloignées de l'enjeu, ce qui peut limiter la propagation, les blocs résultant de l'écroulement pouvant s'arrêter dans le versant à l'amont de l'enjeu.

La prise en compte de l'aléa résultant pourra être exprimée sous forme d'un tableau synthétique dans le cas d'une approche qualitative. Le tableau VII complète ainsi le tableau présenté dans la figure 13, pour ce qui concerne la propagation et l'aléa résultant.

TABLEAU VII - *Tableau de synthèse : aléa de rupture + propagation*

Profil	N° comprtiment	Aléa de rupture	Fragmentation	« Aléa » de propagation	Aléa résultant (bloc dimensionnant)
11	P2-11 P2-12 P2-16	m-mt / f-mt m-mt / f-mt m-mt / e-mt	> 10 m^3 > 10 m^3 5 à 10 m^3	te te te	10 m^3
12	P2-13 P2-17	m-mt / f-mt m-mt / f-mt	> 10 m^3 2 à 5 m^3	te m	> 10 m^3 (vol. 15 m^3 soit 2,5 m de côté)
13	P2-21 P2-22 P2-34 P2-34	m-mt / f-mt f-mt / e-mt e-mt / te-mt f-mt	2 à 5 m^3 5 à 10 m^3 2 à 5 m^3 2 à 5 m^3	e te e m à e	5 m^3 (ou 10 m^3 avec aléa faible)
14	P2-23 P2-23 P2-24 P2-28	m-mt / f-mt e-mt / te-mt m-mt / f-mt m-mt / fmt	5 à 10 m^3 2 à 5 m^3 5 à 10 m^3 5 à 10 m^3	te e te te	5 m^3 (soit 1,75 m de côté) (ou 10 m^3 avec aléa modéré)
15	P2-29	m-mt / f-mt	0,5 à 5 m^3	m à e	5 m^3 (soit 1,75 m de côté)
16	P2-32	m-mt	1 à 2 m^3	f	2 m^3 (soit 1,25 m de côté avec aléa faible)
17	P2-31 P2-27	f-mt m-mt	2 à 5 m^3 2 à 5 m^3	f f à tf	5 m^3 (avec aléa faible)
18	P2-30	m-mt	2 à 5 m^3	f à tf	5 m^3 (avec aléa faible)

Dans le cas des falaises déportées, la prise en compte de l'aléa de propagation, qui est abordé de manière qualitative en première approche (*cf.* chapitre 4), nécessitera le plus souvent d'être précisé par la mise en oeuvre de simulations numériques (trajectographies).

Les résultats des simulations sont pris en compte pour évaluer la propagation des blocs jusqu'à l'enjeu. La qualification de l'aléa repose essentiellement sur la probabilité de réalisation du phénomène et l'appréciation de la taille et de la forme des blocs qui déterminent les énergies mises en jeu (masses, vitesses, etc.) :

- la classe (de départ + propagation + fragmentation éventuelle) déterminant les volumes et les énergies mises en jeu,
- la « probabilité/délai » de réalisation du phénomène.

Ces deux éléments permettent d'orienter le choix des parades et leur dimensionnement tout en gérant les priorités de sécurisation d'un site (Fig. 15).

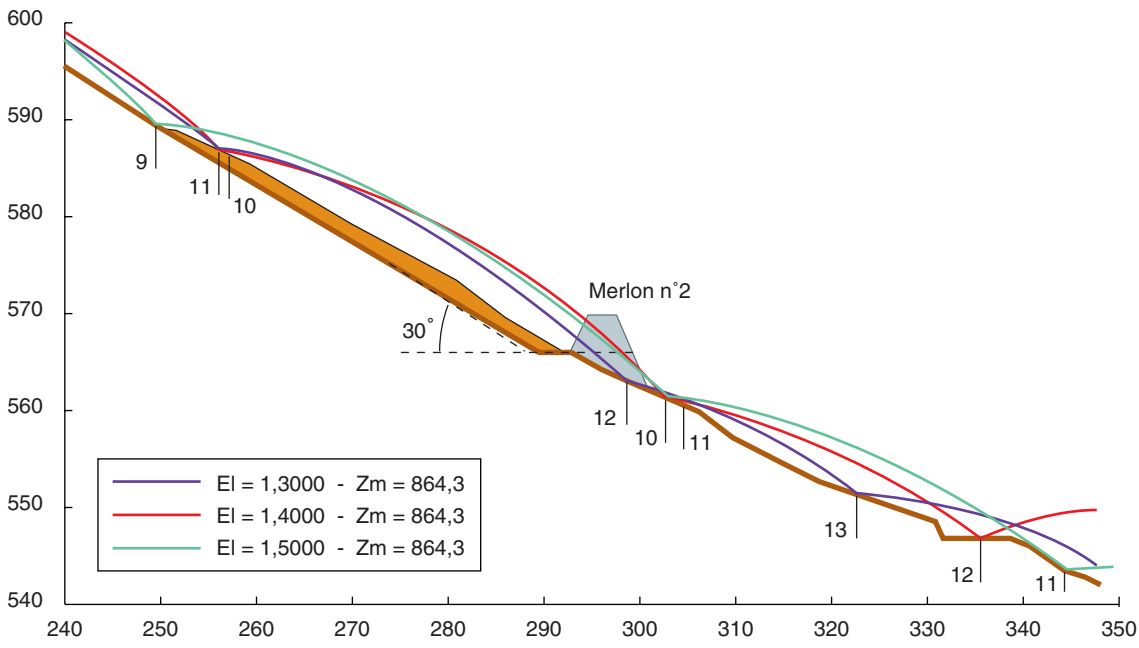


Figure 15

Exemple d'implantation de parade à partir d'une trajectographie. Le volume du bloc dimensionnant a conduit à retenir une parade de type merlon, les trajectoires issues des simulations permettent de positionner et de déterminer la géométrie (hauteur, pente du parement arrière) du dispositif.

En fonction du contexte topographique, une certaine dispersion des trajectoires en plan est en général constatée. Quasi nulle dans le cas d'un thalweg très marqué, on admet au contraire un cône de dispersion de plus ou moins 15° dans le cas d'une topographie régulière. Le dimensionnement en largeur et le recouvrement entre dispositifs de parades permettent de gérer ces incertitudes (Fig. 16).

Les trajectoires limites simulées à partir des cartes des trajectoires (établies à partir des aléas de rupture) peuvent également être utilisées comme base à l'établissement d'une cartographie d'aléa résultant. Cette approche particulière, utilisée pour les plans de zonage d'aléa, dans le cadre d'un plan de prévention des risques par exemple, sort du cadre du présent guide.

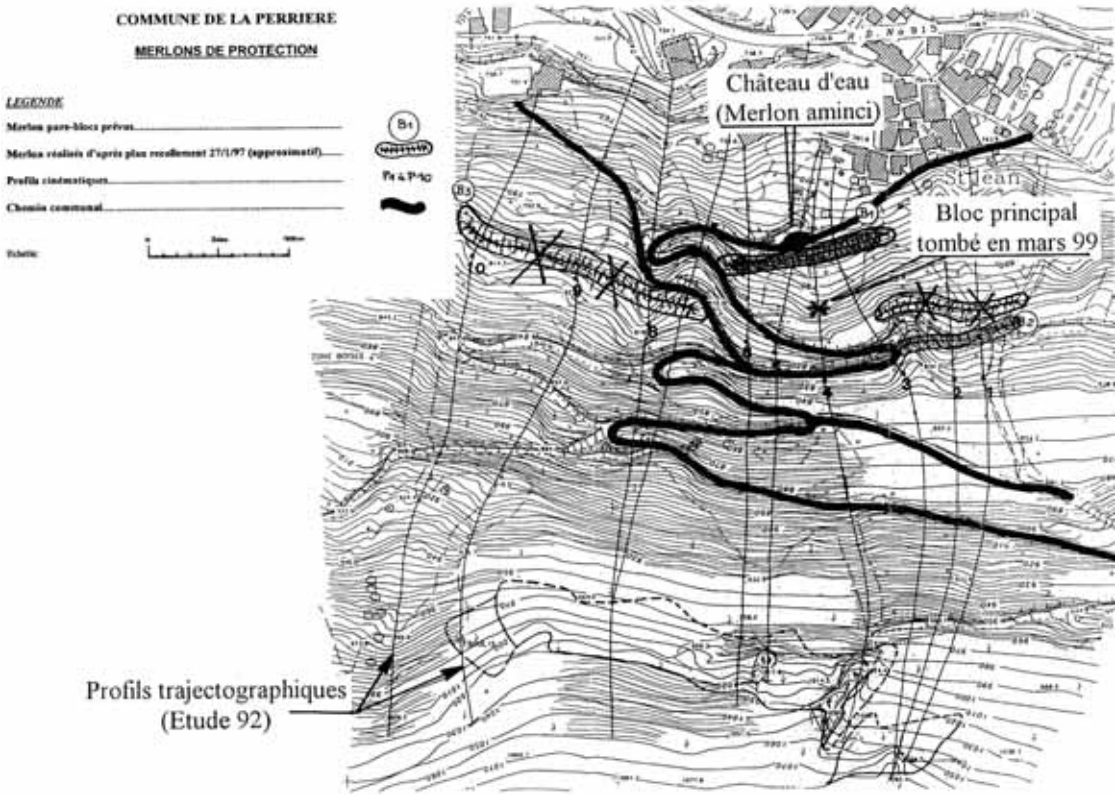


Figure 16
Exemple d'implantation en plan de merlons à partir d'une série de profils de simulation trajectographique.

Chapitre 6

Fiches de cas

- RN 116 Thuès-les-Bains (66) 64
  LRPC Toulouse - LRPC Lyon
- Falaise de Barjac « Les Boutarottes » (48) 66
  LRPC Lyon
- Commune de la Perrière « Versant de la Becqua » (73) 68
  LRPC Lyon
- A 40 Tête amont du Tunnel de Chamoise (01) 70
  LRPC Lyon
- A 40 Zone du Mont Cornet (01) 71
  LRPC Lyon
- RN 1 Route du Littoral (Ile de la Réunion) (974) . . . . . 72 - 74
  LRPC Aix-en-Provence
- Station d'épuration du Cap Sicié (83) 76
  LRPC Aix-en-Provence
- Les Baux-de-Provence « Falaise de Baubesse » (13) 78
  LRPC Aix-en-Provence
- La Tête de Chien (06 et Principauté de Monaco) 80
  LRPC Nice

LRPC de Toulouse - LRPC de Lyon

Un éboulement, survenu en janvier 1999 sur la RN 116 au niveau de Thuès-les-Bains (Fig. 1), a nécessité une intervention sur l'ensemble du versant origine du départ de l'éboulement afin de localiser les différents compartiments potentiellement instables (C1, C2,... sur les figures 2 et 3).

Ce diagnostic, couplé à une analyse de la fracturation et à une représentation cyclographique des principales discontinuités (Fig. 2) a permis de définir les solutions confortatives les mieux adaptées.

