

Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires du Callovien-Oxfordien (Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France)

O. MAQUAIRE
J.-C. FLAGEOLLET
J.-P. MALET
M. SCHMUTZ
D. WEBER
S. KLOTZ

Centre de recherches
éco-géographiques
(CEREG)
UMR 7007
CNRS-ULP-ENGEES
3, rue de l'Argonne
67083 Strasbourg
maquaire@equinoxe.u-
strasbg.fr

Y. ALBOUY
M. DESCLOÎTRES

Institut de recherches pour
le développement (IRD)
Laboratoire
de géophysique interne
département RED, UR6
32, avenue Henri-Varagnat
93143 Bondy Cedex

M. DIETRICH

Laboratoire de géophysique
interne et tectonophysique
UMR C5559 CNRS,
Université Joseph-Fourier
de Grenoble

M. SCHMUTZ
R. GUÉRIN

Département
de géophysique appliquée
UMR 7619 Sisyphe
Université Pierre-et-Marie-
Curie (Paris 6)
case courrier 105
4, place Jussieu
75252 Paris Cedex 05

J.-J. SCHOTT

École et Observatoire
des sciences de la terre
UMR EP533
Université Louis-Pasteur
5, rue René-Descartes
67084 Strasbourg Cedex

Résumé

Dans le bassin de Barcelonnette, le glissement-coulée de Super-Sauze s'est développé dans un bassin torrentiel de marnes noires callovo-oxfordiennes érodé en ravines et échines coalescentes. Sur ce site naturel, mais complexe et difficile d'accès, une approche multidisciplinaire a associé une analyse géomorphologique couplée à un traitement photogrammétrique numérique, une prospection géotechnique (sondages et essais *in situ* et en laboratoire) et une investigation géophysique (méthodes de mesure de la résistivité électrique (électrique par courant continu et TDEM-time-domain electro-magnetism), sismique réfraction, Slingram. Les comparaisons, ajustements, validations des résultats complémentaires ont permis de reconstituer l'évolution historique du mouvement, de proposer un modèle conceptuel d'évolution, de définir la position et forme de la paléotopographie, la structure interne de la coulée de débris dans la zone d'accumulation et dans la zone d'ablation avec des ordres de grandeur de précision tout à fait satisfaisants. Il est maintenant possible d'envisager la modélisation du comportement dynamique de ce type de coulée de débris, fréquent dans les Terres noires (thèse J.-P. Malet en cours) en relation avec les conditions hydrodynamiques. L'objectif est d'évaluer la probabilité de transformation rapide, de tout ou partie de la masse instable, en coulées boueuses ou en laves torrentielles.

Mots-clés : géomorphologie, photogrammétrie numérique, géotechnique, géophysique, inversion jointe électrique-TDEM, glissement-coulée, marnes noires, Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France.

A multidisciplinary study for the knowledge of the Super-Sauze earthflow in Callovian-Oxfordian black marls (Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France)

Abstract

In the Barcelonnette basin, Southern French Alps, the Super-Sauze earthflow occurred in a torrential basin. The outcropping black marls are eroded on a large 90 ha badlands area. On this natural, but complex and non accessible site, a multidisciplinary approach associated a geomorphological analysis coupled to a digital photogrammetric processing, a geotechnical prospection (drillings and *in situ* and laboratory tests) and a geophysical investigation (methods of measurement of the electrical resistance (electric by D.C. current and TDEM - Time-Domain Electro-Magnetism), seismic refraction, Slingram. The comparison, adjustment, validation of the complementary results made it possible to reconstitute the historical evolution of the movement, to propose a conceptual evolution model, to define the position and shape of the paleotopography, the internal structure of the flow in both the accumulation and ablation areas, thus with a satisfying accuracy. It is now possible to consider the modeling of the dynamical behaviour of such type of earthflow, frequent in the black marls in relation to the hydrodynamic conditions (PhD thesis J.-P. Malet in progress). In this context, the main objective is to evaluate the potential transformation, of whole or part of the unstable mass, in a muddy flow or in a debris flow.

Key words : geomorphology, digital photogrammetry, geotechnical investigation, geophysical investigation, joint inversion electrical-TDEM (Time Domain Electromagnetism), earthflow, Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France.

