

Méthodologies mises en œuvre pour la cartographie de l'aléa lié aux instabilités rocheuses sur un bassin géographique

Cas des gorges du Tarn et de la Jonte (Lozère)

Jean-Claude PAULY

Michel PAYANY

Laboratoire régional des Ponts et Chaussées
d'Aix-en-Provence

RÉSUMÉ

Une série d'éboulements rocheux destructeurs survenus dans le département de la Lozère a conduit à concevoir un Plan de prévention des risques (PPR) de chutes de blocs sur le bassin géographique des gorges du Tarn et de la Jonte. L'ampleur de la surface concernée a nécessité une nouvelle approche et des méthodologies adaptées. L'approche choisie a consisté à identifier des secteurs géomorphologiquement homogènes, pour lesquels on obtiendrait, en terme de niveau d'aléa et de limite de propagation, un aléa résultant identique. Ce découpage a conduit à des ensembles de caractéristiques similaires ; en fonction des enjeux, des études détaillées représentatives de chaque ensemble ont été effectuées. Le travail a été réalisé par couches d'informations successives : couche source, sectorisation, couche évaluation, etc. Les résultats obtenus ont abouti à la qualification et à un zonage de l'ensemble des versants des gorges du Tarn et de la Jonte. Le zonage constitue le document de base pour élaborer la cartographie réglementaire du PPR.

DOMAINE : Géotechnique et risques naturels.

ABSTRACT

A series of destructive rockslides in France's Lozère department led to developing a Risk Prevention Plan (RPP) for rock falls throughout the geographical basin of the Tarn and Jonte Canyons. The magnitude of the surface involved necessitated a new approach along with adapted methodologies. The selected approach consisted of identifying geomorphologically homogeneous sectors for which an identical risk would be obtained in term of both hazard level and propagation limit. Thanks to this breakdown into sectors, groupings of similar characteristics could be assembled and pertinent detailed studies representative of every single group then conducted.

This work was carried out by means of successive information layers: source layer, sector-by-sector analysis, evaluation layer, etc.

The results obtained have given rise to the qualification and zoning of all flanks within the Tarn and Jonte Canyon basins. This zoning work constitutes the base document for performing RPP-related regulatory mapping.

FIELD : Geotechnical engineering and natural hazards.

Introduction

Les gorges du Tarn et de la Jonte forment un ensemble naturel remarquable et continu sur une longueur de 70 km au cœur de la région des Grands Causses (fig. 1).

Le Tarn et la Jonte ont entaillé vigoureusement des entablements de calcaires et de dolomies sur des hauteurs parfois supérieures à 500 m, donnant le plus souvent des versants formés par des superpositions de falaises, certaines dépassant la centaine de mètres de hauteur. Les parties ébouleuses des versants sont généralement couvertes de forêts de feuillus et de résineux (fig. 2).

Les plateaux des causses sont peu favorables à l'habitat : altitude élevée, températures rigoureuses l'hiver, aridité et rareté des sols, absence d'eau accessible depuis la surface. Les gorges constituent le seul lieu hospitalier de cette région. Dotées d'un habitat naturel abondant (grottes, baumes), d'un climat adouci par l'abri des versants, de l'eau des sources et de la rivière, elles ont très tôt attiré l'homme qui y a implanté de véritables villages et cultivé les banques édifiées dans les versants bien exposés.

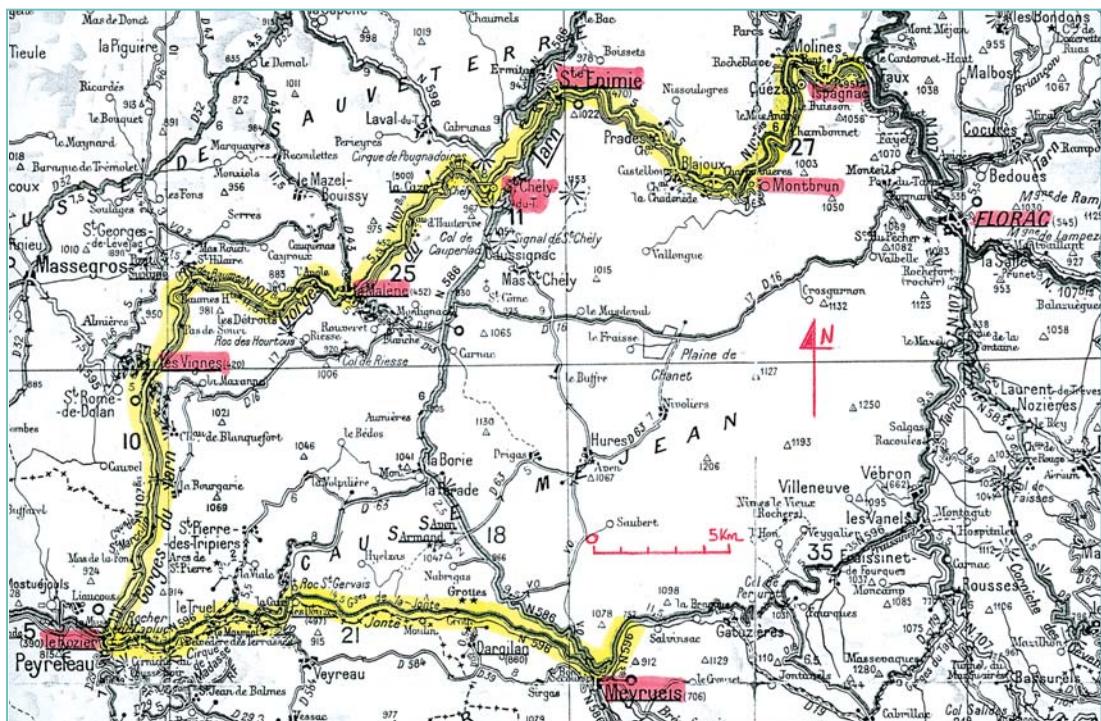


Fig. 1- Secteur d'étude des gorges du Tarn et de la Jonte (extrait de la carte Michelin à 1/200 000).



Fig. 2 - Paysage des gorges du Tarn (photographie du CETE Méditerranée).

Des routes longeant les gorges du Tarn et de la Jonte sont ouvertes respectivement en 1906 et 1909. Ce réseau principal, RD 907 bis pour le Tarn et RD 996 pour la Jonte, est complété par le réseau transversal beaucoup plus ancien.

Les principaux villages se sont implantés au droit de ces voies de communication qui traversaient la vallée : Sainte-Énimie, la Malène (lieu de traversée des transhumances), les Vignes, Meyrueis. Les villes, villages et hameaux sont peu peuplés comme le montre le tableau I.

TABLEAU I
Principales communes des gorges du Tarn et de la Jonte avec leur population

Ispagnac, Quézac et Molines (1 000 habitants)	Hauterives (< 100 habitants)
Montbrun (100 habitants)	la Malène (200 habitants)
Blajoux, la Chadenède (100 habitants)	les Vignes (100 habitants)
Castelbouc (< 100 habitants)	le Rozier-Peyreleau (200 habitants)
Prades (100 habitants)	le Truel-les Douzes (100 habitants)
Sainte-Énimie (500 habitants)	Meyrueis (1 100 habitants)
Saint-Chély-du-Tarn, Pougnadoires (100 habitants)	

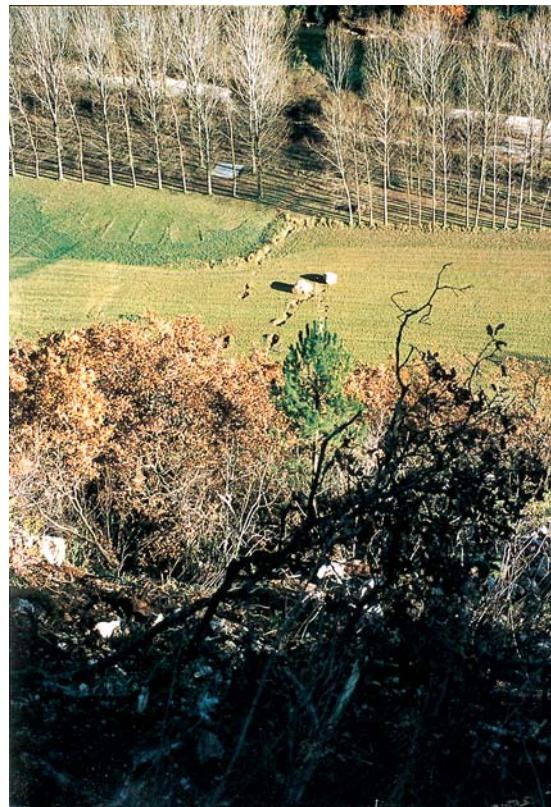
Aujourd’hui, la plupart des habitants des gorges vivent directement ou indirectement du tourisme avec un pic d’affluence record pendant les mois d’été. Il en résulte une pression foncière qui s’exerce fortement sur certains secteurs des gorges (demandes de construction, réhabilitation, extension, changements de destination) en matière d’habitations, campings, hôtels, gîtes ruraux, restaurants. Cette pression, associée au peu de disponibilité en matière de place du fait de la topographie, constraint les gestionnaires de l’espace (État et collectivités locales) à prendre en compte les risques naturels de manière attentive et systématique. Parmi ceux-ci, le risque d’écroulement, d’éboulement, de chutes de blocs et de pierres est présent partout avec une intensité variable.

Les chutes de pierres et de blocs sont assez fréquentes et les services de l’Équipement, chargés de l’entretien du réseau routier, dégagent couramment les routes, en particulier après les orages et en période de gel-dégel. Les écroulements en grande masse ou les chutes de blocs de fort volume sont plus rares mais des événements rapprochés dans le temps sont déjà survenus.

Ainsi, à Barjac, dans la vallée voisine du Lot, le 8 octobre 1995, un éboulement de 250 à 350 m³ atteignait la zone bâtie du quartier des Boutarottes, causant la mort d’un habitant lors de l’écroulement de sa maison et entraînant des dégâts matériels à deux autres habitations. Un peu plus tard, le 19 novembre 1995, un volume de 250 m³ de rochers se détachait d’une paroi dominant le hameau du Buisson (fig. 3),



Fig. 3 - Éboulement du 19 novembre 1995 au Buisson, commune de Quézac (photographies du CETE Méditerranée).



détruisant un hangar et se propageant, au-delà de la RD 907bis, jusque sur une zone de camping, sans faire de victime. Enfin, en janvier 1997, un bloc menaçant le village de Barre-des-Cévennes était détruit sur place.