Une analyse de la propagation des blocs éboulés dans le versant est venue compléter cette étude avec pour objet d'implanter au mieux les dispositifs d'arrêt de type écran déformable.

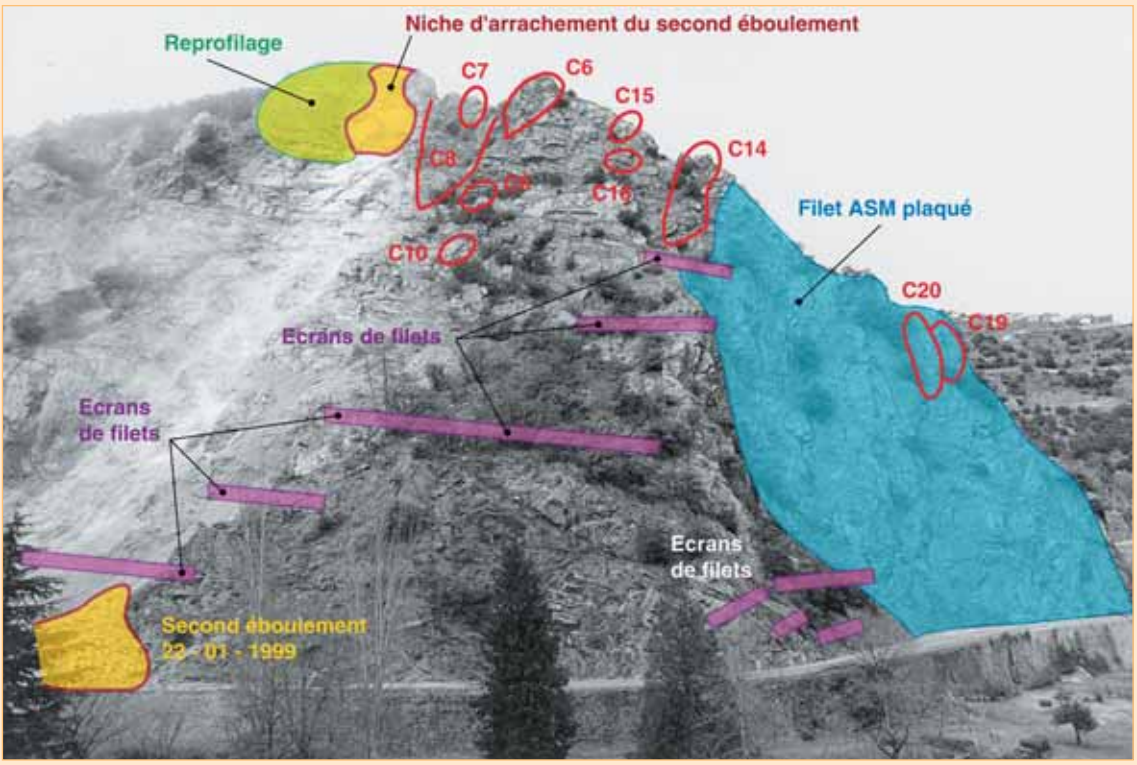


Figure 1
Repérage des compartiments instables - Principes et localisation des dispositifs de parade.

Fiche de cas : RN 116 à Thuès-les-Bains (66)

Route Nationale n° 116 de Perpignan à Bourg-Madame
Éboulement du 21 janvier 1999 à Thuès-les-Bains (Pyrénées-Orientales)

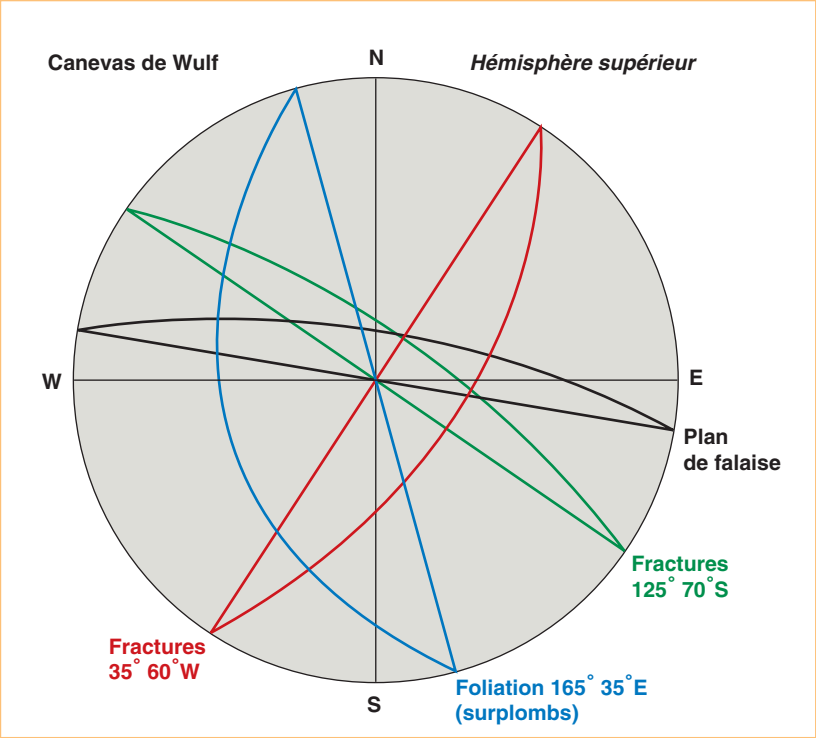


Figure 2
Représentation cyclographique des différentes discontinuités.

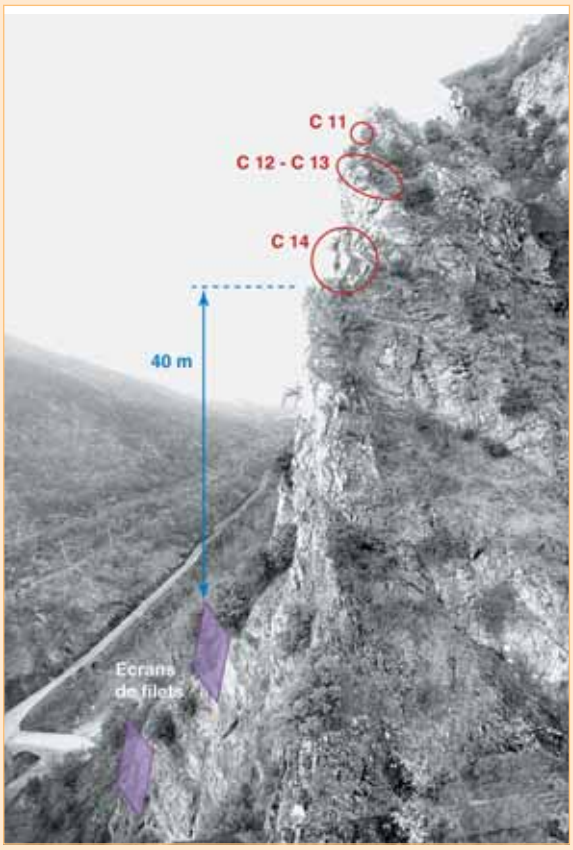


Figure 3
Vue latérale de la partie médiane de la crête du site.

LRPC de Lyon

La présente fiche de cas est un extrait de l'étude de stabilité des falaises qui surmontent le village de Barjac.

La zone de départ de l'éboulement se situe dans l'assise de dolomies ruiniformes du Bajocien supérieur. L'analyse historique (documents, témoignages, présence de blocs en pied de versant, etc.) a montré que ce phénomène était récurrent à l'échelle du siècle.

L'inventaire des compartiments instables et l'analyse des propagations (simulations sur logiciel PROPAG) ont conduit à proposer un merlon de protection capable d'intercepter des masses de 500 tonnes.

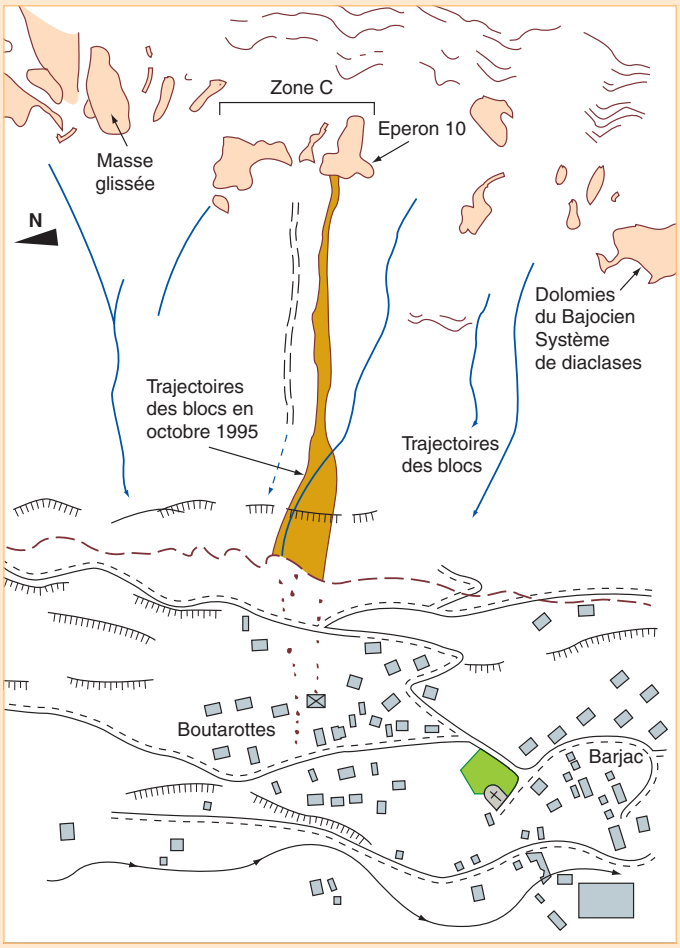


Photo-interprétation du secteur des Boutarottes. LRPC Lyon, août 1996.

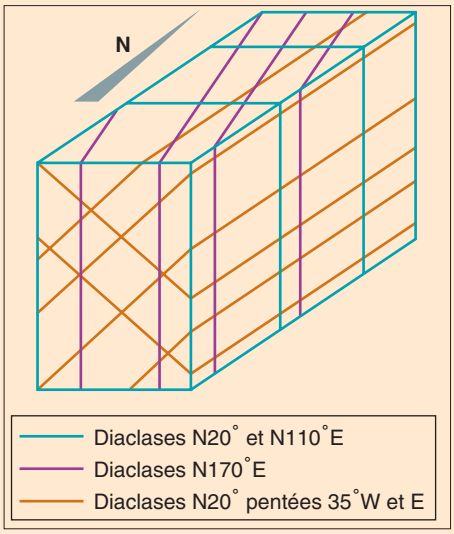
Traces de l'éboulement de 1995.

La maison atteinte par les blocs.