Introduction et problématique scientifique

Les glissements, de type complexe, évoluant en coulées sont fréquents dans les « Terres noires » des Préalpes françaises. Dans le bassin de Barcelonnette, trois glissements-coulées actifs sont localisés sur des versants ou dans des bassins torrentiels soumis à une intense érosion (Flageollet *et al.*, 2000 ; Schmutz, 2000 ; Weber, 2001). Le plus grand, le glissement de La Valette, en rive droite de l'Ubaye, a un volume estimé à plus de 6 millions de m³ et se développe sur une longueur de 1 800 m ; les glissements de Poche ou de Super-Sauze, plus modestes (de 600 000 à 700 000 m³), s'étendent sur des distances de l'ordre de 800 à 1 200 m. Ils possèdent une morphologie caractéristique : les blocs et les panneaux qui se détachent de la couronne, de manière rétrogressive, par des ruptures planes (Malet *et al.*, 2000a), s'accumulent en se disloquant dans une ou plusieurs ravines, et forment, après leur déstructuration progressive, une coulée de débris hétérogène. La conséquence de cette morphologie particulière est la grande difficulté à fixer la limite aval de la zone de rupture, et à identifier l'emplacement exact, les dimensions et la profondeur de la (des) ravine(s) fossilisée(s) par les matériaux en mouvement dans la zone d'accumulation. Dans cette dernière, les blocs et les panneaux de marnes, plus ou moins déstructurés, se déforment et se fragmentent progressivement de l'amont à l'aval, et de la surface vers la profondeur, pour constituer une masse hétérogène aux caractéristiques très variables (Phan, 1993 ; Antoine *et al.*, 1995).

Le glissement-coulée de Super-Sauze se situe en rive gauche de l'Ubaye, sur la commune d'Enchastreyles et non loin de la station de sports d'hiver de Super-Sauze (Fig. 1). L'évolution entièrement naturelle du site depuis son déclenchement, dans les années 60, en fait un objet d'étude intact, vierge de toute trace d'aménagement hydraulique. Aucune information fiable et précise n'est disponible sur les conditions et sur la date du déclenchement des glissements à l'amont, ni sur la progression de la coulée à l'aval, contrairement par exemple, au glissement-coulée de La Valette qui avait été bien observé et suivi dès son déclenchement en 1982. La probabilité de survenance d'une brusque et rapide évolution de la coulée ou d'une transformation éventuelle de tout ou partie de la masse accumulée en laves torrentielles n'était pas évaluée alors qu'à l'aval des infrastructures et des habitations constituaient des éléments exposés. Dans le but d'évaluer ce niveau d'aléa, il était nécessaire : 1) de reconstituer l'évolution historique du mouvement, 2) de définir la paléotopographie recouverte et la structure interne de la masse et 3) de comprendre son fonctionnement actuel et futur en relation avec les conditions climatiques par une modélisation hydromécanique, selon différentes lois de comportement des matériaux (fluide ou frottant).

Cet article traite du choix des différentes techniques d'instrumentation et de prospection utilisées compte tenu des particularités du site. Il a pour objectif essentiel de montrer la complémentarité étroite de ces méthodes (géomorphologie, photogrammétrie numérique, géophysique et géotechnique). Les résultats présentés constituent une synthèse des données acquises depuis 1996 sur la structure interne 3-D de la coulée,

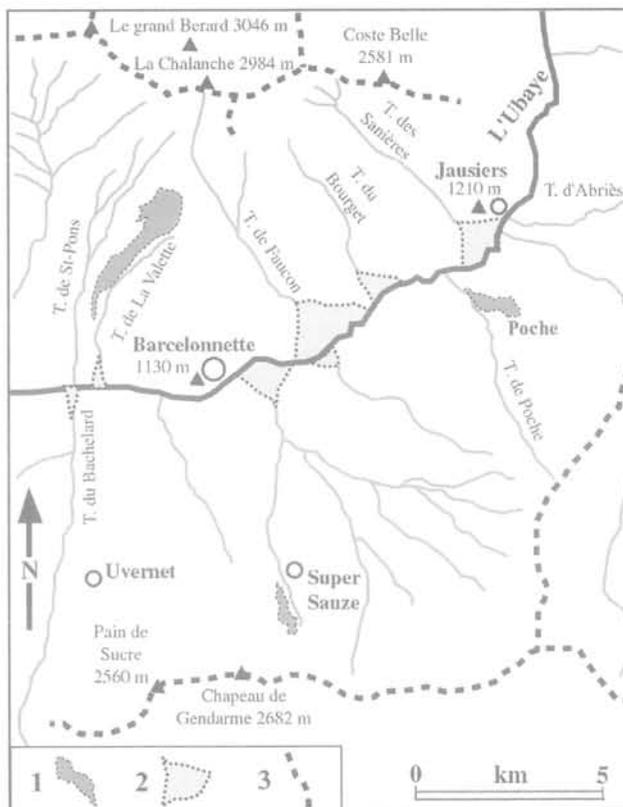


FIG. 1 Les grands traits morphologiques de la partie orientale du bassin de Barcelonnette et localisation de la zone d'étude. 1) : coulée de débris ; 2) : cône de déjection ; 3) : ligne de crêtes.