Suite à ces différents événements, dramatiques pour certains, la Direction départementale de l'équipement (DDE) de la Lozère a provoqué une réflexion sur la problématique des phénomènes d'éboulement et de chutes de blocs. Elle a demandé au Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) Méditerranée, département Laboratoire régional des Ponts et Chaussées (LRPC), de faire une proposition d'intervention pour la réalisation d'un Plan de prévention des risques naturels géologiques (PPR) sur le territoire des gorges du Tarn et de la Jonte.

Devant les enjeux importants liés à la prise en compte de ces risques d'éboulement tant sur le plan opérationnel que méthodologique, les ministères de l'Équipement et de l'Environnement ont décidé de créer un comité technique de suivi de cette étude, destinée à devenir une étude de référence.

Ce comité est composé de représentants des services suivants :

- Direction de la prévention des pollutions et des risques (DPPR)
- Direction de l'aménagement foncier et de l'urbanisme (DAFU)
- Direction départementale de l'équipement de la Lozère (DDE 48)
- Institut national de l'environnement industriel et des risques (INERIS)
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)
- Centres d'études techniques de l'équipement Rhône-Alpes et Méditerranée.

Méthodologie

Le besoin d'un PPR dans les gorges du Tarn et de la Jonte portant sur le phénomène des chutes de blocs a conduit à mettre au point une méthodologie propre à un tel bassin géographique.

Cette méthodologie, qui s'est appuyée sur des pratiques et une expérience de plus de vingt ans dans ce domaine très « incertain », a permis de traiter 130 km de versants de 400 m de dénivellation moyenne.

La finalité était, au travers de la caractérisation de l'aléa de rupture et de l'aléa de propagation, d'afficher un aléa résultant qui permette un zonage de type PPR (*cf.* § Qualification générale du site et zonage).

La démarche n'était pas celle d'une étude spécifique trop pénalisante en temps et en argent. L'approche choisie a consisté à identifier, dans les versants, des secteurs géomorphologiquement homogènes. Pour des aléas de rupture et de propagation similaires, l'objectif a été de parvenir à un aléa résultant identique en termes de niveau et d'extension spatiale. Les mêmes causes bien identifiées produisant, *a priori*, les mêmes effets pour les mêmes morphologies.

Une fois la sectorisation effectuée, il s'agissait de regrouper les secteurs similaires en éléments d'ensembles homogènes. Ensuite, en fonction des enjeux (villages, hameaux, campings, etc.), des éléments représentatifs de chaque ensemble ont été choisis comme zones d'études détaillées.

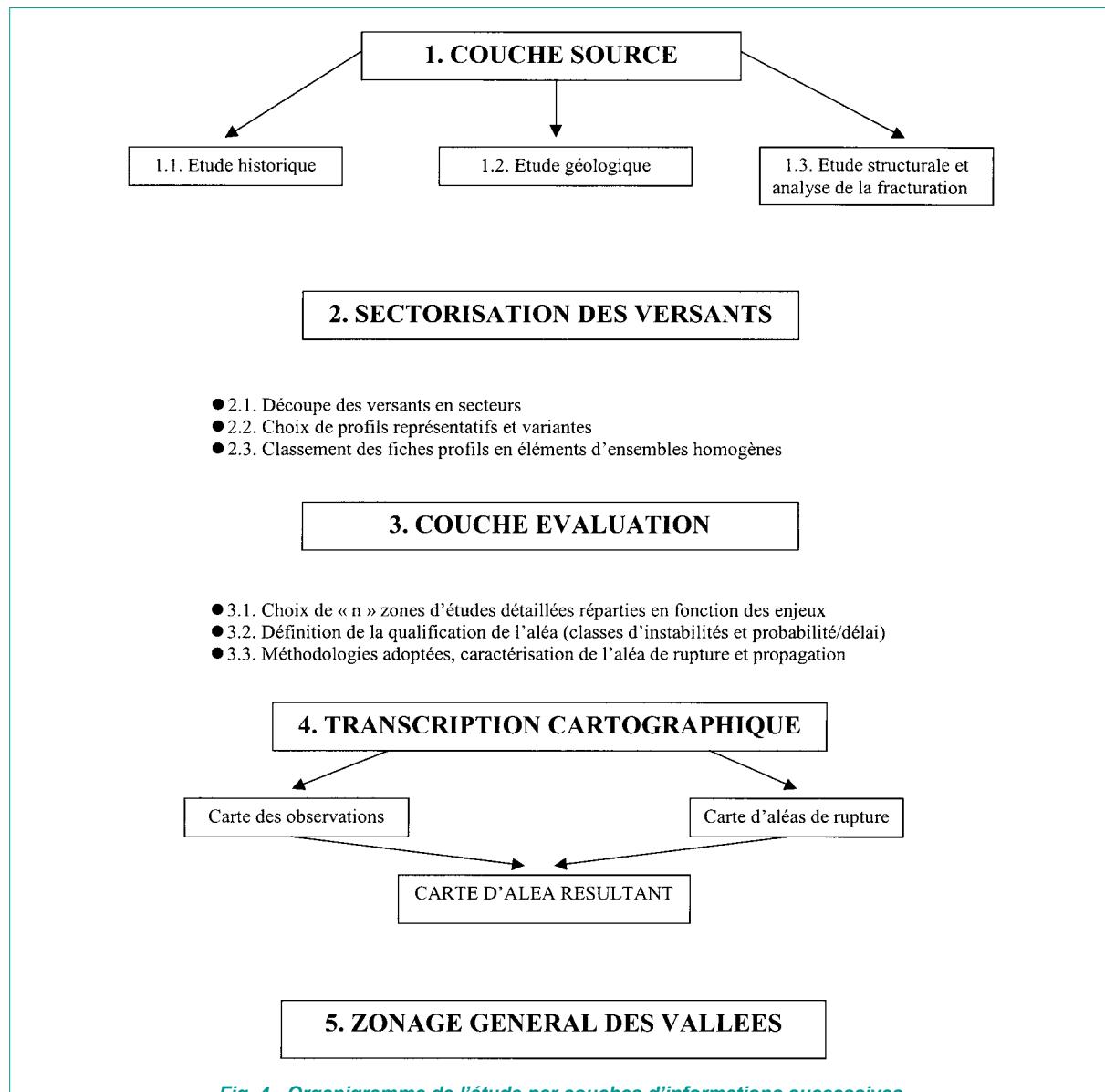
Les aléas de rupture et de propagation y ont été caractérisés ainsi que l'aléa résultant qui en découle. Ensuite, par analogie, les résultats des synthèses des études détaillées (cartes d'aléa résultant) ont été étendus aux éléments d'ensembles similaires, après vérification sur photos obliques et/ou sur le terrain.

Le travail a été réalisé par couches d'informations successives selon l'organigramme détaillé sur la figure 4.

Les éléments disponibles pour la réalisation de cette étude sont :

- ① les fonds topographiques à 1/10 000, agrandissement du 1/25 000,
- ② les prises de vues verticales de l'Institut géographique national de 1956, 1977, 1983 et 1994,
- ③ les cartes géologiques à 1/50 000 (Florac, Meyrueis, Séverac-le-Château et Saint-Beauzély),
- ④ les prises de vues aériennes verticales sur émulsion panchromatique d'octobre 1998 à l'échelle moyenne du 1/15 000 (clichés 228 × 228 mm),
- ⑤ les prises de vues obliques stéréoscopiques panchromatiques (clichés 130 × 180 mm),
- ⑥ les plans photogrammétriques à 1/5 000 des sites à enjeux sur une surface d'environ 2 500 hectares,
- ⑦ diverses études du CETE Méditerranée dans les gorges du Tarn et de la Jonte (études spécifiques de certains sites comprenant des analyses de propagation des blocs).

Les points ④, ⑤ et ⑥ ont été réalisés spécifiquement pour cette étude ; les prises de vues aériennes (points ④ et ⑤) en début d'opération, les restitutions à 1/5 000 (point ⑥) une fois la sectorisation des vallées effectuée et les secteurs d'études détaillées choisis.



La couche source

Alimentée par l'exploitation et l'interprétation de l'ensemble des documents existants, la couche source a servi à l'élaboration du découpage en secteurs homogènes. Elle comprend les volets d'études suivants.

Le recensement des phénomènes historiques

Il comprend les événements historiques *stricto sensu*, les relevés effectués par les services de l'État et les collectivités locales ainsi que les éboulements anciens localisés sur les photographies aériennes verticales et obliques.

Le recensement des phénomènes historiques a été réalisé en contactant les organismes suivants :

- Direction départementale de l'équipement et ses subdivisions territoriales.
- Mairies.

- Archives départementales.
- Services du conseil général.
- Gendarmerie nationale.
- Historiens, associations locales, musées.
- Mémoire ancestrale au travers des témoignages recueillis sur le terrain *.

Toutes les informations collectées ont été croisées dans la mesure du possible avec la presse locale conservée aux Archives départementales. Les études déjà réalisées dans le site ont également été prises en compte.

Dans le cadre géographique défini, les résultats de l'étude historique sont un peu décevants. Ce n'est pas vraiment une surprise dans la mesure où les mouvements de populations dans les gorges du Tarn et de la Jonte étaient uniquement transversaux jusqu'à la création des routes de fond de vallée vers 1906 pour le Tarn et 1909 pour la Jonte. Cet état de fait a longtemps limité la connaissance des événements à l'environnement des seuls villages ou à des événements très importants qui ont pu marquer les mémoires.

Les informations, *a priori* les plus complètes, concernent les routes départementales. Elles sont en majorité récentes (1990/1999) et ont été fournies par la Direction départementale de l'Équipement (subdivisions de l'Équipement). Elles correspondent, pour cette période, à une sensibilisation plus forte des services de l'Équipement face au phénomène des mouvements de terrain.

■ **La recherche a également porté sur les documents écrits.** Des éléments d'informations ont ainsi été trouvés dans :

- des guides et des monographies sur les gorges du Tarn et de la Jonte, en particulier le guide touristique Michelin (Gorges du Tarn, Cévennes, Languedoc) et le guide géologique régional (Causses, Cévennes, Aubrac) ;
- des études détaillées de certains sites des gorges (Molines, le Buisson, Montbrun, le Villaret, Prades, Sainte-Énimie, les Baumes, les Vignes, le Rozier, Meyrueis, etc.). Ces études sont parfois accompagnées d'analyses de propagation des blocs ;
- des légendes et récits traditionnels ayant trait aux particularités géographiques des gorges du Tarn et de la Jonte.

■ **Plusieurs récits traditionnels concernent les gorges du Tarn.** Certains ont pour origine un fait historique remanié, enluminé ou adapté au contexte, d'autres font référence à un cataclysme naturel, mais une continuité des faits reste présente.