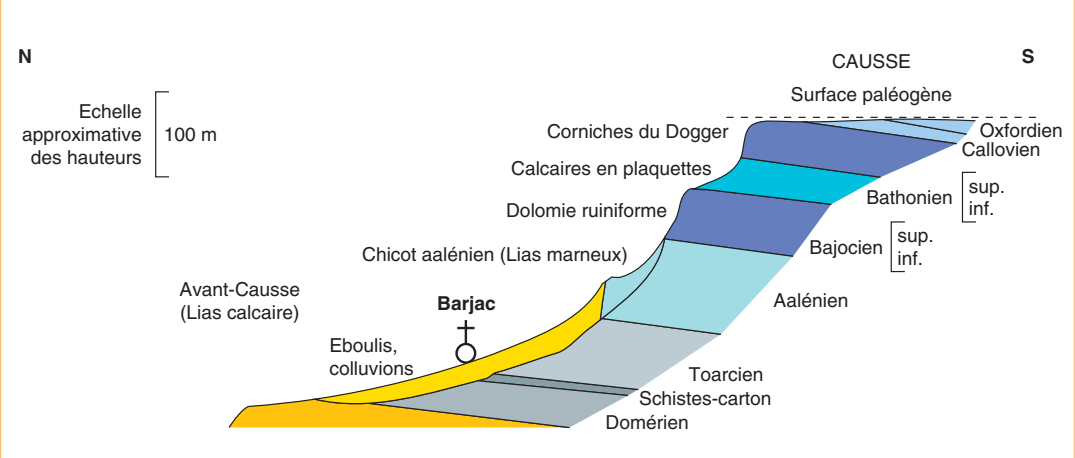
Fiche de cas : Falaise de Barjac (48)

Quartier des Boutarottes à Barjac (Lozère)
Éboulement du 08-10-1995

Vue générale de l'éperon (compartiment) 10.



Famille de discontinuités découpant la barre dolomitique du Bajocien Supérieur.



Coupe géologique du site.

Vue des parades : merlons de protection (▼).

LRPC de Lyon

L'étude de stabilité de l'épaulement de schistes et grès houillers qui surmonte le hameau de la Perrière a conduit à qualifier un certain nombre de compartiments instables.

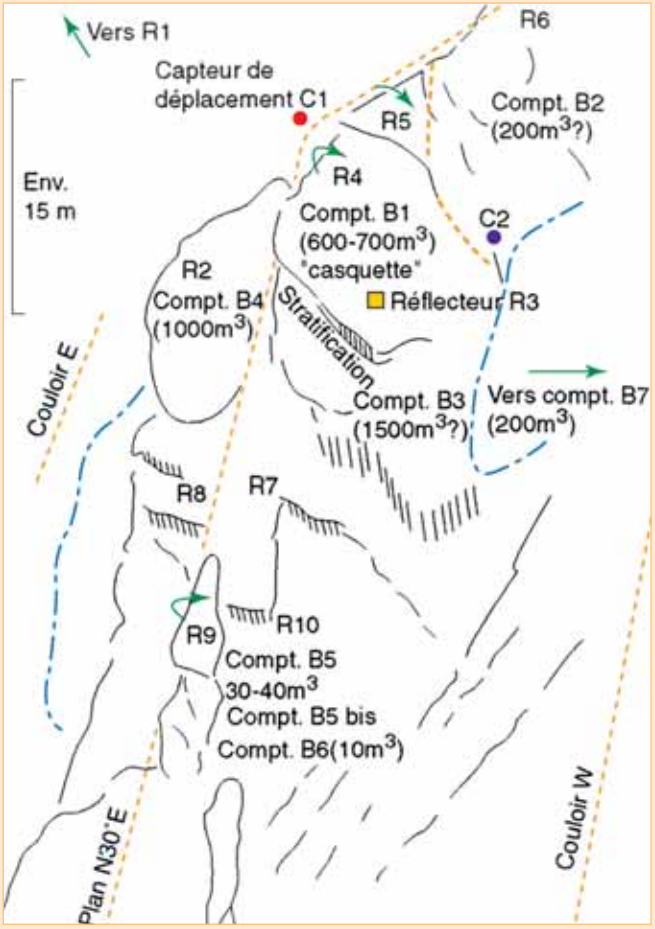
Une partie des merlons de protection prescrits dans cette étude a été réalisée en 1994. Parallèlement, la surveillance du piton de La Becqua (compartiments G2 à G12), entamée en 1975, a été poursuivie.

La forte accélération du phénomène constatée début mars 1999 a incité à approfondir l'étude structurale et géomécanique du site pour mieux interpréter les données de la télé-surveillance.

Ceci a conduit à évacuer préventivement une partie du village le 10 mars 1999. L'éboulement s'est produit le 24 mars (*cf*. bibliographie).

Vue du site, localisation des compartiments G1 à G17. LRPC Lyon, 1982.

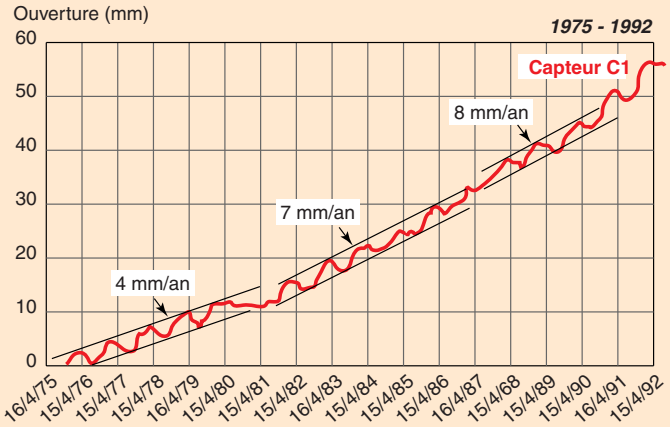
Le sommet de l'éperon après rupture des compartiments B1 et B3.

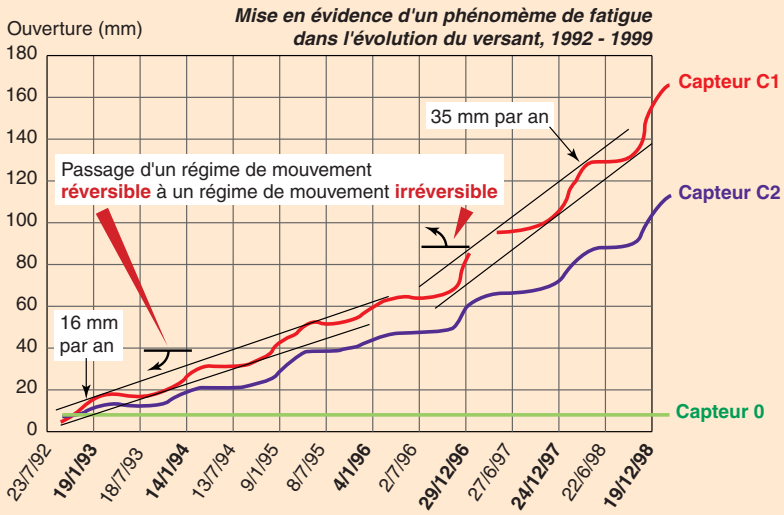


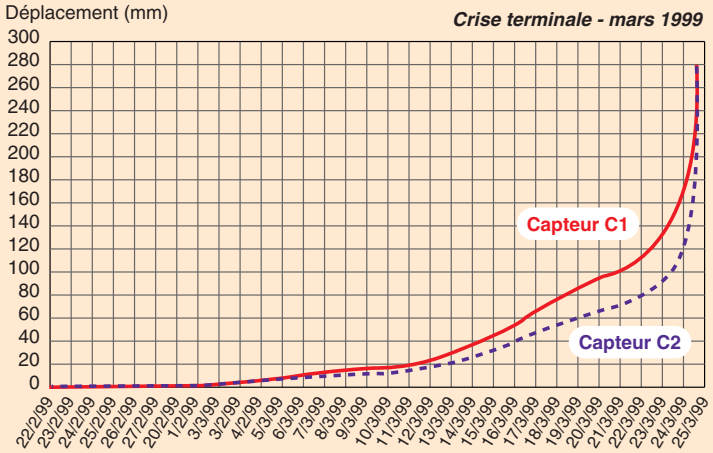
Esquisse structurale du Piton de la Becqua.

Fiche de cas : Versant de la Becqua (73)

Commune de la Perrière (Savoie)
Versant de la Becqua







Évolution du phénomène de 1975 à mars 1999.

Le bloc principal d'un volume de 60 m^3 environ.

Fiche de cas : Autoroute A40 (01)

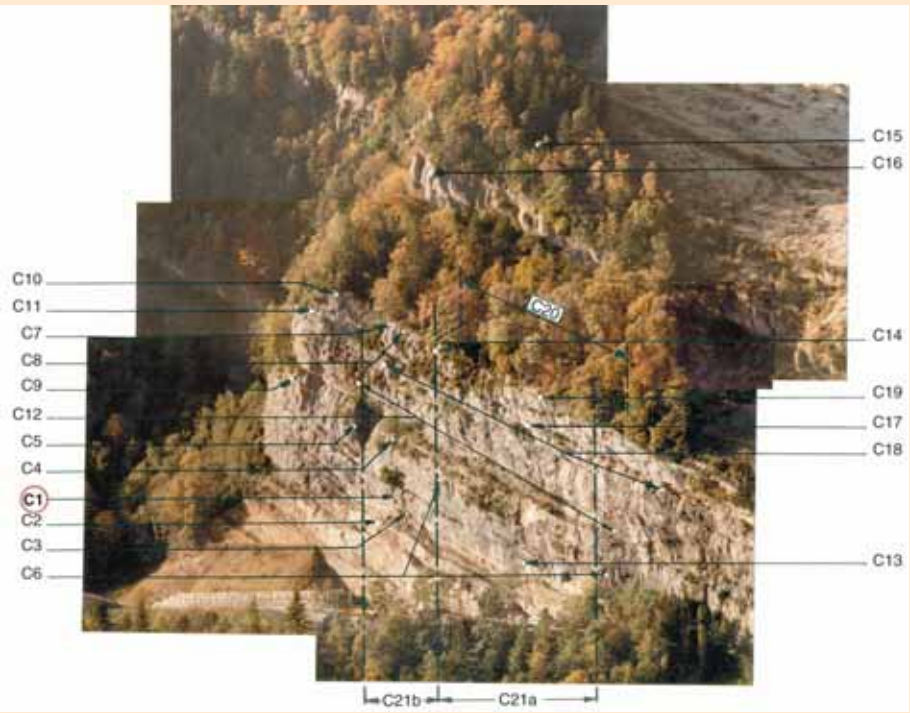
Tête amont du Tunnel de Chamoise (Ain)

LRPC de Lyon

Étude de stabilité dans le cadre du projet autoroutier :

- repérage exhaustif des compartiments instables (accès par techniques alpines),
- localisation sur une mosaïque de photos,
- établissement de fiches analytiques de qualification de l'aléa pour chaque compartiment repéré.

Vue générale de la tête nord avant réalisation du tunnel et du viaduc des Neyroles. Localisation des compartiments instables.