Morphological sketch of the Barcelonnette basin (eastern part) and location of the study area. 1) earthflow ; 2) alluvial fan ; 3) crest line.

ses caractéristiques hydromécaniques et des modalités de son évolution. Le mécanisme de déclenchement des glissements structuraux (banc sur banc ; Malet *et al.*, 2000a) ou l'analyse détaillée des relations pluie-nappe-déplacements font l'objet d'autres publications (Malet *et al.*, 2000b, Malet *et al.*, 2001) ou de travaux sur la dynamique d'écoulement et la validation de modèles de propagation de ces coulées (thèse en cours J.-P. Malet).

Le contexte morpho-structural

Le bassin torrentiel (marnes noires callovo-oxfordiennes) où se situe le glissement-coulée de Super-Sauze est fortement raviné. Les ravines (roubines) sont très rapprochées (30-40 m) et séparées par des arêtes aiguës ; d'une longueur de 80 à 500 m, les échines, nues, très pentues (jusqu'à 65 %), sont plus ou moins parallèles ou coalescentes (Figs. 2B et 3A). Elles sont soumises à des écoulements saisonniers et quelquefois pérennes.

Les marnes possèdent un faciès de schistes argileux, noirs, gris ou légèrement bleutés, finement lités en feuillets parallèles, alternant avec des petits bancs calcaires. La microtectonique joue un rôle essentiel, en constituant des surfaces de glissements potentielles, et en guidant la fragmentation des panneaux marneux.