Ainsi, au Pas-de-Souci, dans la légende de Sainte-Énimie, le grand chaos est au centre de la lutte qu'entreprit la sainte contre le Drac (le diable). La légende situe cet écroulement pendant la vie de la sainte, c'est-à-dire entre la fin du V^e et le début du VI^e siècles. Certains auteurs parlent de deux écroulements dont le plus récent serait lié à un tremblement de terre en 580 (relaté par Grégoire de Tours dans ses chroniques).

Un autre éboulement s'est produit au Pas-de-Souci au printemps de 1842 (A. Solannet). Un dernier, enfin, plus modeste s'est produit en rive gauche pendant le déroulement de cette étude.

■ **Parmi les événements plus récents,** le précieux livre d'Edouard-Alfred Martel : « *Les Causses Majeurs – Gorges du Tarn et Cévennes – Canyons et Ruiniformes – Abîmes et Cavernes – Rivières souterraines et Résurgences* », décrit les lieux visités avec un réalisme et une précision remarquables.

L'auteur cite un certain nombre d'événements qu'il constate ou dont il entend parler, entre autres :

- « ...le village (Pougnadoires) s'adosse aux pilastres de roches rouges trouées, qui, quelque jour, tomberont sur lui » (page 65),
- « À l'aval de Hauterives, un énorme éboulement torrentiel de ravine... a jeté un sinistre cône de déjection de 100 mètres de hauteur, coupant le chemin et détruisant les vignes » (page 71),
- « ...sous le plus grandiose et effrayant surplomb de toute la gorge : le hameau des Baumes Vieilles... y fut submergé par l'inondation de 1875, abandonné, puis écrasé par des blocs... » (page 86),
- « Avant Gaujac, un éboulement a coupé le sentier... » (page 95),

* Une partie de l'étude historique a été confiée à une étudiante en ethnologie de la faculté de Montpellier.

➤ « ...en 1912, une chute de rocs, entre les Baumes Basses et Pas-de-Souci tua deux chevaux. En août 1932, un gros roc, détaché du causse de Sauveterre, provoqua une avalanche à la Bessière, au-dessus de Molines-Rocheblave » (page 102),

➤ « ...le pied oriental du Vase de Sèvres... présente des plaques décollées par le gel, soleil, pluie et vent ; ces esquilles sont détachées lentement par une sorte de desquamation ou décortication des surfaces rocheuses. Parmi tous les causses s'observe souvent le même processus particulier de dénudation » (page 265).

■ **Le recensement des phénomènes historiques a été complété par un relevé des éboulements repérés sur les photographies obliques.** Ce relevé paraît plus intéressant, même s'il est impossible de dater les événements et très difficile de situer les zones de départ.

Une analyse en retour de traces de mouvements détectés soit en photo-interprétation, soit sur le terrain a permis de réaliser une première approche des phénomènes de propagation qui a servi dans les phases ultérieures.

Ces informations ont été reportées sur des planches à l'échelle du 10 000° (fig. 5).

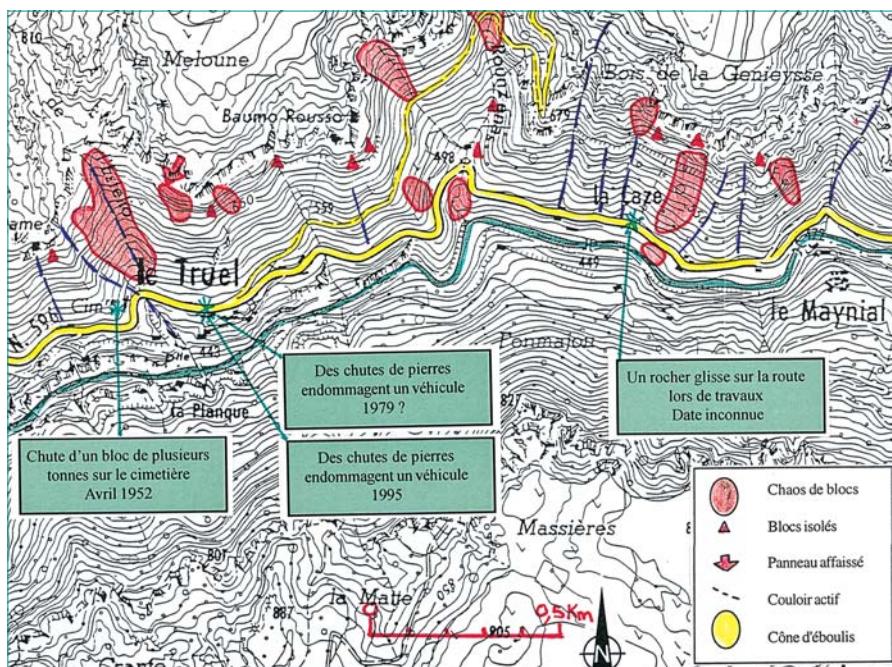


Fig. 5 - Extrait du relevé des manifestations d'instabilité. Secteur du Truel dans les gorges de la Jonte.

L'étude géologique

Elle permet de définir les grandes unités géologiques et de caractériser les faciès du bassin géographique. Des schémas stratigraphiques type et des fiches de faciès peuvent ainsi être représentés pour chaque grande unité géologique (fig. 6).

Les gorges du Tarn et de la Jonte font partie, avec les gorges de Fraissinet et du Tarnon, d'un ensemble d'érosion délimitant un très vaste plateau calcaire nommé causse Méjan. Cet entablement se situe entre les cotes 900 et 1 100 m NGF tandis que les rivières coulent en moyenne 500 m plus bas.

Histoire géomorphologique

L'histoire géologique des Grands Causses commence à l'Hettangien lorsque les dépôts marins se généralisent sur cette région. Pendant tout le Jurassique ensuite, le secteur des Grands Causses fonctionne comme un fossé de direction sub-méridienne entre les hauts fonds ou les reliefs faiblement émergés des Cévennes à l'est et du Rouergue cristallin à l'ouest.

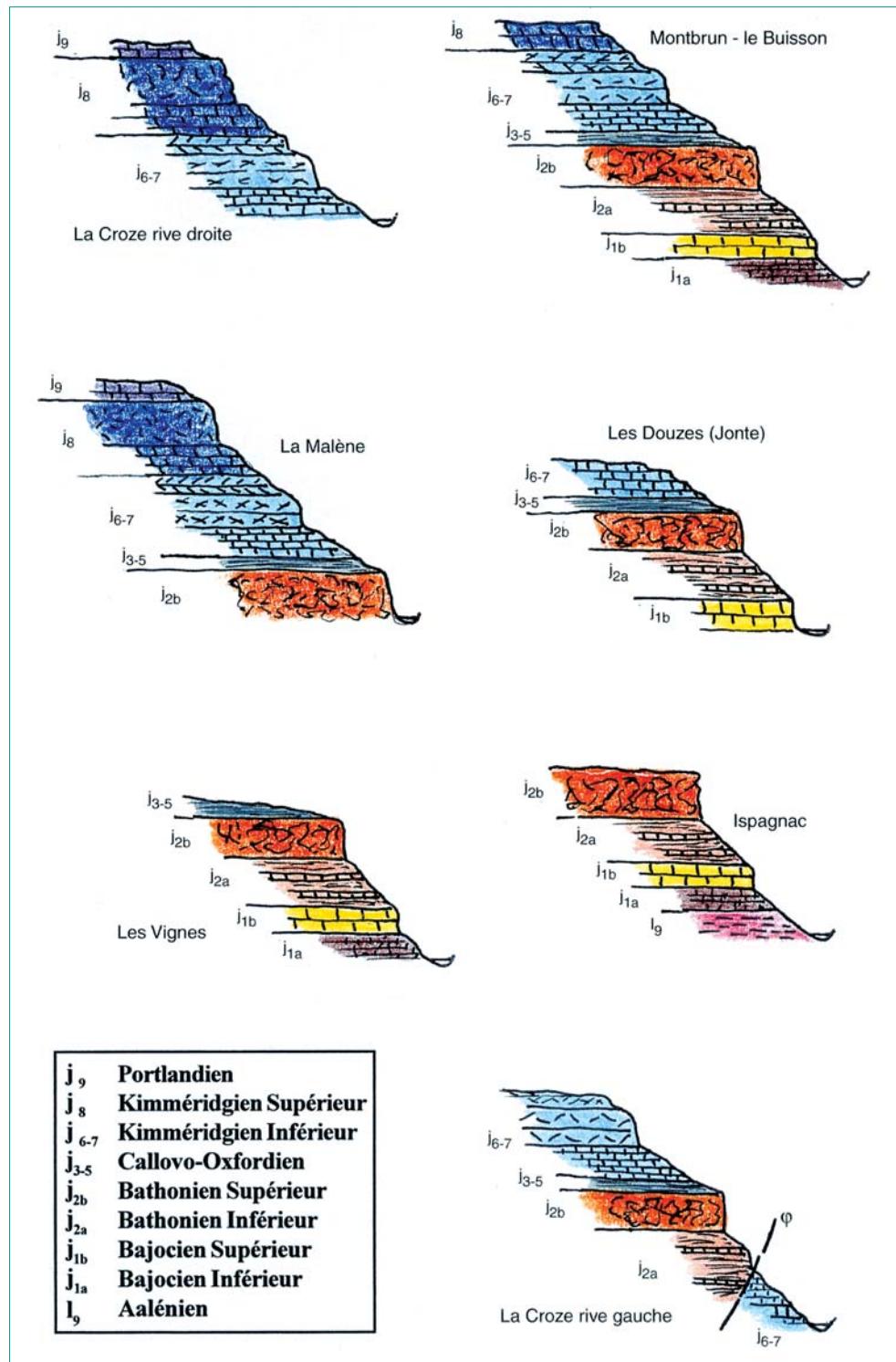


Fig. 6 - Exemples de schémas stratigraphiques des versants des gorges du Tarn et de la Jonte.

Plusieurs failles bordières ont joué au cours de la sédimentation, notamment pendant le Dogger, mais les puissances croissantes des dépôts dans l'axe du fossé résultent surtout de la subsidence dans cette direction (on estime à 1 500 m l'épaisseur des terrains post-hercyniens déposés avant la régression du Jurassique terminal).

La phase de dépôt se termine au Crétacé par le jeu vertical des fractures rattachées aux phases orogéniques pyrénéenne et alpine.

Pendant tout le Crétacé et le Tertiaire, se produit un aplatissement de la surface des causses depuis la cote 1 100 m à l'est, jusqu'à la cote 900 m à l'ouest.