CETE - LRPC de LYON

FICHE ANALYTIQUE
Qualification de l'aléa d'éboulement

IDENTIFICATION : CHAMOISE
Compartiment n° 1
LOCALISATION : photo A1-2
falaise inférieure
Photo : A1-2 | Figure : A3-1 et 2
Date de rédaction de la fiche : octobre 1981

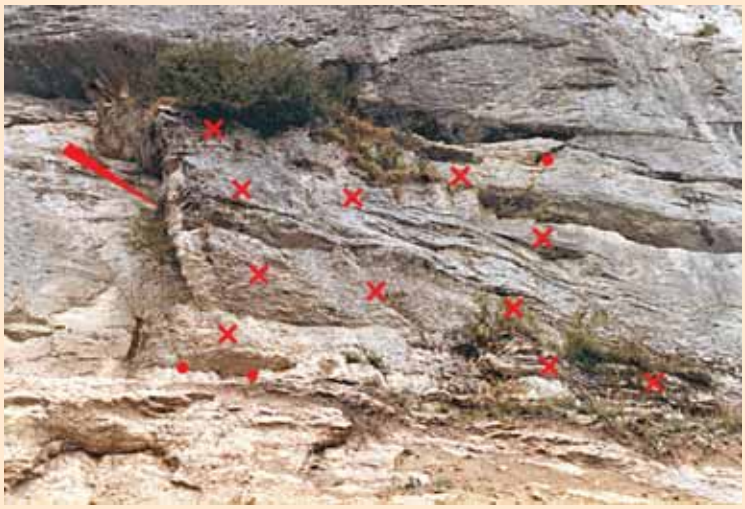
1. Description
1.1 Nature
Écaille découpée à mi-hauteur de la falaise inférieure.
1.2 Paramètres géométriques
h = 7 m l = 7 à 8 m e = 1 à 1,5 m max.
1.3 Paramètres géomécaniques
Découpage arrière par fracture régulière et continue, visible côté est et partielle à la falaise.
Orientation N 150°E - 83°N.
Ouverture de l'ordre du centimètre.
Base de l'ensemble partiellement sous-cavée.

2. Stabilité
2.1 Type de rupture
Rupture de pied avec glissement.
2.2 Caractérisation du compartiment
Nature : volume de l'ordre de 40 m³
« Probabilité / Délai » : élevé à moyen terme
2.3 Probabilité de formation de blocs
Blocs > 5 m³ peu probable
Blocs de 1 à 5 m³ très probable

3. Propagation
3.1 Données topographiques
Chute à 70-75° de pente jusqu'à l'aire de stockage (dénivelée de 20 m)
3.2 Fragmentation
Probabilité élevée pour qu'il subsiste des blocs jusqu'à 2 ou 3 m³
3.3 Trajectoire
Direction : aire de stockage Probabilité de propagation : très élevée

4. Risque résultant
Nature : glissement d'un volume de 40 m³ fragmentable en blocs jusqu'à 2 à 3 m³ avec probabilité très élevée de propagation vers la plateforme autoroutière.
« Probabilité : Délai » : élevé à moyen terme

5. Mesures de protection
Ancrages passifs

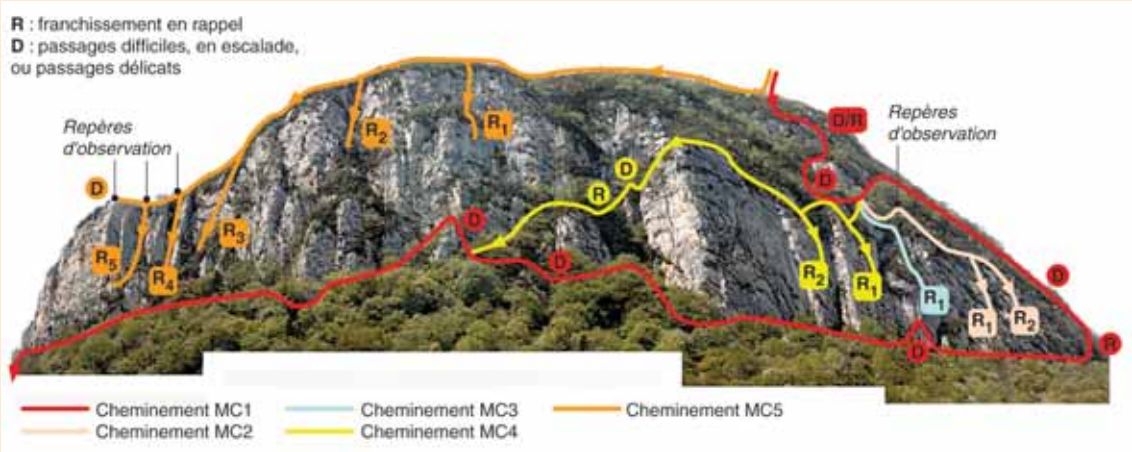


Détail : Écaille décollée d'un volume de 40 m³ environ (C1). CETE Lyon, octobre 1981.

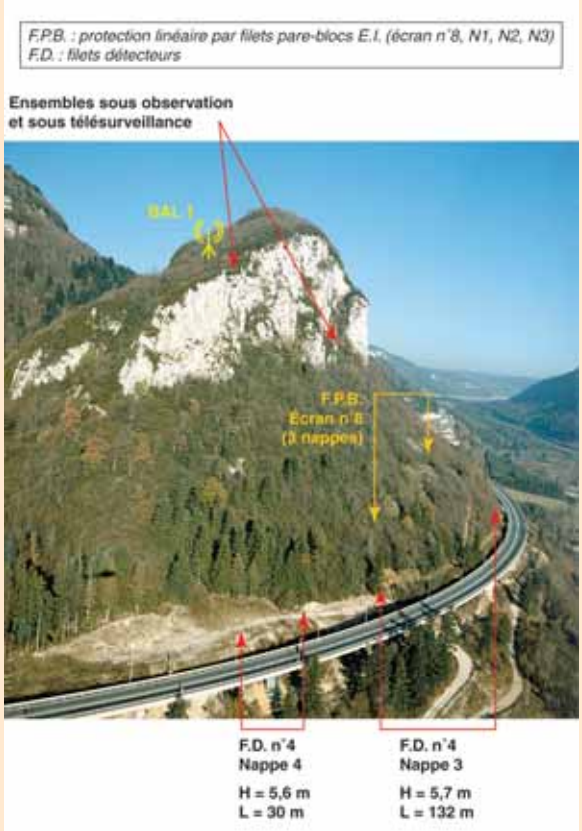
LRPC de Lyon

En complément aux parades installées, élaboration d'une stratégie de surveillance :

- établissement d'un plan de cheminement pour le contrôle périodique des compartiments susceptibles d'évoluer à long terme,
- équipement en télésurveillance des compartiments instables.



Cheminements en falaise pour le contrôle et la surveillance périodiques des compartiments rocheux. CETE Lyon 1988.



Vue aérienne oblique de la zone du Mont Cornet. (FPB = filets pare-blocs).

LRPC d'Aix-en-Provence

La volonté de créer à terme un itinéraire entièrement hors phénomènes chutes de blocs, a conduit à engager une étude globale sur les 13 kilomètres de la RN 1 dite « Route du Littoral », liaison vitale entre Saint-Denis et la Possession. Cette deux fois deux voies absorbe plus de 40 000 véhicules par jour sous une falaise de 100 à 150 mètres de hauteur.

La partie historique et documentaire a revêtu un caractère particulièrement aigu. La recherche et la localisation des éboulements anciens (Fig. 1) et des instabilités potentielles observables (Fig. 2) a été la base de l'étude.

La découverte de clichés stéréoscopiques des falaises vierges de tout aménagement, en date de 1955 (Fig. 3), a permis des restitutions photogrammétriques partielles (Fig. 4) et la reconstitution des profils des versants (Fig. 5).

Des comparaisons, très utiles à l'étude, ont pu être faites avec les documents issus de la campagne photographique et topographique de 1997 (Fig. 6 et fig. 7).

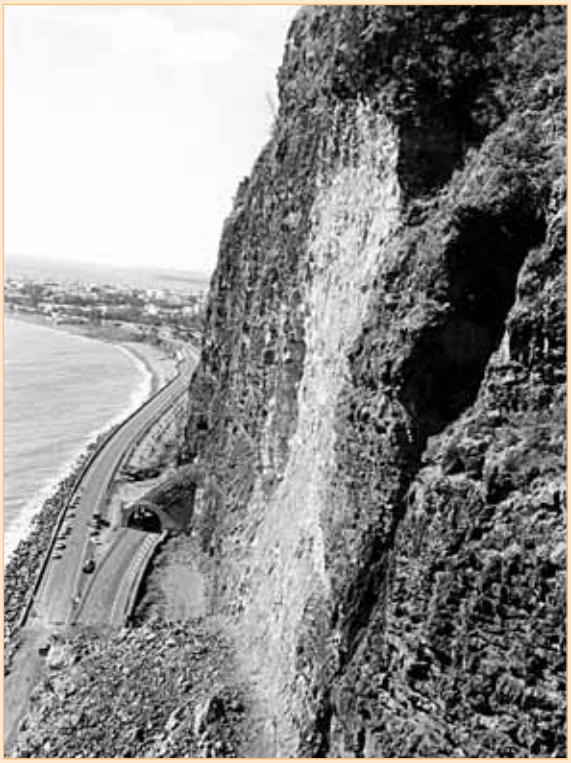


Figure 1
Éboulement en masse de 1980 (25 000 m^3).

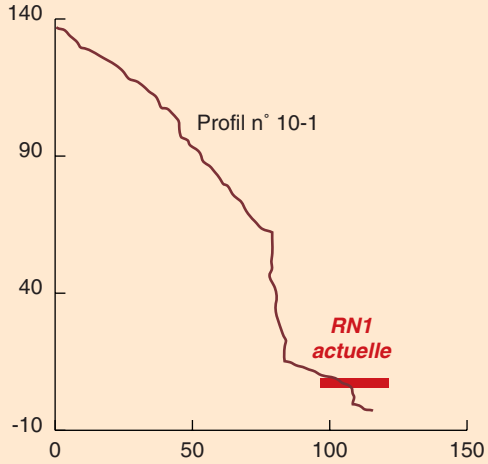
Figure 2
Blocs instables posés sur la pente.

Fiche de cas : RN 1 à la Réunion (974)

Ile de la Réunion
(Route du Littoral (RN1) - planche 1

Figure 3
Recherche documentaire, cliché pris en 1955.
Ravine à Jacques-la-Grande Chaloupe).

Figure 5
Profil terrain en 1955.