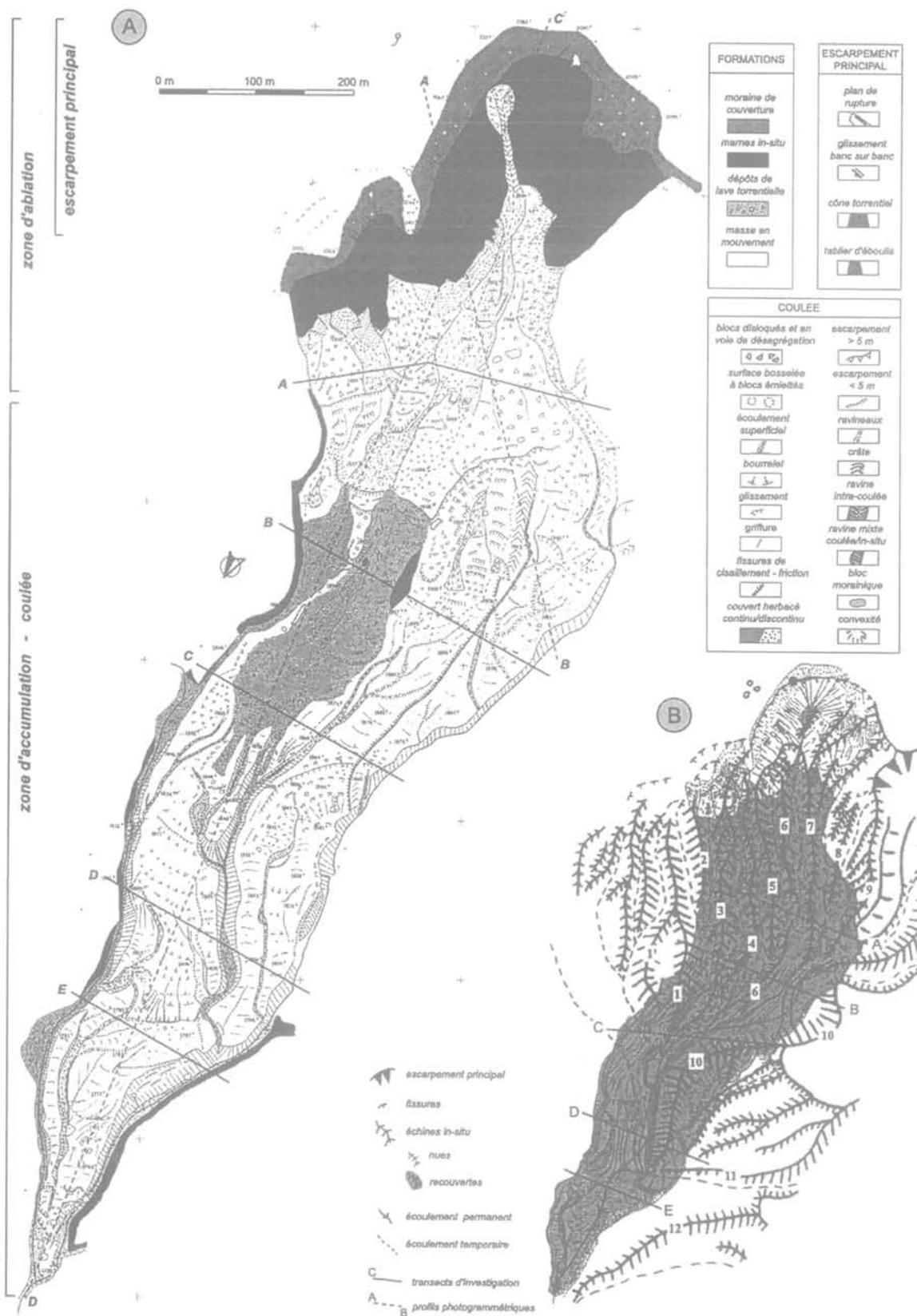


FIG. 2

Morphologie du glissement-coulée de Super-Sauze en 1999 (2A) et extension de la coulée sur la paléotopographie du bassin torrentiel des Roubines de 1956 (2B).

Morphology of the Super-Sauze earthflow in 1999 (2A) and extension of the flow on the paleotopography of the 1956 torrential basin (2B).

Cette microstructure, qui explique en partie leur érodabilité et leur susceptibilité aux mouvements de masse (Antoine *et al.*, 1995 ; Weber, 2001), résulte des condi-

tions de sédimentation en couches successives et de l'histoire tectonique de la région. A la suite d'importantes phases de tectonisations, le massif marneux pré-