À la fin du Miocène, après le rejet des failles nord-sud et un soulèvement cévenol (phase orogénique *pontienne*), le réseau hydrographique actuel commence à se dessiner franchement avec l'ébauche de la vallée du Tarn comme axe principal de drainage. L'activité karstique souterraine se développe au Pliocène et au Villafranchien pour donner cette morphologie caractéristique des causses (dolines, plaines karstiques, poljés, vallées suspendues, etc.).

De façon très brutale, le creusement des vallées s'est poursuivi jusqu'à donner les canyons actuels à plus de 500 m au-dessous de la surface d'érosion du causse. Ce creusement a entraîné l'enfoncement des eaux superficielles dans le calcaire jusqu'au fond des canyons servant de niveau de base karstique. C'est cette « réactivation » du réseau karstique qui a donné naissance aux innombrables grottes, avens, dolines et cavités de toutes sortes visibles sur le causse Méjan et sur les flancs du Tarn et de la Jonte.

Le Tarn, dans son parcours caussenard, ne reçoit aucun affluent à ciel ouvert. Il est alimenté par une quarantaine de résurgences provenant des causses de Sauveterre et Méjan. La Jonte présente des caractéristiques similaires, elle disparaît même en aval de Meyrueis (moulin du Capelan) pour resurgir en amont des Douzes.

Contexte lithostratigraphique

Les dépôts sédimentaires que l'on observe sur les versants du Tarn et de la Jonte sont tous carbonatés : calcaires et dolomies. Les argiles et marnes sont très rares et très peu épaisses, à l'exception du Toarcien-Domérien dans le secteur d'Ispagnac.

Les calcaires se présentent soit en masses épaisses à la stratification peu marquée, soit en gros bancs plurimétriques, ou enfin en bancs décimétriques à métriques. L'évolution des faciès est parfois très sensible, en particulier d'est en ouest.

Les dolomies se rencontrent sous deux formes principales : massive et cristalline au Bajocien supérieur, ruiniforme au Bathonien Supérieur et au Kimméridgien Supérieur

Des zones de dolomitisation secondaire, plus ou moins étendues, envahissent parfois les calcaires.

Étude structurale et analyse de fracturation

C'est un élément très important de la compréhension des phénomènes de chutes de blocs. Il s'analyse selon les besoins et les moyens à différentes échelles (de l'image spot à 1/100 000 à la prise de vue verticale à 1/25 000 ou à 1/15 000).

Par ce moyen, on dégage à différentes échelles les principales lignes de discontinuités qui, seules ou conjuguées, sont à l'origine des différents modes de rupture et des volumes unitaires à prendre en compte. Ce travail a été enrichi grâce aux prises de vues obliques réalisées sur l'ensemble des versants.

L'analyse photo-interprétative des gorges du Tarn et de la Jonte a été effectuée par le LCPC et par le LRPC d'Aix-en-Provence (fig. 7). Elle a été réalisée à petite échelle tout d'abord sur l'ensemble de la région des gorges à partir de l'image Spot à 1/100 000, à moyenne échelle ensuite (1/25 000) sur un secteur des gorges du Tarn et un secteur des gorges de la Jonte (LCPC), puis de manière exhaustive sur l'ensemble des deux vallées (LRPC d'Aix-en-Provence).

De nombreuses autres missions aériennes couvrent le territoire d'étude depuis 1950. Parmi ces missions, quatre ont été choisies :

- mission n° 2339-2639 (Rieupeyroux-Florac) et 2340-2640 (Navacelles-Meyrueis) de 1956 à l'échelle du 25 000^e,
- mission 2878 de 1977 à l'échelle du 20 000^e,
- mission 3598 de 1983 à l'échelle du 17 000^e,
- mission FD 48 de 1994 à l'échelle du 25 000^e (couleurs).

La consultation de ces photos avait pour objet de permettre des observations stéréoscopiques multidiplinaires et multiéchelles.

Cette analyse n'a pas permis de dégager des informations pertinentes sur les périodes d'activité des cônes et couloirs d'éboulis. Ceci est essentiellement dû à la qualité très variable des photos et à l'éparpillement des zones couvertes.

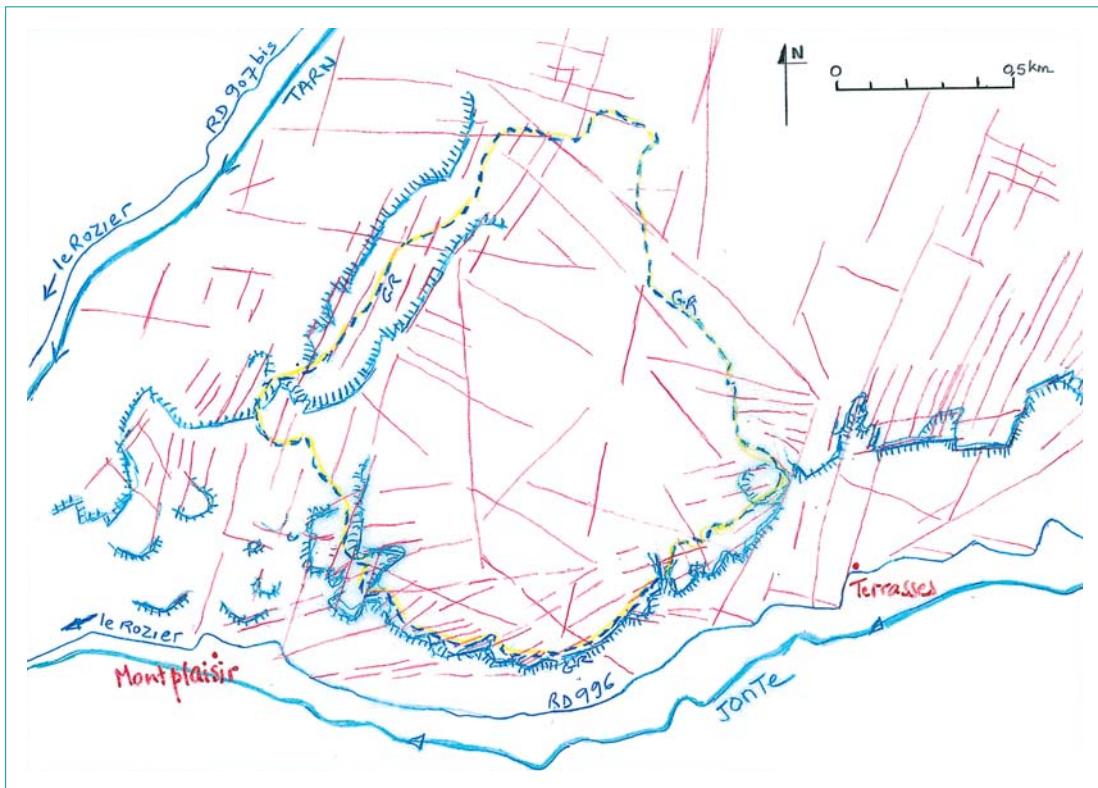


Fig. 7 - Exemple de photo-interprétation structurale mettant en évidence les réseaux de discontinuités (confluent du Tarn et de la Jonte).

Les photographies aériennes verticales à 1/15 000 (campagne spécifique de 1998) ont été utilisées en stéréoscopie pour l'analyse de la fracturation du massif et de certaines anomalies géologiques. L'échelle et la qualité des clichés se sont révélées correctes pour cet objectif.

En revanche, le manque de détails (échelle) et la présence, parfois, d'un versant non éclairé ou très boisé ont rapidement constitué un obstacle à l'utilisation de ces clichés pour localiser des traces d'éboulements anciens dans le versant.

Ces observations confirment la nécessité d'avoir *une couverture de prises de vue obliques stéréoscopiques* (recouvrement de 80 %) sur l'ensemble des versants.

Cette base photographique (plus de mille contacts) a été vitale pour l'étude. Elle a été exploitée dans le cadre du recensement des phénomènes historiques, de la photo-interprétation géologique et structurale, de la définition de la géomorphologie des versants et de l'échantillonnage des instabilités potentielles dans les études détaillées.

Le seul inconvénient est la disparité des échelles, qui rend incertaine toute évaluation des dimensions.

La sectorisation des versants

Sur la base de la couche source et des observations de terrains complémentaires, on a procédé à un découpage des versants en secteurs morphologiques, puis à leur regroupement en éléments d'ensembles présentant des caractéristiques similaires (géologique, morphologique, profils type, aléa de rupture et de propagation connu par le recensement historique, etc.). La méthode utilisée est décrite ci-après.

Découpage des versants en secteurs

Le découpage s'est effectué à partir de l'examen des photos obliques complété par une validation des limites et des profils sur le terrain. Chaque secteur est numéroté (pair rive droite, impair rive gauche). On a ainsi obtenu 186 secteurs.

Choix de profils en travers représentatifs et variantes

Un profil (et ses variantes) topo-géologique caractérise chaque secteur. À chaque profil, numéroté par son Point Routier (PR), est adjoint une photo oblique et un extrait du 10 000° le situant. Ces trois éléments constituent une fiche profil qui caractérise chacun des 186 secteurs des gorges du Tarn et de la Jonte (fig. 8).

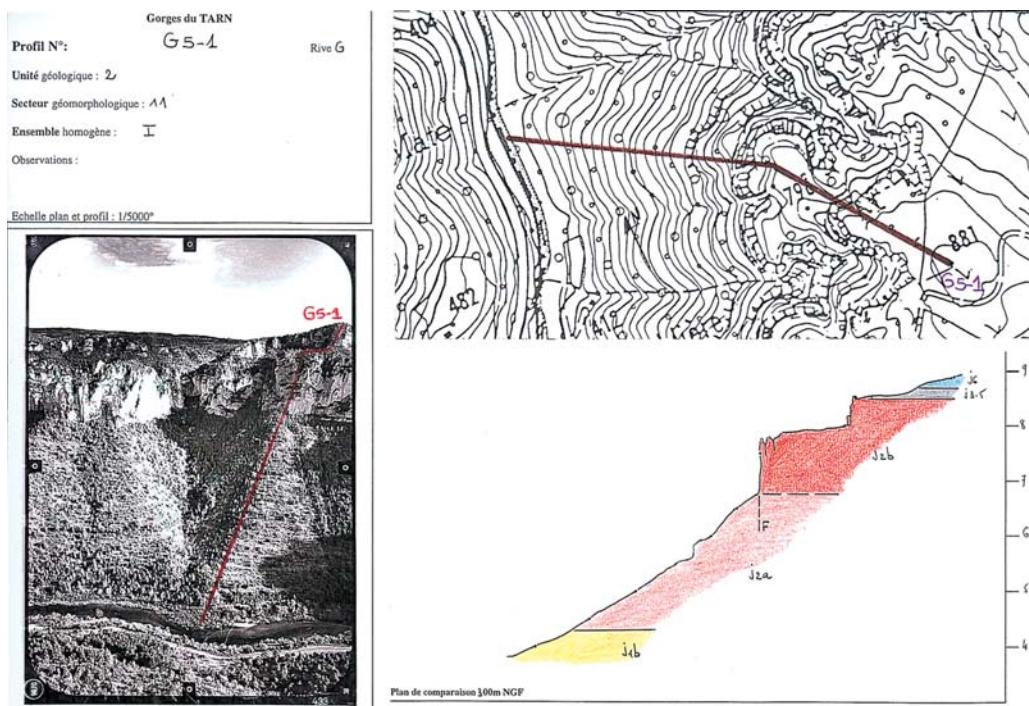


Fig. 8 - Exemple de fiche de profil topo-géologique.