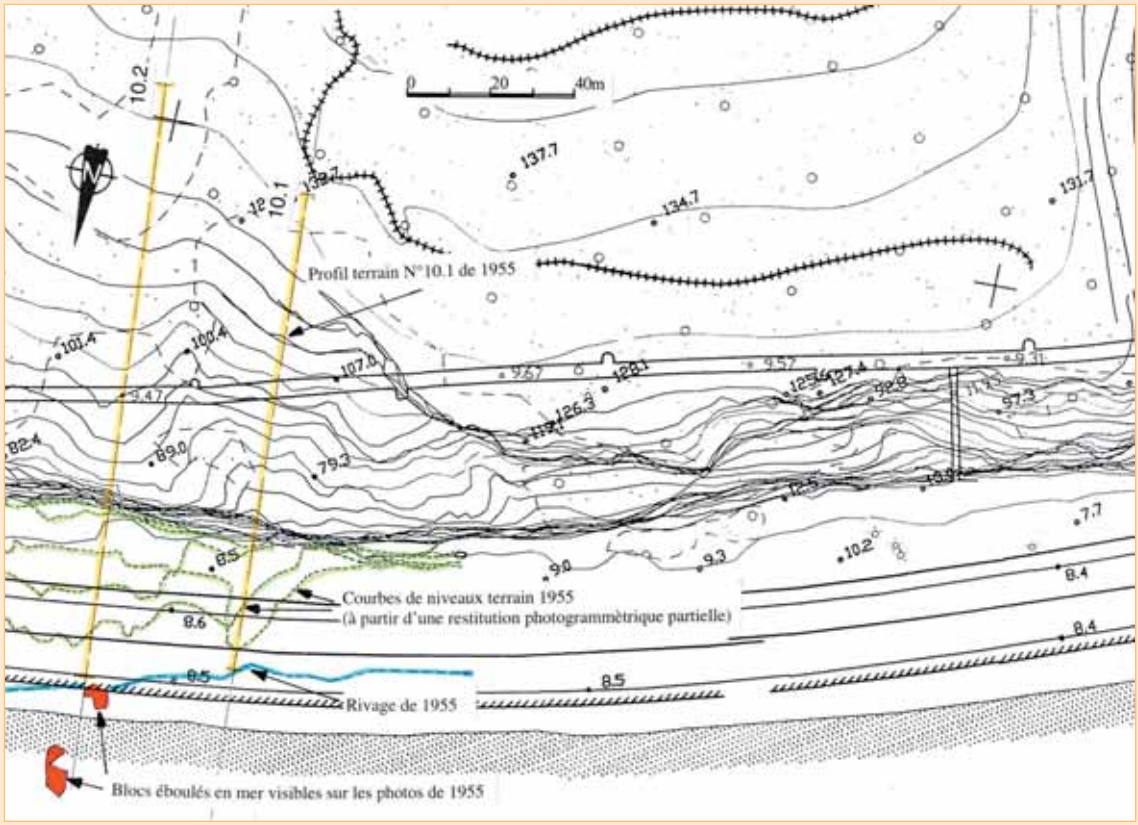


Figure 4
Restitution photogrammétrique partielle des prises de vues de 1955.

LRPC d'Aix-en-Provence

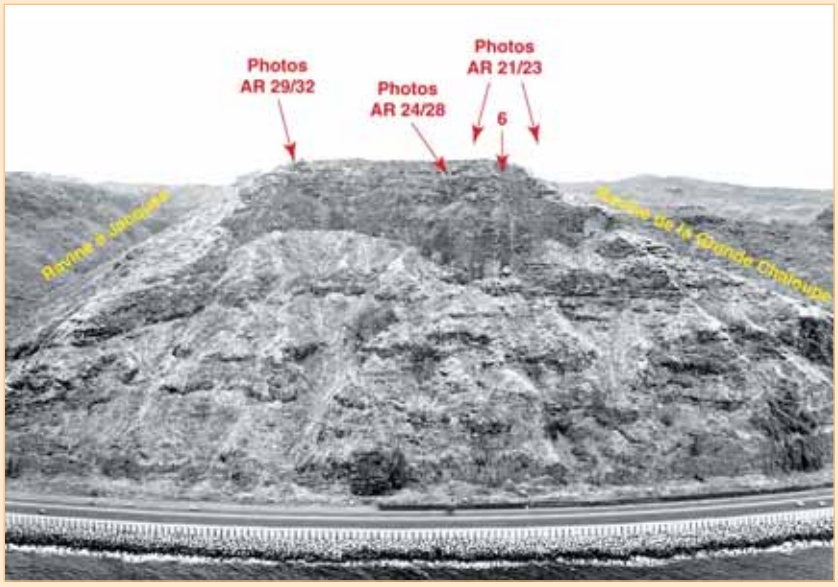


Figure 6
Prises de vues obliques de 1997 avec localisation des photos de détail des instabilités. (Ravine à Jacques La Grande Chaloupe).

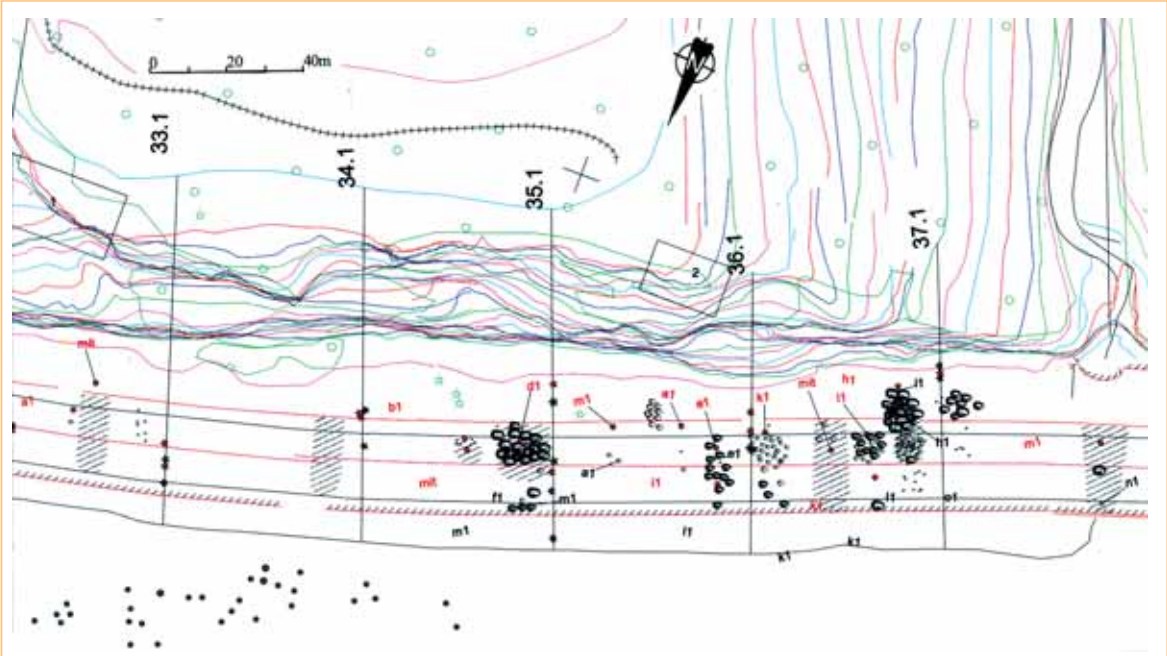


Figure 7
Plan photogrammétrique de 1997 avec relevé des impacts et des blocs en mer.

Fiche de cas : RN 1 à la Réunion (974)

Ile de la Réunion
Route du Littoral (RN1) - planche 2

L'analyse des fiches d'événements, relevés par la subdivision de l'Équipement de Saint-Denis depuis 1976, a permis de localiser les zones d'éboulement, leur volume et les points d'impact direct sur la chaussée (Fig. 7).

Ces observations mises en parallèle avec les modélisations trajectographiques (logiciel PROPAG) effectuées tous les 50 m (Fig. 8) et les relevés des blocs visibles en mer (Fig. 7) ont validé le modèle et les principales zones d'impact.

Ainsi a été défini, sur les 13 km de la RN 1, une limite des premiers impacts réels et calculés atteignant la plate-forme et une limite du corps d'éboulement. Ces deux limites ne prennent pas en compte, à ce niveau de l'étude, les rebonds pour la ligne des premiers impacts et de la langue d'éboulement pour le corps d'éboulement (Fig. 9).

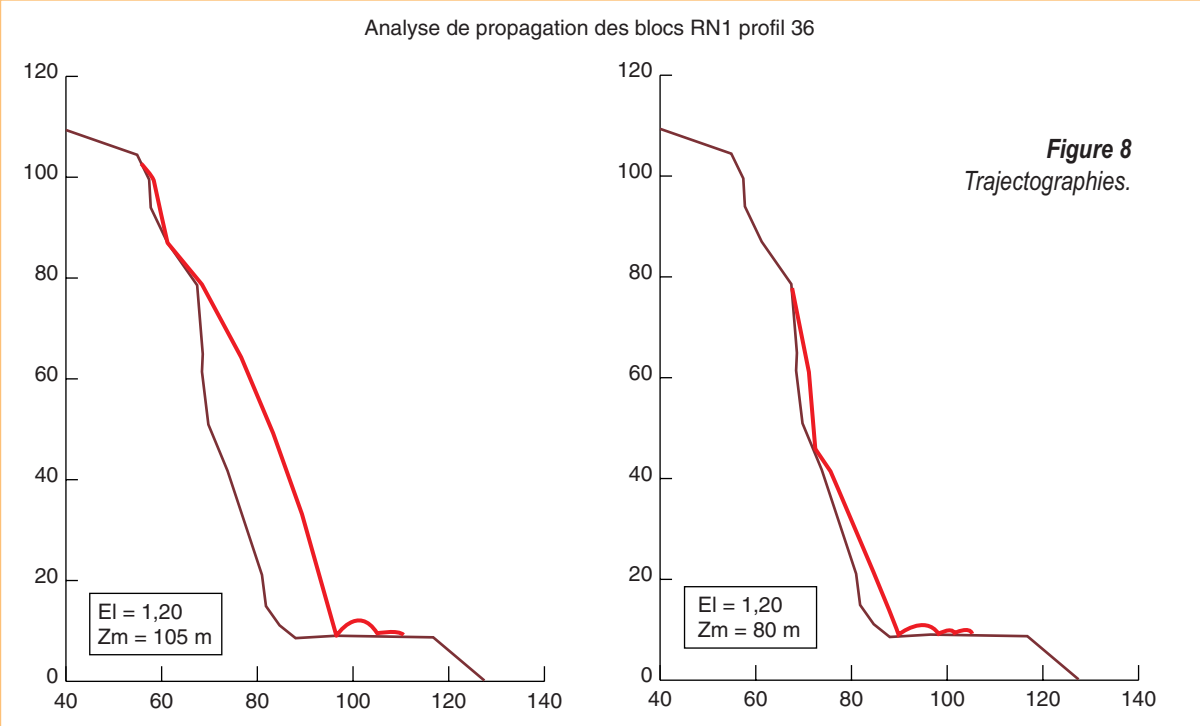


Figure 8
Trajectographies.