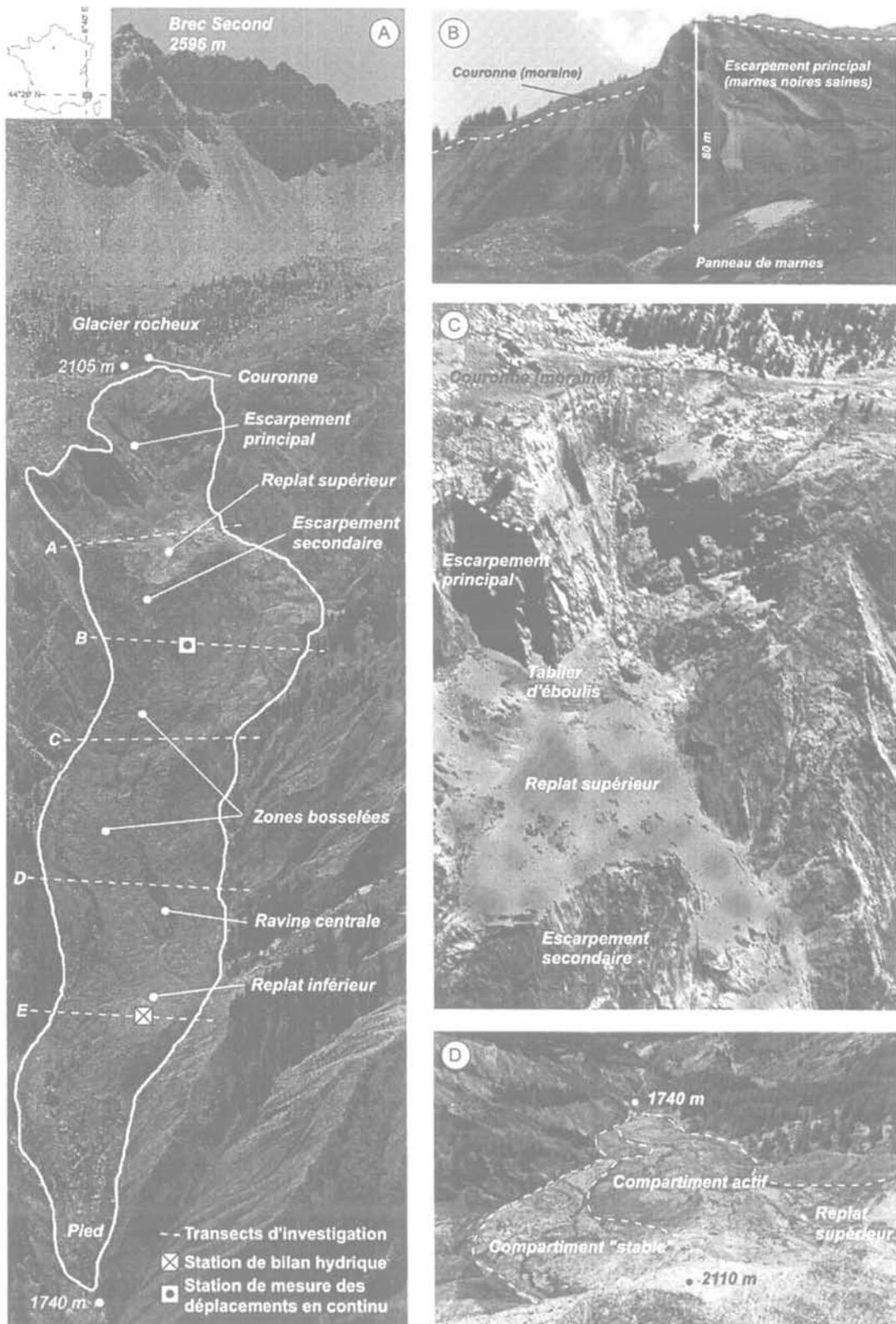


FIG. 3. Vue aérienne du glissement-coulée en 1991 (3A) et 2000 (3D) et l'escarpement principal (3B et C).
Aerial view of the earthflow in 1991 (3A) and 2000 (3D) and main scarp (3B and C).

sente une macrostructure faillée et fortement diaclasée, et de fortes et brusques variations de pendage.

Ainsi, la structure et la morphologie du site concourent, sous un climat méditerranéen de montagne agressif, après une phase de ravinement, au

développement de mouvements gravitaires de masse (glissements, éboulements, chutes de blocs). Ces derniers se transforment progressivement en coulées boueuses ou de débris qui fossilisent un chenal d'écoulement.

Morphologie du glissement-coulée de Super-Sauze

Les traits morphologiques principaux sont décrits à partir de la carte morphologique (Fig. 2A) élaborée en juillet 1999 au 1/1 000 par tachéométrie. Le glissement-coulée s'étend sur une longueur de 800 m entre les altitudes de 2 105 m à la couronne et 1 740 m à la base de la coulée (Figs. 2A et 3A), pour une pente moyenne de 25°.

L'escarpement principal (Fig. 3A, B et C), en amphithéâtre, atteint une hauteur de 80 à 100 m. Il laisse apparaître en coupe une couverture morainique d'une dizaine de mètres d'épaisseur qui repose sur les marnes saines. De larges fissures ouvertes, verticales ou obliques, témoignent du recul de la couronne (2 m en 2000, dans l'axe de la coulée). Les plans de stratification présentent un aval-pendage de 65° (Weber, 2001). Son architecture est très irrégulière avec des flexures à très petit rayon de courbure et des diaclases soulignées par des filons de calcite.

La zone d'ablation prend la forme d'un replat supérieur (Fig. 3A et C) de 7-8 ha de superficie entre 1930 m et 1 970 m d'altitude. La topographie de détail est très chaotique. Des panneaux (Fig. 3B) aux dimensions plurimétriques se retrouvent au pied de l'escarpement, parfois noyés dans un matériau plus fin. Leur structure (lamines, schistosité, intercalation de lits calcaires) est toujours conservée, mais leurs arêtes émoussées traduisent leur ancienneté. Ce replat est limité à l'aval par un escarpement secondaire (dont la pente atteint 30°, parfois 40 à 50°), au profil concave, au tracé en arc de cercle marqué par de larges fissures de traction, perpendiculaires à la pente, et de nombreux suintements (Fig. 3C). Des panneaux de matériau remanié basculent par paquets successifs emboîtés le long de ce versant raide et s'écoulent dans la pente sur des distances pouvant atteindre 100 à 150 m.

La partie inférieure de la coulée qui s'est développée en contrebas du replat supérieur constitue la zone d'accumulation *stricto sensu* (Fig. 3A). Les écoulements se concentrent à la base de l'escarpement secondaire, où prennent naissance des coulées localisées qui occasionnent des bourrelets. Des fissures de traction apparaissent autour d'un éperon de marnes en place qui émerge actuellement au-dessus de la coulée vers 1 900 m (transect B).

À l'aval, la pente s'adoucit et devient rectiligne. La fréquence et la taille des blocs diminuent en surface vers l'aval. En effet, sous l'action des agents météoriques, les blocs et panneaux de marnes se désagrègent et produisent une matrice argileuse à nombreux débris de tailles variables. La conséquence est la formation de zones bosselées où chaque bosse correspond à un bloc en voie de désagrégation (Klotz, 1999).

Dans le tiers inférieur de la coulée, une ravine centrale entaille le matériau sur une profondeur de plus de 6 m, collecte les eaux de ruissellement et draine la nappe.