Classement des fiches profils en ensembles homogènes

Cette opération de tri a permis de répartir les 186 secteurs en 90 éléments appartenant à 22 ensembles homogènes différents (fig. 9). Un élément peut concerter un secteur ou plusieurs secteurs contigus.

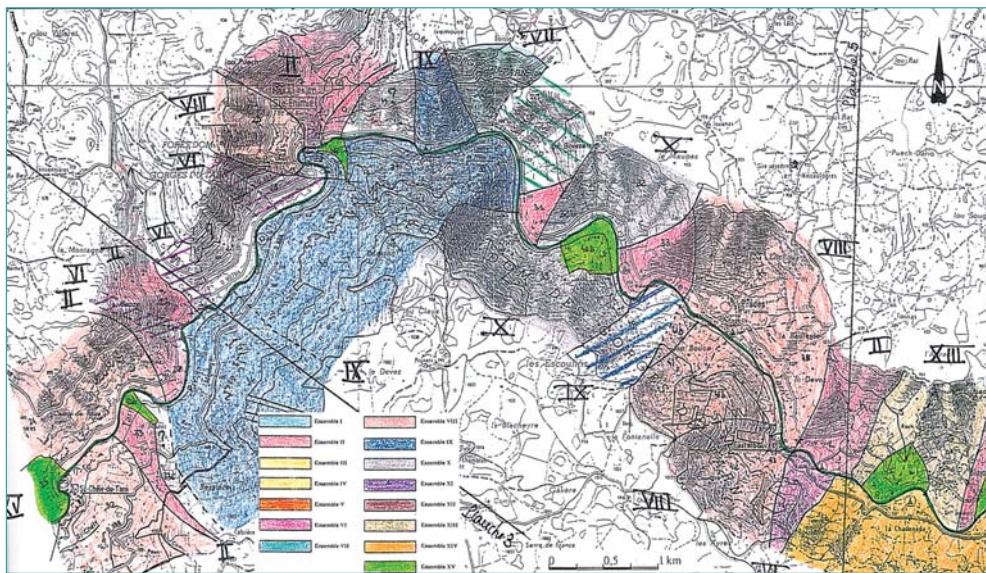


Fig. 9 - Carte de sectorisation en ensembles homogènes.

Remarque

La sectorisation des vallées aurait été réalisée plus efficacement si l'on avait disposé, dès le départ, de fonds topographiques adaptés à cette opération. En effet, un 5 000° en restitution photogrammétrique aurait permis d'automatiser la réalisation des profils topographiques, dans des zones géologiquement similaires, avec un pas systématique plus serré et, compte tenu de la précision, d'arriver à la sectorisation plus rapidement.

Couche évaluation

Qualification de l'aléa

La qualification de l'aléa fait intervenir deux composantes (*cf.* annexe I) :

- la classe d'instabilité : chutes de pierres (**cp**), chutes de blocs (**cb**), éboulement en masse limitée (**ebl**), éboulement en masse (**ebm**) et éboulement en grande masse (**ebgm**),
- la probabilité/délai qui définit les modalités d'occurrence temporelle selon une problématique décrite dans l'annexe I.

Choix des zones d'études détaillées

La sectorisation des versants a permis de regrouper les 186 secteurs en 90 éléments représentant 22 ensembles homogènes différents.

Le choix des secteurs représentatifs sur lesquels des études détaillées ont été réalisées s'est effectué en fonction des enjeux les plus élevés (villages, hameaux, camping). Les études détaillées portent ainsi sur 28 éléments d'ensembles similaires ou non (fig. 10).

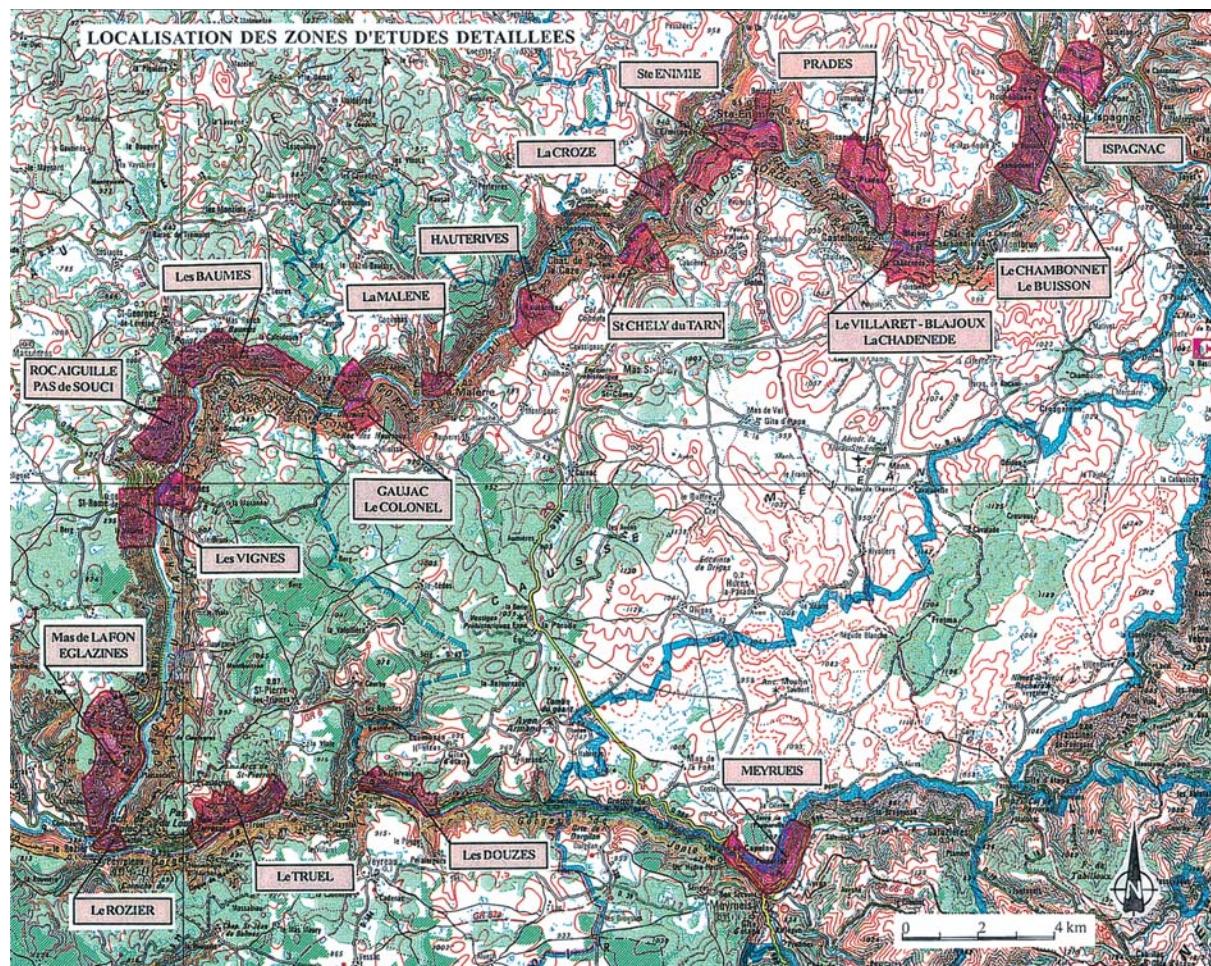


Fig. 10 - Localisation des secteurs d'études détaillées.

Dans les zones les plus sensibles, des restitutions photogrammétriques au 1/5 000 ont été effectuées (2 500 hectares) pour une meilleure localisation des éléments issus de la couche source et des observations de terrain et afin de pouvoir réaliser des profils de propagation.

Les autres zones ont été traitées à partir du 10 000^e, agrandissement du 25 000^e.

Ces études détaillées sont prépondérantes pour le zonage définitif. Il était indispensable d'en cerner tous les objectifs et les méthodologies pour y parvenir.

Le tableau II récapitule les choix qui ont été faits dans la vallée des gorges du Tarn. L'équivalent existe pour les gorges de la Jonte.

TABLEAU II
Caractéristiques des secteurs d'études détaillées

Numéro de secteur	Repérage	Secteurs d'études détaillées	Restitution au 1/5000 Surface (ha)	Numéro de photos obliques couvrant le secteur	Quantité de photos
Gorges du Tarn (rive droite et rive gauche)					
1	Le Rozier	oui	40	454/458	5
2	Mas Lafon	oui	non	523/526 520/514 513/501	4 7 13
14 16 25	Les Vignes	oui non oui	150 70 100	558/574 389/400	17 12
42 44 45	Le Colonel Gaujac	oui oui oui	35 36 35	627/636 334/339	10 6
58 60	La Malène	oui oui	20 10	651/654 655/657	4 3
67/69	Hauterives	oui	non	280/289	10
86 88	Sud Sainte-Énimie	oui oui	} 110	} 735/745	} 11
87	Saint-Chély	oui	98	236/245	10
94/96/98/100/ 104 97/99/101/103	Sainte-Énimie	oui oui oui	} 150 } 295	(manque de photos) 197/218	22
118 120	Prades	oui oui	} 222	795/799 800/811	5 12
124/126/128/ 130 132/134 123 125	Villaret/Blajoux La Chadenède	oui oui oui oui	} 132 113	812/815 (manque de photos) } 146/155	4 } 10
156	Le Chambonnet	oui	non	847/860	14
158	Le Buisson	oui	non	861/865 869/878	5 10
162	Ispagnac	oui	250	888/895	8
Total Tarn			1866		202

Méthodologie adoptée pour les études détaillées

À ce niveau de l'étude, les éléments de la couche source étant déjà collectés, on procède à un examen stéréoscopique des photos obliques pour compléments portant sur la géologie, la morphologie, la fracturation et la propagation. Cet examen permet, point essentiel, de sélectionner les instabilités potentielles représentatives des différents horizons géomorphologiques.