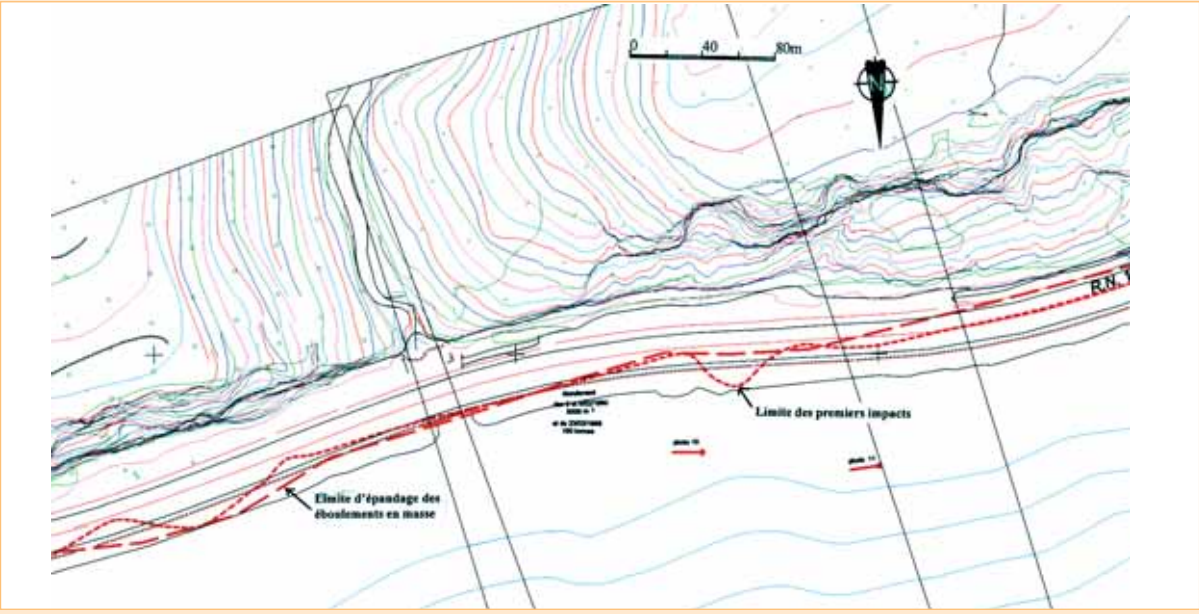
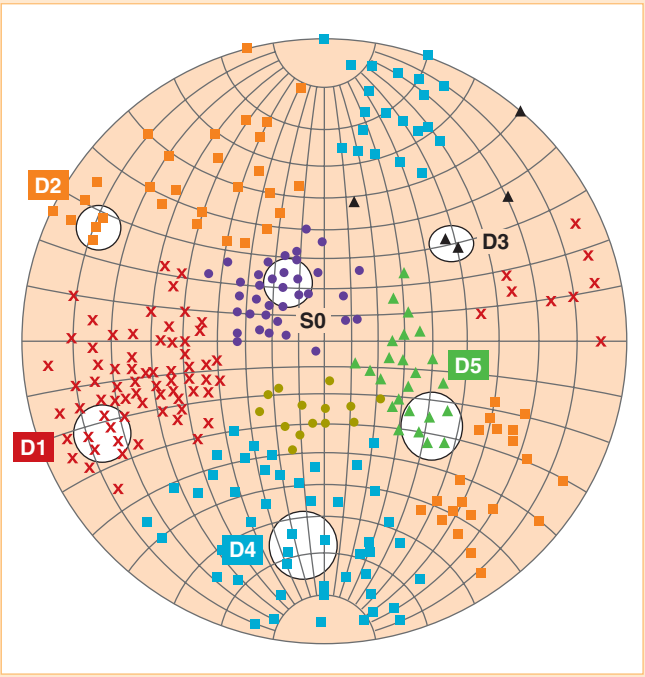


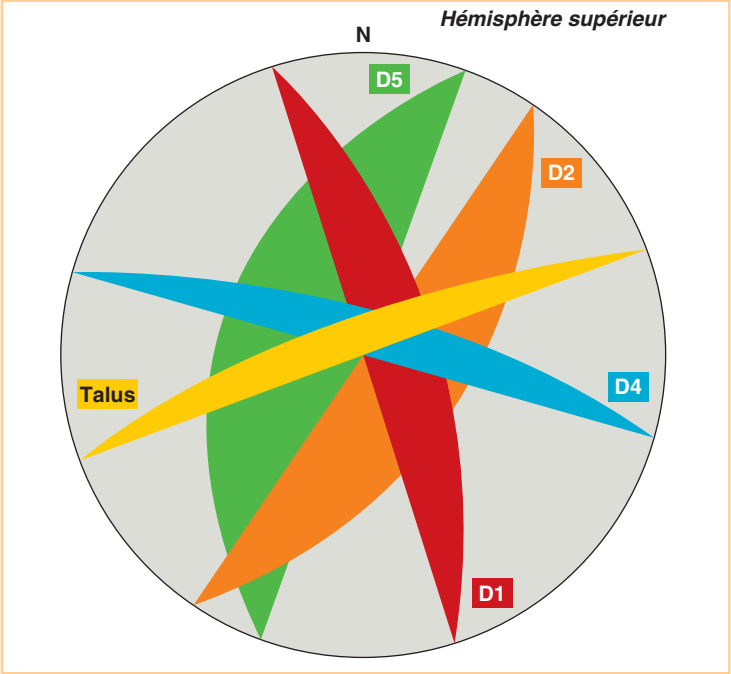
Figure 9
Limites de propagation des éboulements (premier impact des blocs et épandage).

LRPC d'Aix-en-Provence

Photo de détail de la fracturation.

Analyse de la fracturation sur photos aériennes.





Répartition des différentes familles de discontinuités.

Fiche de cas : Cap Sicié (83)

Station d'épuration du Cap Sicié (Var)

La future station d'épuration de Toulon-ouest se situe à la pointe du Cap Sicié, dans une petite baie où débouchait le rejet des eaux usées de la ville avec un énorme panache en mer.

Construite sur une plate-forme d'environ 400 mètres de largeur gagnée sur la mer et protégée par une digue, l'usine de traitement s'adosse à la falaise de pied d'un versant de plus de 300 mètres de dénivelée. Ce versant est constitué de quartzophyllades grises en partie supérieure et d'arkoses beiges en partie inférieure avec, au contact, un niveau de schistes noirs plus ou moins épais.

En préalable à ces travaux, une étude géologique de l'ensemble du versant a été réalisée avec un relevé et une analyse de la fracturation sur photographies aériennes.

La mise en évidence de sept familles de discontinuités a contribué à comprendre les différents modes de rupture pour y appliquer les confortements adaptés.

Un relevé assez exhaustif des instabilités potentielles a permis de localiser les principales zones de départs. Quatorze lignes d'écrans déformables ont été positionnées à partir de l'analyse trajectographique de 26 profils issus du plan photogrammétrique à 1/500.

Sur la base de cette étude, ce sont plus de 3 millions d'euros (20 millions de francs) de travaux de confortement, contribuant à la sécurité du site, qui ont été réalisés, préalablement à toute intervention dans la baie du Cap Sicié.

Vue générale du site avant travaux.

Photo de détail des dispositifs de protection :
- buton, grillage et filet plaqués, écrans de filets, ancrages passifs.
L'échelle est donnée par les ouvriers travaillant dans le versant (cercle, en bas, à gauche).

Vue de l'usine en cours de construction.

LRPC d'Aix-en-Provence

Figure 1
Vue générale du site.

Figure 2
Vue détaillée du site et de la cicatrice d'éboulement.

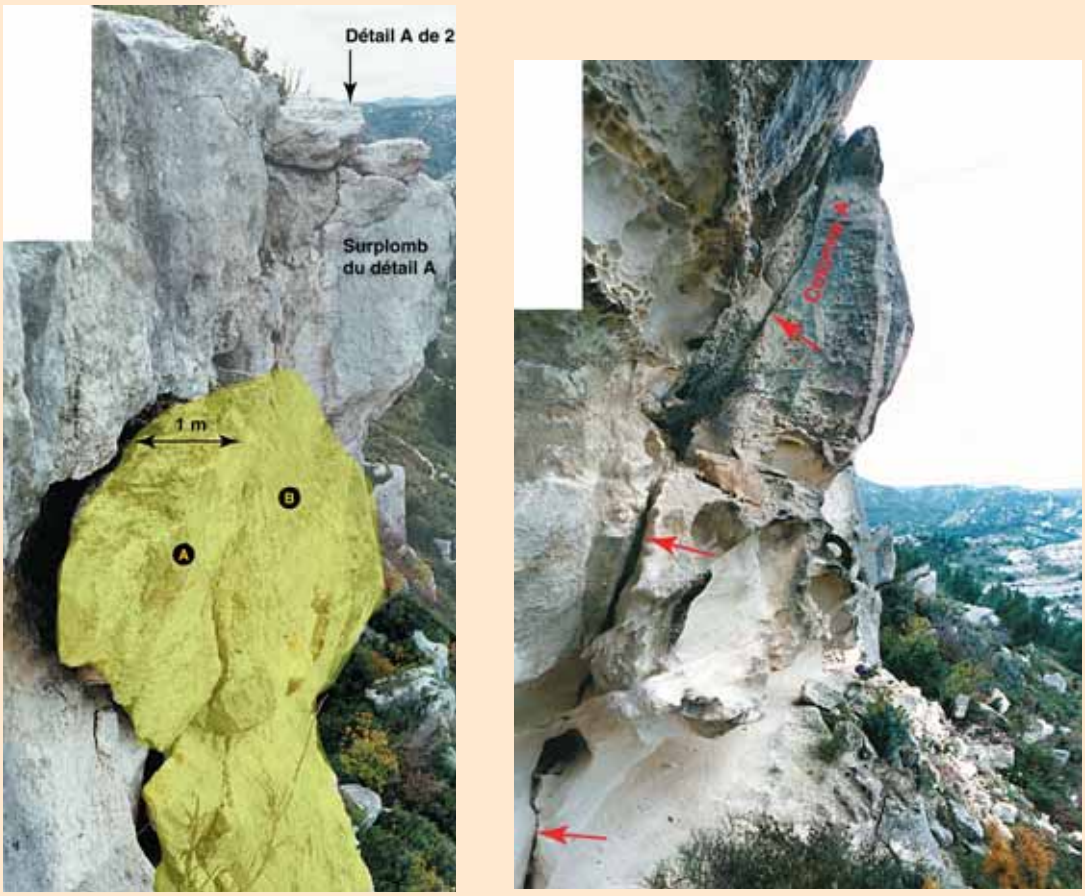


Figure 3
Détails des types d'instabilité relevés.

Fiche de cas : Les Baux de Provence (13)

Falaise de Baubesse aux Baux de Provence (Bouches-du-Rhône)

En 1994, un éboulement ayant pour origine la falaise de Baubesse, s'est propagé jusque sur un parking de l'hôtel du Mas des Grès, en limite de la RD 27 A (Fig. 1, 2, 4).

Cet événement a amené la mairie des Baux de Provence à engager une étude d'aléa portant sur le phénomène de chutes de blocs en identifiant les masses instables (Fig. 3) et les solutions de traitement. Les travaux de confortement ont été réalisés dès après.

Le caractère très particulier de cette falaise de molasses, où des phases de régression très anciennes sont visibles, se traduit par une potentialité d'éboulements élevée sur l'ensemble du site. Un événement en date de 1996 (Fig. 4) est venu confirmer le diagnostic.