Le replat inférieur, en forme de triangle de quelques dizaines de mètres de côté, bombé et en légère contre-pente, termine la coulée. Sa partie occidentale présente des fissures à orientation générale N-10° sur un rebord escarpé. Plus à l'est, le replat se raccorde au torrent du Sauze par une rupture de pente, une topographie cha-

otique, où des arbres morts sont entremêlés. La pointe terminale présente des versants raidis par les deux torrents pérennes adjacents. Leur confluence marque l'extrémité aval de la coulée, au pied du bourrelet terminal.

Cette description détaillée montre bien un tracé sinueux et des formes particulières qui semblent épouser une paléotopographie (Fig. 3D). Si son allure est fortement suggérée, il faut en préciser la position et la géométrie exacte. La coulée se serait développée en suivant et comblant une topographie accidentée de ravines et d'échines comme celles observées dans l'environnement immédiat du bassin torrentiel.

Méthodes d'analyses et d'investigation

Contraintes et stratégies d'investigation

Les observations et mesures ont débuté en 1991 : caractérisation de la cinématique de la coulée par le suivi périodique d'un réseau topométrique par triangulation (Malet *et al.*, 2000b ; Weber, 2001), cartographie morphologique au 1/1 000^e en 1995, installation d'un pluviomètre chauffant (1994) et d'une station climatique (1996), mesures préliminaires de géophysique par sismique réfraction et résistivité électrique en 1996 (Schmutz, 2000).

Une étude a été engagée en 1996 pour déterminer la structure 3-D de la masse accumulée. Mais, en raison de la grande hétérogénéité et de la forte variabilité latérale et amont-aval de l'épaisseur supposée de la coulée, nous avons choisi de mettre en œuvre, dans un tel site complexe, des techniques et méthodes permettant de disposer d'un maximum d'information complémentaire de sources différentes, puis de les confronter afin d'améliorer la restitution finale de l'objet.

Les techniques classiques de prospection par forages géotechniques ponctuels qui nécessitent une interpolation parfois hasardeuse ne permettraient pas d'obtenir une image « fiable » de la structure sans multiplier grandement le nombre de forages. Cette augmentation du nombre de points d'investigation était limitée en raison des coûts très élevés, renforcés sur ce site par une accessibilité réduite imposant un hélicoptère coûteux de moyens lourds nécessaires pour pénétrer profondément dans la masse accumulée. Un matériel « léger », transportable à dos d'homme, aux performances limitées ne pouvait permettre, dans ces environnements hétérogènes, d'atteindre une profondeur d'investigation suffisante. Pour ces raisons, plusieurs méthodes de prospection géophysiques ont été utilisées en complément d'investigations géotechniques et d'une analyse photogrammétrique.

Les investigations ont été menées le long de cinq profils transversaux (Fig. 3A) dont l'implantation a été guidée par la morphologie particulière décrite précédemment (replats, échines apparentes...) et par la visualisation des photographies aériennes les plus anciennes. Six couples stéréoscopiques couvrant la période 1956-1995 ont fait l'objet d'une analyse par photogrammétrie numérique (Weber et Herrmann, 2000).

Afin d'analyser le fonctionnement hydromécanique de la coulée et de modéliser son comportement, de nombreuses autres investigations ont été menées : suivi en continu sur plusieurs semaines des déplacements de surface par GPS (*global positioning system*) haute précision (Malet *et al.*, 2000b ; Malet *et al.*, 2001) ; installation d'un capteur de déplacement à câble sur roue potentiométrique (Malet *et al.*, 2001) ; installation d'une station de bilan hydrique pour le suivi des potentiels de pression et des conditions de recharge de la nappe ; installation de tubes TDR-Trime pour le suivi de profil d'humidité (Malet, 1998) ; installation de deux limni-graphes enregistreurs et d'un troisième pluviomètre enregistreur ; expériences de simulations de pluie pour identifier la part respective des eaux infiltrées ou ruisselées en fonction de différents états de surface.

4.2

Photogrammétrie numérique multi-dates

Le traitement par photogrammétrie numérique (Weber et Herrmann, 2000) de six couples de photographies aériennes datant de 1956, 1971, 1978, 1982, 1988 et 1995 a permis d'obtenir une succession de descriptions géométriques du site. La saisie numérique des couples stéréoscopiques a été effectuée⁽¹⁾ à une résolution de 33 à 40 µm, soit une résolution au sol allant de 0,55 à 1 m en fonction de l'échelle des originaux, comprise entre le 1/17 000 et le 1/30 000. Les images ont ensuite été rééchantillonnées numériquement pour arriver à une résolution planimétrique finale de 1 m. Les modèles altimétriques ont été générés automatiquement par corrélation numérique des deux images du couple stéréoscopique. Privilégiant dans un premier temps l'approche temporelle, une résolution planimétrique de 15 m a été choisie pour les six modèles générés. La qualité finale du MNT calculé est directement fonction des performances du corrélateur, les erreurs étant particulièrement fréquentes dans les zones homogènes, sans textures ou contrastes radiométriques suffisants, comme les zones d'ombre ou les terrains enneigés. Ces échecs induisent des anomalies dans les calculs d'élévation, parfois très locales sur un ou plu-