Il ne s'agit pas d'effectuer un relevé exhaustif des instabilités tel que l'on pourrait le faire pour une étude spécifique. Aussi, a-t-on procédé à un échantillonnage significatif d'instabilités représentatives des phénomènes de ruptures dans le versant considéré et par horizon géologique homogène (dièdre, surplomb, écaille, colonne, etc.).

Étude détaillée de Saint-Énimie

Sainte-Enimie (48) Rive gauche - secteur n°97	Echantillon 10	PHOTOS 17 et 18	DATE D'ANALYSE - 2 Novembre 2000
TYPE D'INSTABILITE (écaille, dièdre, colonne, blocs isolés, autres...)	surplombs		
1. DESCRIPTION - Nature du matériau - Dimension - Volume - Position dans le versant	dolomie massive (Bathonien - J2b) - 30 à 50 m ³ mi versant, en partie transversale de falaise		
2. FRACTURATION ORIGINE DE L'INSTABILITE - Paramètres géométriques Orientation des discontinuités (notation AFTES) - Paramètres géomécaniques Persistance Fréquence Joint Epouses	So (subhorizontale) discontinuité à l'arrière tout le surplomb à l'arrière - lisses à ondulées		PHOTO 17 Vue des surplombs potentiellement instables en sommet de falaise de Bathonien Supérieur
3. FACTEURS AGGRAVANTS 3.1. Présence de végétation - Dans la discontinuité - Sur le pourtour	oui oui au dessus du surplomb		
3.2. Présence d'eau - Ecoulement - Suintement	non traces de coulures		
3.3. Présence de cicatrices anciennes - Type de rupture et orientation	oui cicatrices d'anciens surplombs		
4. STABILITE 4.1. Processus d'évolution - Identification - Agents d'évolution - Indices d'évolution	décohésion, rupture en traction eau, gel, végétation ouverture de fissures rupture de surplomb		
4.2. Mécanisme de rupture			
5. QUALIFICATION DE L'ALEA DE RUPTURE	MOYEN à LONG TERME		
6. PROPAGATION 6.1. Données topographiques en aval - Pente du versant	35 à 40°		
6.2. Couverture du versant	arbres et arbustes		
6.3. Nature du substrat	rocher altérée (12a) et éboulis		
6.4. Fragmentation (volume)	en volumes de 1 à 20 m ³		
6.5. Traces d'éboulements anciens	blocs éboulés de 30 à 40 m ³ dans le versant		
6.6. Trajectoire - Direction - Obstacles - Présence de replats, fosses	thalweg vers le château d'eau arbres restanques et blocs éboulés		PHOTO 18 Vue de blocs éboulés dans le thalweg au dessus du château d'eau.
6.7. Probabilité de propagation	élévée jusqu'au château d'eau et aux habitations		
7. TYPE DE PARADES EVENTUELLES	buton ancré, ancrages + filets		

Fig. 11 - Exemple de fiche de qualification de l'aléa.

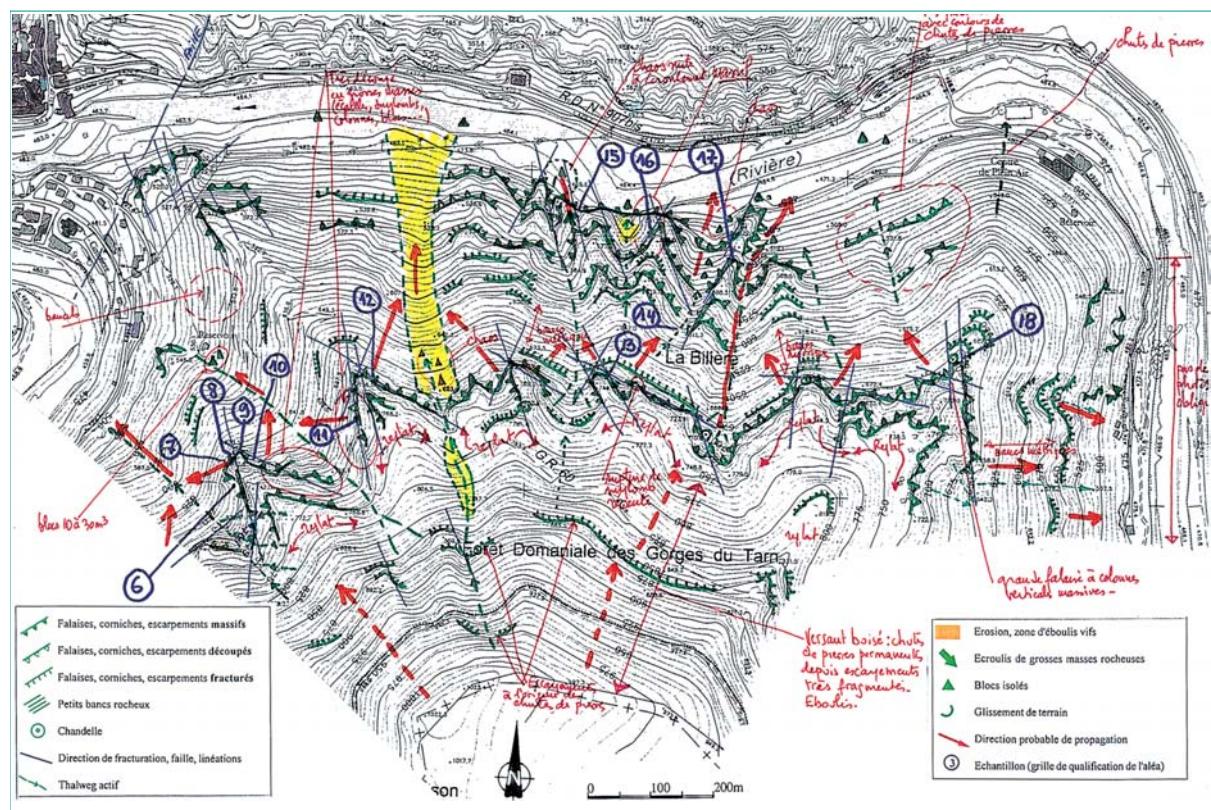


Fig. 12 - Carte des observations.

Chaque échantillon numéroté a été caractérisé pour sa classe d'instabilité, en termes de probabilité/délai, dans une fiche de qualification de l'aléa (fig. 11).

Cette fiche, sorte de « chek-list » pour le géologue, permet, pour chaque échantillon ou compartiment représentatif d'un même horizon géologique, de qualifier les différents facteurs déterminants de l'aléa de rupture en termes de probabilité/délai.

On définit, pour chaque instabilité potentielle (écaillle, surplomb, dièdre, colonne, etc.), les paramètres géomécaniques et géométriques de la fracturation, les facteurs aggravants, les modes d'instabilité, en intégrant les processus d'évolution et les mécanismes de rupture.

Ensuite, les informations conditionnant la propagation dans le versant sont relevées (données topographiques, couvert végétal, substrat, fragmentation, etc.).

Une orientation du choix de parades a également été indiquée à ce niveau.

Chaque fiche est accompagnée de photographies de l'échantillon pour le localiser sur le terrain. Toutes ces données sont reportées *sur les fiches de qualification de l'aléa* (fig. 11) *et sur la carte des observations* (fig. 12).

Remarques sur l'intervention de terrain

Le mode d'intervention préconisé a pour objet d'obtenir, sur le terrain, un échantillonnage représentatif des instabilités potentielles dont découlera la qualification de l'aléa de rupture sur l'ensemble de la zone. Chaque échantillon d'instabilité sera caractérisé par sa fiche de qualification (cf. fig. 11).

Un poids très important a été donné à l'analyse des photos obliques en stéréoscopie car, dans un premier temps, une démarche, qui s'est révélée infructueuse par la suite, avait été privilégiée. Celle-ci consistait, à partir du versant opposé, à observer à la jumelle et à décrire des types d'instabilités et des modes de propagation qui soient représentatifs des grandes zones homogènes du versant.

Pour ce faire, il a fallu surmonter les difficultés suivantes :

- *une fois sur place, dans la végétation, la localisation des instabilités repérées depuis le versant opposé est extrêmement difficile,*
- *la localisation sur le 1/10 000 ou sur les photos obliques des éléments instables repérés directement dans le versant est souvent impossible ou très peu précise, compte tenu de la densité de la végétation, d'un terrain très accidenté avec de nombreux blocs éboulés qui rendent difficile toute progression,*
- *très vite, on ne sait plus avec précision où l'on se situe. Les chemins cartographiés n'existent plus, d'autres ont été créés par les chasseurs ou les animaux.*

Un essai a été réalisé avec une équipe de trois géologues. Cinq jours sur le terrain n'ont pas suffi pour couvrir la totalité de deux secteurs.

Ce temps passé, rapporté aux 56 secteurs représentatifs des ensembles à traiter, conduisait à un total de six mois de terrain à deux ou trois personnes ; soit, analyse des documents et rapports compris, un an de travail d'une équipe d'au moins deux personnes en permanence pour traiter cette partie du problème. Ce délai n'était absolument pas compatible avec les financements disponibles et les buts recherchés.

Pour ces raisons, le mode d'intervention choisi donne une grande part à l'analyse des photos obliques stéréoscopiques. Le travail s'effectue non plus sur des contacts 130/180 mm mais sur des agrandissements 200/300 millimètres.

On repère, sur ces photos stéréoscopiques, les instabilités potentielles visibles, la fracturation, les éboulements anciens, de manière à sélectionner un échantillonnage de points accessibles pour qualifier l'aléa sur chaque secteur considéré.

Tous les reports s'effectuent sur les 5 000° issus de la restitution photogrammétrique.

Le terrain se limite ainsi à deux jours d'intervention par secteur, voire trois dans les cas les plus sensibles. On notera qu'il y a toujours des réajustements à faire entre l'observation des photos et les constats de terrain.

Pour les parties hautes, souvent les plus boisées et les plus déchiquetées, fréquemment inaccessibles, la qualification de l'aléa s'effectue visuellement à partir d'un hélicoptère et sur un échantillonnage des points les plus sensibles préalablement repérés.

Des photos complémentaires sont réalisées en 24 × 36 mm. Elles complètent l'observation de terrain.

Transcription cartographique

La phase terrain a permis d'aboutir après report aux cartes suivantes.

■ **Une carte des observations** (cf. fig. 12) qui synthétise toutes les informations obtenues tant dans la couche source que dans la couche évaluation (phase terrain).