Une seconde étude, suivie de travaux en 1998, a été engagée sur la partie ouest de la falaise surplombant la zone urbanisée. Elle comprend, outre l'identification de compartiments instables, une analyse trajectographique (Fig. 5). Pour ce faire, une restitution photogrammétrique à 1/1000, avec des courbes équidistantes de 1 mètre, a été réalisée pour déterminer le mode de propagation dans le versant et une limite d'épandage des blocs (Fig. 4).

Cette analyse à été la base des solutions à mettre en oeuvre :
- purges, confortements de paroi (ancrages, butons, etc.), écrans de filets déformables.

L'objectif étant de protéger les habitations et la RD, lieu de passage d'un tourisme intense.

Figure 4
Implantation des profils trajectographiques et localisation des écrans de filets.

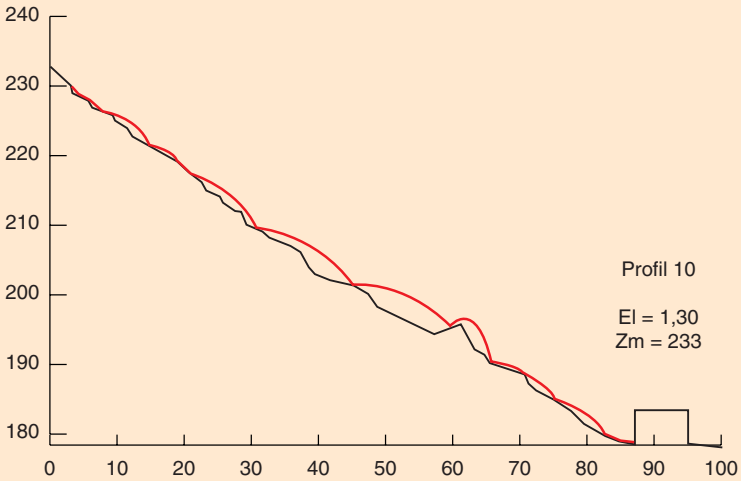
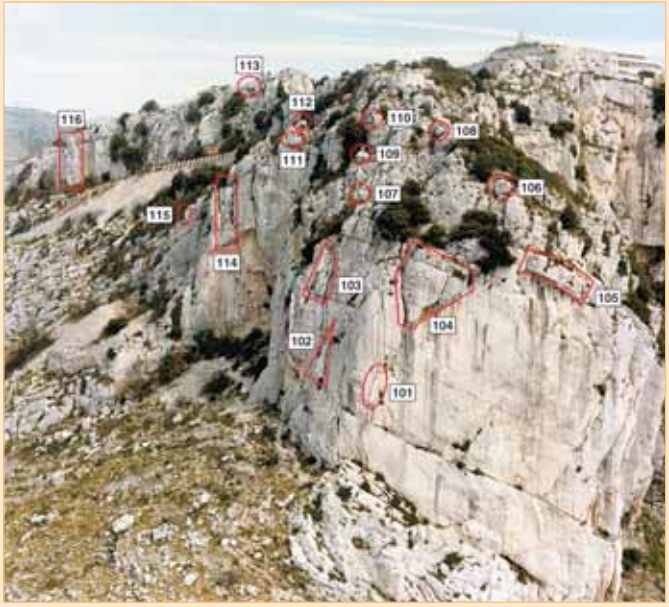


Figure 5
Analyse de propagation.

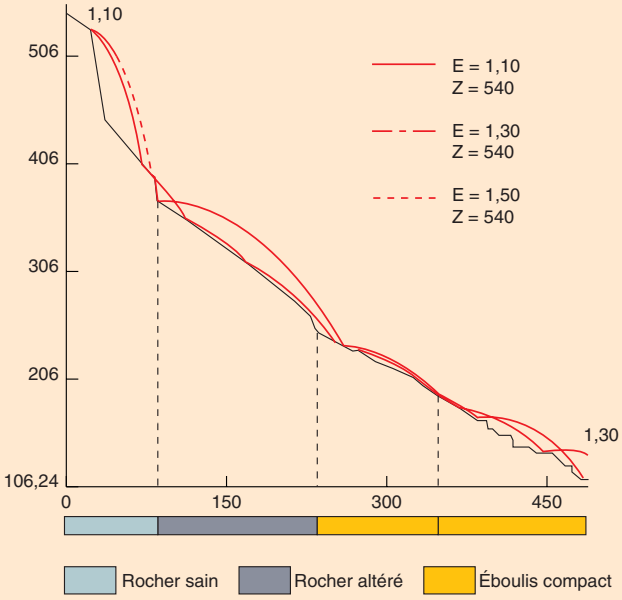
LRPC de Nice



Vue de la falaise avec repérage des blocs instables.

Vue de détail d'écailles instables inspectées avec des moyens d'alpinisme.

Vue de la zone habitée exposée (au deuxième plan, à gauche, l'hôpital de Monaco).



Exemple de simulation de propagation de bloc depuis la Tête de Chien (profil 11, élancement 1.30, altitude de départ 530 m NGF).

Tableau d'inventaire des blocs instables et de détermination du type de parade.

TETE DE CHIEN - INVENTAIRE DES BLOCS ESTIMES INSTABLES (V>1m3) ET FAISABILITE PARADES

N°	Hauteur	Largeur	Epaisseur	Volume (m3)	Nombre de blocs	Poids (t) (d = 2,7)	Niveau d'aléa	Type de parade active	Photo ens. n°	Profil trajecto. n°	Vitesse Vi	Vitesse Vr	Energie (KJ) Ei	Energie (KJ) Er	Ecran haute capacité 5000 KJ	Estimation* coût des confortements + solution écran 5000 KJ	Piège à blocs capacité maximum 180 000 KJ	Estimation* coût des confortements + solution piège à blocs 180 000 KJ
59	2,00	1,00	0,60	1,20		3,24	F	C	1	1	28	21	1270	714	oui		oui	
58	1,50	1,50	0,80	1,80		4,86	F	C	1	1	28	21	1905	1072	oui		oui	
60	1,50	1,20	1,00	1,80		4,86	E	C	1	1	28	21	1905	1072	oui		oui	
56	1,30	2,00	1,00	2,60	Plus.	7,02	M	C	1	1	28	21	2752	1548	oui		oui	
61	2,50	2,00	0,60	3,00		8,10	M	C	1	1	28	21	3175	1786	oui		oui	
54	2,50	2,00	1,00	5,00		13,50	M	C	1	1	28	21	5292	2977		5 000,00 F	oui	
62	2,00	2,00	1,50	6,00		16,20	M	C	1	1	28	21	6350	3572		6 000,00 F	oui	
65	4,00	2,50	0,60	6,00		16,20	E	C	1	1	28	21	6350	3572		6 000,00 F	oui	
55	2,50	2,50	1,00	6,30		17,01	M	C	1	1	28	21	6668	3751		6 300,00 F	oui	
66	3,00	2,50	1,00	7,50		20,25	M	C	1	1	28	21	7938	4465		7 500,00 F	oui	
53	7,00	2,50	0,50	8,80		23,76	F	C	1	1	28	21	9314	5239		8 800,00 F	oui	
64	4,00	2,00	1,20	9,60	Plus.	25,92	F à M	C	1	1	28	21	10161	5715		9 600,00 F	oui	
63	8,00	2,50	2,00	40,00	Plus.	108,00	M	C	1	1	28	21	42336	23814		40 000,00 F	oui	
57	4,00	4,00	4,00	64,00		172,80	E	C	1	1	28	21	67738	38102		64 000,00 F	oui	
69				1,00		2,70	M	C	8	1,2	39	28	2001	1058	oui		oui	
70	2,00	1,20	0,70	1,70		4,59	M à E	C	8	1,2	39	28	3402	1799	oui		oui	
47	1,00	2,20	0,80	1,80		4,86	M	C	8	1,2	39	28	3602	1905	oui		oui	
48				2,00	Plus.	5,40	M à E	FP	8	1,2	39	28	4002	2117	oui		oui	
52	3,00	1,00	0,80	2,40		6,48	M	C	8	1,2	39	28	4802	2540	oui		oui	
46	2,00	1,50	1,00	3,00		8,10	F	C	5	1,2	39	28	6003	3175		3 000,00 F	oui	
67	2,50	1,80	1,00	4,50		12,15	E	C	8	1,2	39	28	9005	4763		4 500,00 F	oui	
45				5,00	4	13,50	E	C	5	1,2	39	28	10005	5292		5 000,00 F	oui	
68	2,50	3,00	1,00	7,50		20,25	E	C	8	1,2	39	28	15008	7938		7 500,00 F	oui	
49	5,00	2,50	1,00	12,50		33,75	M	C	8	1,2	39	28	25013	13230		12 500,00 F	oui	
44	3,00	3,00	2,00	18,00		48,60	F	C + FP	5	1,2	39	28	36019	19051		18 000,00 F	oui	
50	7,00	3,00	2,00	42,00		113,40	E	C	8	1,2	39	28	84044	44453		42 000,00 F	oui	

Fiche de cas : La Tête de Chien (06)

Alpes-Maritimes et Principauté de Monaco
Étude de faisabilité des parades contre les éboulements

Cette étude de faisabilité a pour but :

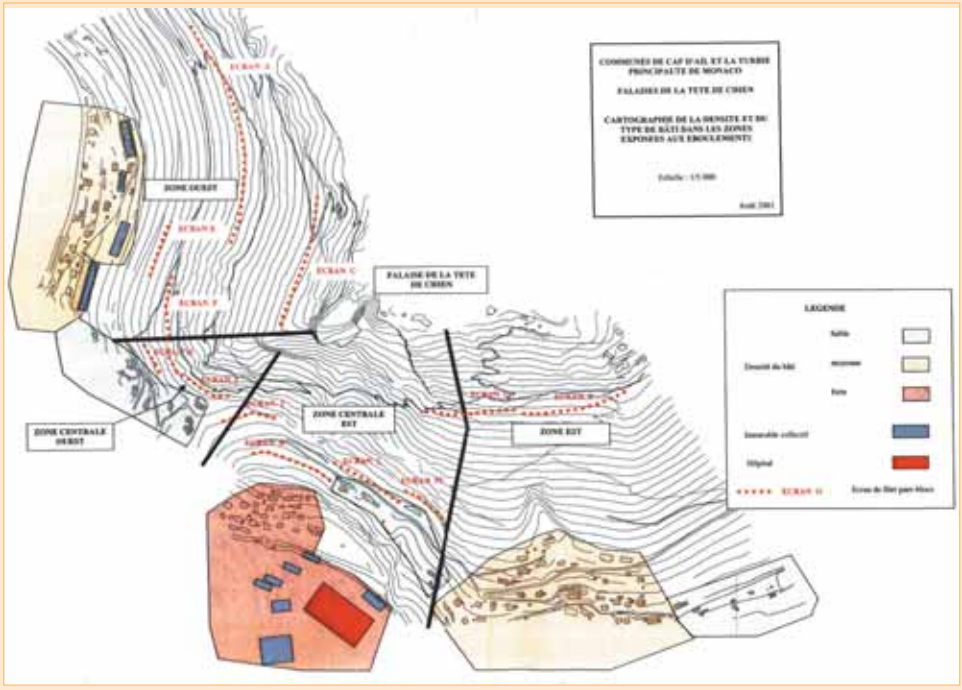
- d'évaluer l'aléa éboulement (repérage et dimensions des blocs instables),
- d'évaluer la faisabilité et le positionnement des parades envisageables,
- de proposer une programmation des travaux en fonction de la vulnérabilité.