sieurs pixels (aberrations dans le relief restitué). Ces erreurs ont été corrigées par visualisation en relief d'un couple d'images (stéréopaire) à l'aide de lunettes à cristaux liquides. Les nœuds du MNT sont superposés à cette représentation du relief et l'association de deux canaux d'information permet de visualiser la correspondance entre le relief calculé (le MNT) et le relief restitué par les images. Pour les six MNT, le pourcentage des points ainsi réajustés manuellement varie entre 3 et 11 % du nombre total de points de chaque grille (8881). Un recalage absolu *a posteriori* des six modèles a été réalisé à partir des données d'une campagne de mesures GPS. L'intégration de ces points dans les six grilles altimétriques a permis d'obtenir une très bonne superposition géométrique des modèles de terrain en vue de leur exploitation quantitative. Ce traitement photogrammétrique a été complété par la réalisation d'ortho-photographies et de vues-perspectives.

4.3

Investigation géotechnique

4.3.1

Mise en œuvre : moyens, sondages et essais

L'accès du site étant impossible à des engins (zones humides et boueuses peu portantes, larges et profondes ravines à traverser), des outils d'investigation « légers » (pénétrömètre dynamique, vibro-percuteur) ont été retenus en complément d'outils plus « lourds », afin de pouvoir mettre en place des tubes inclinométriques et des piézomètres ouverts, et réaliser des essais pressiométriques et des essais d'eau (Lugeon et Lefranc). Une sondeuse NUZI (100 ch) a été hélicoptée et six sondages profonds (un forage carotté et cinq forages destructifs au tricône avec enregistrements des paramètres) ont été réalisés par l'entreprise INFRASOL sur deux zones « planes » situées dans la partie amont de la coulée (transects A et C). Les sondages complémentaires ont été réalisés avec un pénétrömètre dynamique « lourd » DL 030 (mouton de 30 kg), un pénétrömètre dynamique « léger » (mouton de 10 kg) et un vibro-percuteur à gouges permettant la visualisation de la nature du sol et le prélèvement d'échantillons intacts ou remaniés jusqu'à une profondeur de l'ordre de 9 m.

⁽¹⁾ Autorisation n° 70 8006 © IGN France 1998.

TABLEAU 1 Répartition des forages et essais sur la coulée de Super-Sauze par transect d'investigation (état en novembre 1999).

Distribution of the drillings and tests by cross-sections on the Super-Sauze earthflow (state in November 1999).

Transect	Essai de pénétration dynamique (longueur max = 9,30 m)	Sondages au vibro-percuteur Ø 30 à 100 mm (0,70 à 7,00 ml)	Sondages destructifs paramétrés Ø 63 à 110 mm 18,50 ml à 28,80 ml	Sondage carotté Ø 116 mm 13,50 ml	Essai pressiométrique	Tubes piézométriques Ø 25 à 70 mm	Tubes inclinométriques 12,75 à 18,40 m total : 44 m	Essais Lefranc
A	14	/	2	1	11	1	2	
B	36	16	/	/	3	14	/	32
C	39	3	3	/	/	11	1	21
D	17	3	/	/	/	3	/	8
E	19	6	/	/	/	14	/	18
Total	125	27	5	1	14	43	3	79

Le principe général retenu a été d'étalonner et de corrélérer en quelques points les différents résultats obtenus par les différentes méthodes, puis d'étendre la prospection à l'aide des outils les plus maniables, tels les pénétromètres dynamiques et le vibro-percuteur. La répartition des forages et essais par transect est donnée dans le tableau I.

Des essais d'eau ont été réalisés : un essai Lugeon dans les marnes en place, 79 essais Lefranc (vidange et suivi de la remontée en fonction du temps), de nombreux essais d'infiltration sous charge (double anneau) et plus de 200 essais d'infiltration sous tension (TRIMS).