Étude détaillée de Sainte-Énimie

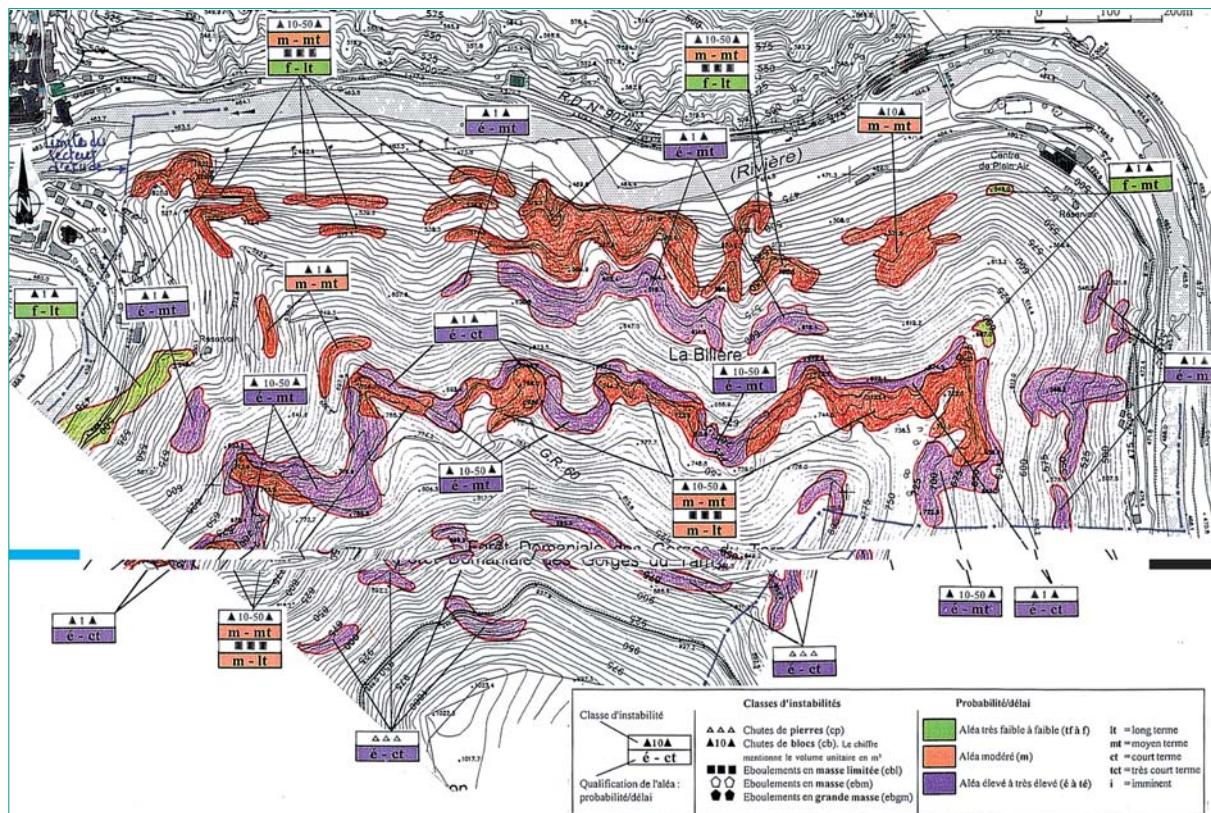


Fig. 13 - Carte des aléas de rupture.

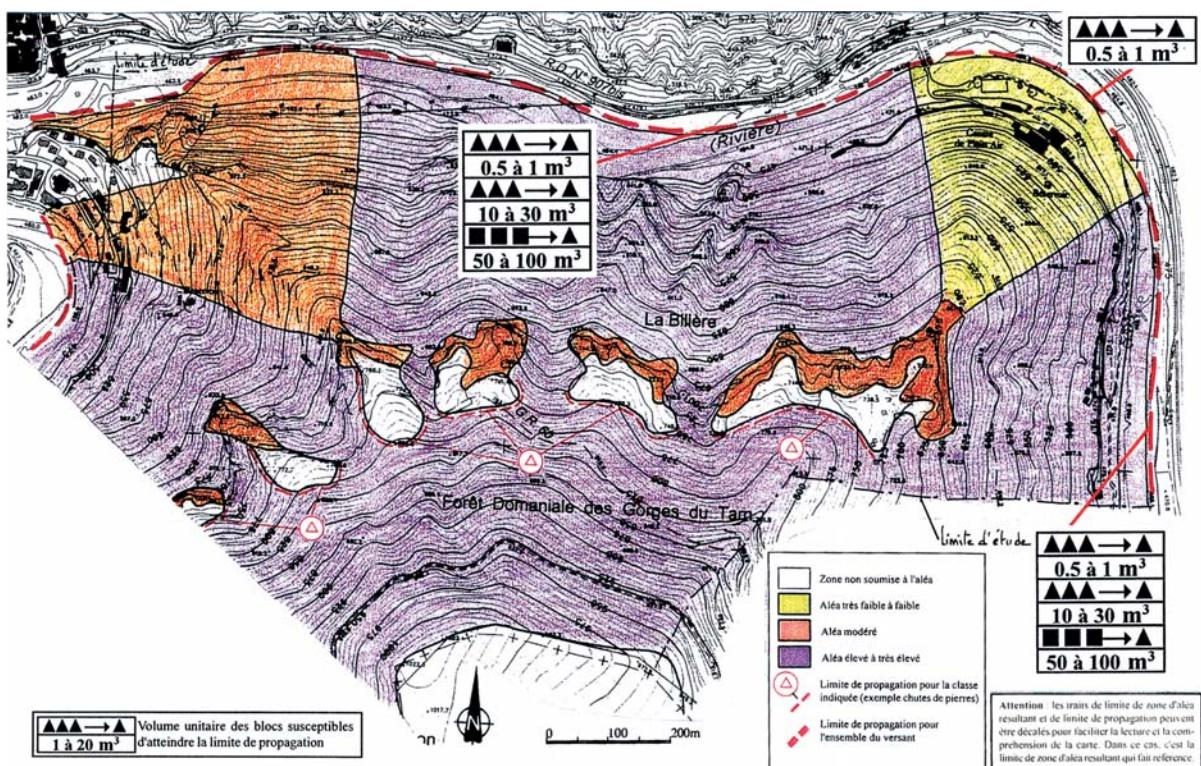


Fig. 14 - Carte des aléas résultants.

■ Une carte des aléas de rupture (fig. 13).

Pour chaque horizon homogène, origine de départs potentiels, l'aléa de rupture a été caractérisé en termes de probabilité/délai par une couleur et un symbole, pour une classe d'instabilité donnée. Cette transcription s'est faite sur la base d'échantillons représentatifs de chaque horizon géologique homogène, échantillons qui ont été préalablement qualifiés sur des fiches remplies sur le terrain (*cf.* légende de la figure 13 et annexe I).

On rappellera que la somme des informations fournies sur les instabilités potentielles n'est pas aussi exhaustive que le serait une étude spécifique sur un site donné.

Pour chaque horizon ou zone de départ, une étiquette résume, par la couleur et des symboles, les données de la fiche de qualification correspondante : classe d'instabilité (avec mention du volume de départ de l'échantillon pour la catégorie des blocs) et modalités d'occurrence temporelle. Une tache d'une couleur identique à celle de l'étiquette délimite l'extension spatiale du phénomène.

Afin de simplifier la représentation cartographique, seuls quatre niveaux d'aléa de rupture (au sens du couple probabilité/délai) ont été représentés :

- zones non soumises à l'aléa (blanc),
- aléa très faible à faible (vert),
- aléa modéré (orangé),
- aléa élevé à très élevé (violet).

L'« aléa de propagation » n'a pas fait l'objet d'une carte particulière pour éviter la multiplication des documents. Il a été pris en compte dans la carte des aléas résultants (fig. 14).

Sur cette carte, une limite en tirets épais de couleur rouge représente la limite de propagation extrême pour l'ensemble des instabilités du versant. La limite intermédiaire en tirets fins de couleur rouge concerne une classe d'instabilités particulière (ici les pierres). Dans d'autres cas, une éventuelle limite intermédiaire peut concerter d'autres classes (blocs, masses limitées, etc.).

Ces limites ont été tracées sur la base des observations de terrain en tenant compte que des blocs ont pu être déplacés par les crues du Tarn ou éliminés par les propriétaires des terrains.

Dans les zones à enjeu important, des calculs de propagation de calage ont été faits à partir des fonds topographiques à 1/5 000, spécifiques à cette étude, et du logiciel « Propag » du LRPC de Lyon.

■ **Une carte des aléas résultants** (fig. 14). Elle synthétise la superposition sur l'ensemble du versant des différents aléas de rupture jusqu'à la limite extrême de propagation (le plus élevé couvrant généralement le plus faible) avec le même type de représentation cartographique (couleurs, symboles).

L'intensité du phénomène est représentée par le volume unitaire des blocs susceptibles d'atteindre la limite de propagation.

Qualification générale du site et zonage

La qualification générale des vallées du Tarn et de la Jonte est l'aboutissement de ce travail par couches d'informations successives :

- ① couche source,
- ② sectorisation des versants,
- ③ couche évaluation,
- ④ transcription cartographique.

Cette phase est une extension des résultats de la qualification de l'aléa obtenu sur les zones d'études détaillées (cartes des aléas de rupture et résultants) à des éléments d'ensembles de typologie similaire moyennant une adaptation aux différentes morphologies rencontrées. Le contrôle s'effectue à partir des photos obliques et/ou sur le terrain (*cf.* § Méthodologie adoptée pour les études détaillées).

La transcription cartographique sur le 1/10 000 (fig. 15) a été réalisée suivant le schéma suivant :

- dans un premier temps, report des études détaillées à 1/5 000 sur le plan à 1/10 000 en indiquant, pour chaque secteur, l'ensemble homogène concerné : l'ensemble IX pour Sainte-Énimie, VIII pour Prades par exemple (*cf.* § La sectorisation des versants),

➤ dans un second temps, pour chacun des secteurs appartenant à l'ensemble IX ou VIII par exemple, on procède à la transposition de l'aléa résultant obtenu sur les secteurs d'études détaillées IX ou VIII.

Un retour systématique à l'aléa de rupture et de « propagation » ainsi qu'un réexamen systématique des photos obliques correspondantes, voire une visite de terrain complémentaire, sont indispensables.