Cette étude s'appuie sur :

- un inventaire des blocs instables (V > 1 m^3) à l'aide d'une photo-interprétation des photos stéréoscopiques du plan de falaise et de moyens d'alpinisme,
- un plan topographique à l'échelle du 1/1 000,
- une simulation des propagations des chutes de blocs (logiciel « Propag » des LRPC).

Cette étude propose des parades actives (confortement en falaise) et des parades passives (écrans pare-blocs ou piège à blocs) sous forme de deux variantes. Le nombre de blocs à conforter (très sensiblement différent selon la variante envisagée), dépassant la capacité d'arrêt des parades passives, a été déterminé (*cf.* exemple de tableau) à l'aide des énergies calculées grâce à la simulation.

Implantation des écrans pare-blocs ou de la variante piège à blocs.



Plan d'implantation des parades passives et de la vulnérabilité du site exposé.

Chapitre 7

Glossaire. Bibliographie

Glossaire

Les définitions ci-après précisent les termes couramment utilisés dans le cercle des praticiens français de l'ingénierie des risques rocheux. Il est à remarquer qu'elles débordent couramment les définitions du dictionnaire, sans jamais les contredire.

Aléa (ou aléa résultant, en anglais « hazard »)

De façon générale, désigne un évènement incertain, pouvant être dangereux, susceptible de se produire au cours de l'évolution d'un phénomène affectant un ouvrage ou un site.

Dans le contexte de prise en compte d'un risque rocheux, c'est la résultante des composantes aléa d'écroulement et aléa de propagation.

Aléa d'écroulement (ou de départ, de rupture, d'arrachement)

Désigne le compartiment de terrain susceptible de s'écrouler et l'événement correspondant à sa rupture.

Aléa de propagation

Recouvre toute la problématique de la zone couverte par le cheminement et la limite de la zone d'atteinte des blocs issus de l'écroulement.

Caractérisation de l'aléa

À partir des données de la couche sources, mise en œuvre des techniques constituant la couche évaluation jusqu'à l'étape de qualification de l'aléa.

Classe d'instabilité

Par référence à une échelle conventionnelle, volume des matériaux mis en jeu lors de la phase d'écroulement et volume unitaire des blocs produits.

Compartiment

Portion de falaise limitée par un agencement structurel et qui est susceptible de se détacher en une seule fois.

Couche d'information

Désigne un thème de renseignements (sources) ou de synthèse (évaluation) nécessaires à la caractérisation des aléas.

Couche source

Couche d'information alimentée par l'exploitation et l'interprétation de l'ensemble de la documentation existante et aboutissant à identifier des secteurs à caractéristiques géologiques et géomorphologiques homogènes.

Couche évaluation

Couche d'information faisant la synthèse des éléments des couches sources et des éléments issus des investigations de terrain. La couche évaluation permet la définition des objets d'étude élémentaires (ou compartiments) candidats à la phase de qualification des aléas.

Danger

Notion générale concernant plus particulièrement les personnes et les lieux susceptibles d'accueillir du public. Le degré de danger est fonction de la probabilité d'atteinte d'un enjeu donné par un bloc.

Zone de danger

Périmètre exposé à des aléas.

Éboulement

Le terme éboulement est pris dans un sens plus large que l'écroulement, incluant ce dernier et la phase dynamique de propagation des matériaux.

Écroulement

Processus final d'instabilité qui aboutit à la phase dynamique de la propagation des matériaux. Ce terme est ici utilisé sans référence à une notion de volume.

Événement

Éboulement, partiellement ou totalement réalisé, localisé dans l'espace et dans le temps.

Événement de référence

Événement historique s'étant produit sur un site ou à proximité immédiate, faisant référence pour les volumes à prendre en compte.

Intensité

Pouvoir destructeur d'un événement. Dans le cas d'éboulements rocheux, elle peut être caractérisée par l'énergie totale des blocs, exprimée sous la forme d'énergie cinétique (translation et rotation) ; elle est évaluée par prise en compte de la classe d'instabilité et des conditions de propagation de l'éboulement.

Orthophotographie

Image photographique sur laquelle les déformations dues au relief et à l'inclinaison de l'axe de prise de vue ont été corrigées.

Orthophotoplan

Plan obtenu par assemblage d'orthophotographies. Un orthophotoplan est donc un document métrique, rigoureusement superposable à une carte topographique, représenté dans le même système géodésique et pouvant être utilisé à différentes échelles.

Phénomène

Mouvement de terrain potentiel ou avéré.

Photogrammétrie (lever aérophotogrammétrique = lever photoaérien)

Ensemble des opérations allant de la prise de vues aériennes d'un terrain à la représentation cartographique d'une zone de ce terrain à partir de ces prises de vues.

Probabilité/délai d'occurrence

Notions qualitatives indissociables ayant pour objet de caractériser la probabilité d'occurrence d'un écroulement dans un laps de temps donné.

La probabilité est estimée de manière qualitative à partir d'une appréciation de la dynamique de régression de la stabilité.

Qualification

Opération qui consiste à caractériser l'aléa par l'évaluation de ses deux composantes, classe et probabilité/délai. Pour une même zone coexistent généralement plusieurs classes différentes d'aléas d'écroulement (chute de pierres ou de blocs, éboulement en masse) associés à des probabilités/délais différents, la qualification étant différente pour chaque classe.

Risque

Concept résultant du croisement de l'aléa (d'écroulement et de propagation) et de la vulnérabilité des enjeux présents sur le site.

Stéréopréparation

Détermination sur le terrain, en X,Y,Z, de points identifiables sur les photos pour permettre l'observation et le calcul de l'aéro-triangulation. En fonction de la configuration du chantier, la densité peut varier de deux points par photo à un point pour quatre à six clichés. Dans la majorité des cas, la position de ces points est déterminée par la méthode GPS en mode différentiel. Leur position peut également être mesurée sur des documents existants (fonds de plans, base de données topographiques).

Vulnérabilité

Définie par rapport à un phénomène donné et à un élément exposé (enjeu), elle désigne l'étendue des dommages, éventuellement chiffrés, que peut causer ce phénomène.

Bibliographie

Éboulements et chutes de pierres sur les routes : méthodes de cartographie, Rapport de recherche LCPC n° 80, **1978**, 63 p.

ROCHET L., Protection contre les éboulements rocheux, Méthodologie des études spécifiques, Application à la zone de la Praz sur la ligne SNCF Culoz-Modane, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **106**, **1980**.

Équipements de protection contre les éboulements rocheux. Terminologie. Norme AFNOR P95-307, **1996**, 8 p.

Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) - Guide général. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement - Ministère de l'équipement, des transports et du logement. *La Documentation Française*, Paris, ISBN 2-11-003751-2, **1997**.

Plans de prévention des risques naturels (PPR) - Risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement - Ministère de l'équipement, des transports et du logement, *La Documentation Française*, Paris, ISBN 2-11-004354-7, **1999**, 71 p.

L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Collection Environnement, Les Risques Naturels, LCPC, Paris, ISBN 2-7208-3800-4, **1999**, 128 p.

Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Collection Environnement, Les Risques Naturels, LCPC-CFGI, Paris, ISBN 2-7208-5001-8, **2000**, 90 p.

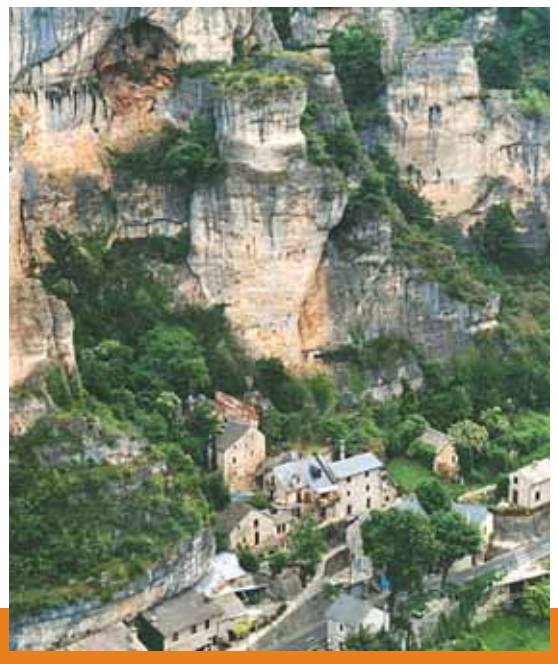
EFFENDIANTZ L., ROCHET L., Suivi d'une instabilité rocheuse jusqu'à l'éboulement. Commune de La Perrière (Savoie), *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **226**, **2000**, pp. 47-56.

Parades contre les instabilités rocheuses, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Collection Environnement, Les Risques Naturels, LCPC, Paris, ISBN 2-7208-3103-4, **2001**, 143 p.

PAULY J.-C., PAYANI M., Méthodologies mises en œuvre pour la cartographie de l'aléa lié aux instabilités rocheuses sur un bassin cartographique. Cas des gorges du Tarn et de la Jonte (Lozère), *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, **236**, **2002**, pp. 37-57.

Norme NF P 95-307, *Équipements de protection contre les éboulements rocheux - Terminologie*, 1996.

Document publié par le LCPC sous le numéro J1050363
Conception et réalisation LCPC-IST, Marie-Christine Pautré
Dessins LCPC-IST, Philippe Caquelard
Impression Jouve - N°
Dépôt légal 2e trimestre 2004



Ce guide présente la méthodologie d'étude du risque rocheux sur un site ponctuel ou d'étendue limitée. Il comprend la description, l'analyse et la caractérisation de l'aléa de départ (instabilité de falaise) et de la propagation sur le versant.

Le document présente de manière concrète la méthodologie, les approches et les outils utilisés, ainsi que le mode de présentation des observations et des résultats. Les diverses données à collecter, historiques, géologiques, morphologiques, etc., font l'objet d'un inventaire détaillé.

La mise en œuvre de cette méthodologie est présentée à travers plusieurs études de cas.

This guide presents the methodology employed to assess the risk of rockfalls on various-sized sites. This approach does not necessarily focus on hazard mapping, but rather entails specific studies relative to a given site and includes the initial hazard (cliff instability) and its eventual propagation.

The document provides a practical description of this methodology, along with the approaches and tools used plus the mode for displaying relevant observations and results. The various data (relating to past events, geology, morphology, etc.) to be collected are explained in detail.

A number of examples on different sites are also introduced.

Réf. : ALEABOUL
Prix : 21 € HT