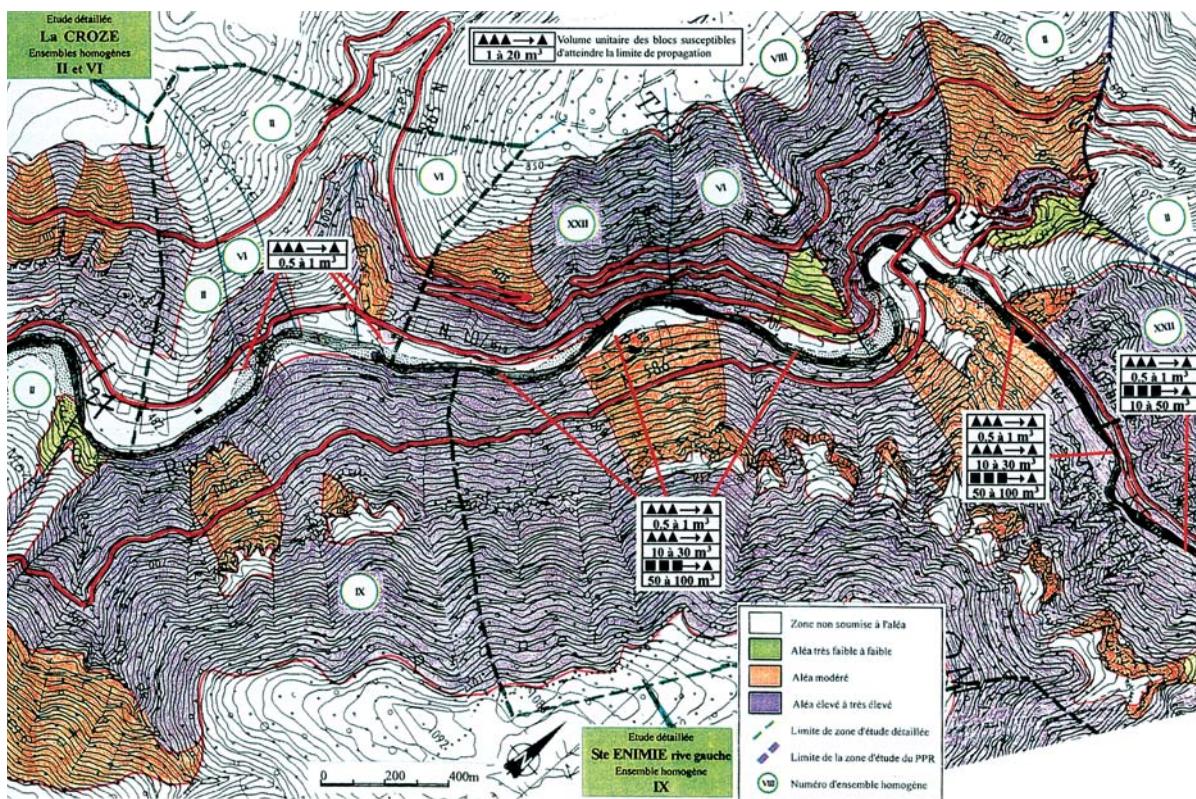


Fig. 15 - Carte de synthèse des aléas résultants.

La transcription, en termes de probabilité/délai, pour une classe d'instabilité donnée, est relativement aisée. Les limites extrêmes de propagation, même si l'on est hors zone à enjeux forts, sont par contre délicates à déterminer dès qu'il s'agit de transcrire un arrêt probable de la propagation d'un éboulement dans une zone de replat ou de faible pente.

Un point particulier porte sur l'ensemble XV dit des « becs » (versant convexe d'un méandre) où aucune analogie n'est possible avec des zones d'études détaillées. L'aléa résultant a alors été défini au cas par cas sur la base des photos obliques et des visites de terrain.

Ce zonage, qui prend en compte une limite extrême de propagation d'éboulements potentiels pour un niveau d'aléa résultant sur l'ensemble des versants des gorges du Tarn et de la Jonte, constitue le document de base pour élaborer ensuite la cartographie réglementaire du PPR.

Conclusion

Les méthodologies mises en œuvre lors de cette étude (sectorisation, analyse des photos obliques, analyse du terrain par échantillonnage représentatif, etc.) sont tout à fait extrapolables, moyennant des adaptations, à d'autres sites et à d'autres catégories de mouvements de terrain. Elles ont été utilisées par le CETE Rhône-Alpes lors de l'étude portant sur le schéma directeur de la région grenobloise et par le CETE Méditerranée pour une étude sur itinéraire dans le cadre du contrat de plan de la DDE 04 sur les RN 85 et 202.

Si la méthodologie proposée peut s'adapter sans difficultés à des versants creusés dans des formations sédimentaires (massif sub-alpin par exemple), son utilisation est sans doute plus délicate dans des massifs montagneux cristallins.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

MARTEL E.-D., *Les Causses Majeurs – Lozère, Aveyron, Gard, Hérault. Gorges du Tarn et Cévennes, Canyons et Ruiniformes, Abîmes et Cavernes, Rivières souterraines et Résurgences*, Éditions Artières et Maury à Millau, **1936**, Rééditions **1982** et **2000**, imprimerie Maury à Millau.

CONTOU-CARRÈRE B., *Enquête ethnologique et historique dans le cadre d'une étude d'un plan de prévention des risques sur le territoire des gorges du Tarn et de la Jonte*, Maîtrise d'ethnologie, Montpellier III, novembre **1999**.

Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR), Guide général, La Documentation française, septembre **1997**.

L'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain, LCPC, Guide technique, Collection Environnement, les risques naturels, février **1999**, 130 pages.

Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR) – Risques Mouvements de terrain, Guide méthodologique, La Documentation Française, septembre **1999**.

Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain, Guide technique, Collection Environnement, les risques naturels, LCPC, septembre **2000**, 92 pages.

Parades contre les instabilités rocheuses, Guide technique, Collection Environnement, les risques naturels, LCPC, mai **2001**, 144 pages.

Lexique

• Aléa (ou aléa résultant, en anglais « hazard »)	➤ Événement incertain, pouvant être dangereux, susceptible de se produire en un site donné. Dans le contexte de prise en compte d'un risque rocheux, c'est la résultante des composantes de l'aléa de rupture et de l'aléa de propagation.
• Aléa d'écroulement (ou de rupture)	➤ Désigne le compartiment de terrain susceptible de s'écrouler.
• 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 la rupture du compartiment considéré.
• Aléa résultant	➤ C'est la résultante, sur le versant considéré, des composantes de l'aléa de rupture et de l'aléa de propagation.
• Classe	➤ Type d'instabilité caractérisé par le volume des matériaux mis en jeu lors de la phase d'écroulement et le volume unitaire des blocs produits.
• Couche d'information	➤ Désigne un thème de renseignements (sources) ou de synthèse (évaluation) nécessaire 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. Les couches évaluation permettent la définition des objets d'étude élémentaires (ou compartiments) candidats à la phase de qualification des aléas.

Annexe →

ANNEXE I

Qualification de l'aléa d'écoulement

Le mot « aléa » vient du latin *a/lea* qui signifie « coup de dés ». Ce mot, qui qualifie un événement imprévisible, est synonyme de « hasard ». La nature, la probabilité de manifestation et l'échéance d'occurrence de l'aléa peuvent, malgré tout, être qualifiées lorsqu'il s'agit de la chute de masses rocheuses.

La qualification de l'aléa fait intervenir deux composantes :

- la **classe d'instabilité**,
- la « **probabilité/délai** ».

1. Classes d'instabilités

On définit par classe un type d'instabilité caractérisé par le volume des matériaux mis en jeu lors de la phase d'écoulement et le volume unitaire des blocs produits. Les classes sont définies conformément à la grille suivante :

- **Les chutes de pierres (cp)** concernent des volumes unitaires inférieurs à 1 décimètre cube.
- Les chutes de blocs (cb) concernent des éléments isolés d'un volume variant de quelques fractions de mètre cube à plusieurs mètres cubes. Dans le cas de formations massives, on peut avoir affaire à des blocs dépassant la centaine de mètres cubes.
- **Les éboulements en masse limitée (cbl)**. Le volume total de la masse en cause est inférieur à quelques centaines de mètres cubes.
- **Les éboulements en grande masse (ebgm)** concernent des volumes d'écoulement simultané supérieurs à 500 000 mètres cubes mettant en jeu une dynamique spécifique.

2. » Probabilité/délai »

La « probabilité/délai » se définit comme une variable à deux dimensions indissociables :

- l'**éventualité** d'occurrence de chute dans le délai considéré, induite par les **facteurs déterminant** le phénomène.

L'échelle utilisée s'étale entre le très faible et le très élevé (A) :

- le **délai** significatif à l'intérieur duquel le praticien estime que le phénomène peut se produire par rapport à une probabilité considérée.

La durée des périodes va de l'imminent au long terme (B).

La durée des périodes considérées dans l'échelle des délais est définie en tenant compte du rythme d'activité des phénomènes d'évolution naturelle (cycles saisonniers notamment) et des délais caractéristiques des programmes de sécurisation. Le délai à long terme caractérise la dérive maximale pour laquelle l'aléa est qualifiable.

Un aléa est classé « non qualifiable » lorsqu'aucun élément ne permet de le qualifier dans le long terme. Il est considéré comme relevant de phénomènes exceptionnels, d'ordre géologique ou accidentel.

ANNEXE I (suite)

A – L'éventualité (probabilité qualitative) de déclenchement du phénomène, dans le délai considéré, est induite par les **facteurs déterminant** le déclenchement.

Très élevé (te)	L'intensité de tous les facteurs déterminants identifiés sur le compartiment est forte.	<ul style="list-style-type: none"> – Non occurrence du phénomène exceptionnelle. – Occurrence du phénomène normale.
Élevé (e)	L'intensité de certains facteurs déterminants identifiés sur le compartiment est forte.	L'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non occurrence.
Modéré (m)	Les facteurs déterminants sont identifiés sur le compartiment, certains facteurs non répertoriés peuvent apparaître dans le temps.	L'occurrence du phénomène est équivalente à sa non occurrence.
Faible (f)	Les facteurs déterminants identifiés sur le compartiment sont diffus, mal circonscrits, mais présentent des analogies avec des zones à aléa modéré.	La non occurrence du phénomène est plus envisageable que son occurrence.
Très faible (tf)	Aucun des facteurs déterminants n'est formellement identifié sur le compartiment.	<ul style="list-style-type: none"> – Occurrence du phénomène exceptionnelle. – Non occurrence du phénomène normale.

B – Le délai est le terme à l'intérieur duquel le phénomène a une probabilité considérée de se produire.

Imminent	i	Le délai est suffisamment court pour imposer des mesures de sécurité immédiates
Très court terme	tct	De l'ordre de deux ans
Court terme	ct	De l'ordre de dix/vingt ans
Moyen terme	mt	De l'ordre de trente/cinquante ans
Long terme	lt	De l'ordre de cinquante/cent ans