Les caractéristiques physiques et mécaniques des marnes de la coulée ont été déterminées au laboratoire : limites d'Atterberg, % de CaCO_3 , granulométrie, minéralogie, teneurs en eau, densités humides et sèches, porosités, compacités, conductivités hydrauliques, caractéristiques hydrodynamiques (K_{sat} , courbes de rétention), caractéristiques intrinsèques (cisaillement rectiligne et triaxial), rhéologie. Les résultats complets seront trouvés dans Klotz (1999). Ils complètent ceux fournis par la littérature. Citons entre autres : Caris et Van Asch, 1991 ; Phan, 1993 ; Colas et Locat, 1993 ; Antoine *et al.*, 1995 ; Durville et Serratrice, 1997 ; Van Asch et Buma, 1997 ; Le Mignon, 1999.

4.3.2

Interprétation des essais pénétrométriques

Les résultats obtenus par les différentes techniques d'investigation mises en œuvre n'impliquent pas de commentaire particulier, et apparaissent conformes à leur domaine respectif de validité. Toutefois, nous souhaitons apporter un commentaire particulier sur les résultats obtenus par la pénétration dynamique dans ces formations meubles et, par endroits, saturées (NFP 94-115, 1996). Le pénétromètre dynamique utilisé a limité nos investigations à une profondeur maximale de 9,50 m, notamment en raison du développement de frottement latéral au passage de couches instables et imbibées. D'autre part, la présence de nombreux blocs de moraines ou de blocs de marnes peu déstructurés au sein de la masse a également limité nos investigations, car la pointe ne pouvait pénétrer ce matériau très résistant. Enfin, la présence de cailloux de moraine ou d'éclats de calcite au sein d'une couche moins résistante génère des pics localisés (faux refus) sur les pénétrogrammes. Dans les marnes *in situ* (ou dans un bloc de marnes noyé dans la coulée), la résistance de pointe Q_d augmente progressivement, atteignant des valeurs proches de 25 MPa ou plus quand la paléotopographie était atteinte. Quelquefois, il fut possible de forcer la pénétration, puis de continuer l'essai au sein d'une couche moins résistante. Le pénétrogramme D3 (Fig. 4) illustre clairement le problème majeur du faux refus, qui aurait pu partiellement être résolu en employant un mouton plus lourd chutant d'une plus grande hauteur.

Puisque l'interprétation des essais peut être difficile (essai en aveugle), plusieurs carottages, fosses manuelles (pelle/pioche) et essais pressiométriques ont permis d'étalonner les variations de résistance. Plus encore que les valeurs brutes de résistance de pointe Q_d , c'est l'allure des courbes qui est discriminante et permet l'interprétation des différentes couches. Sur la plupart des 125 pénétrogrammes, en accord avec les sauts éventuels de résistance (rupture dans les courbes, transition progressive), trois couches ont pu être déterminées dans la coulée.

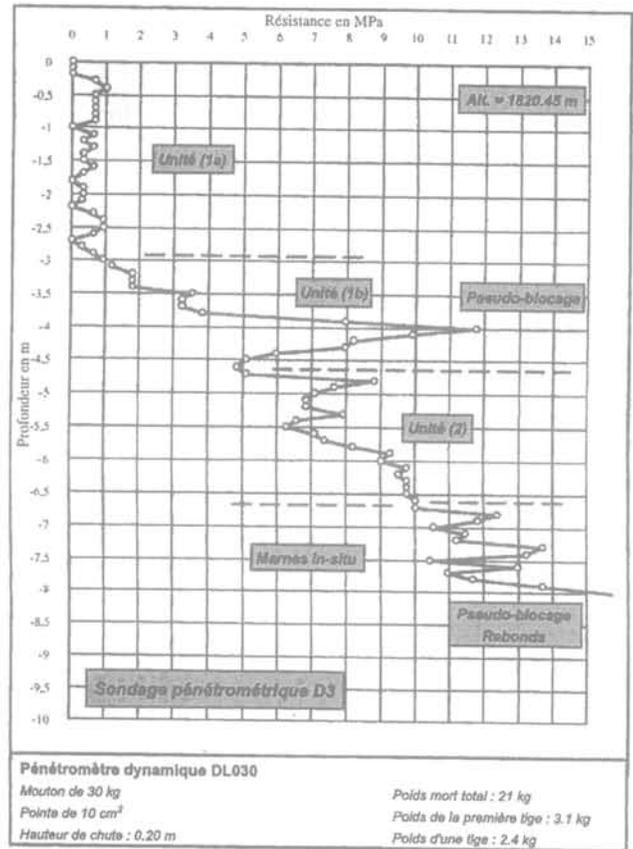


FIG. 4 Exemple de pénétrogramme.
Penetrometric curve.

4.4

La prospection géophysique

La prospection géophysique a consisté à développer une méthodologie d'étude (acquisition et traitement des données) pour des sites complexes et hétérogènes. La méthode électromagnétique transitoire (TDEM), couramment utilisée pour la recherche minière et hydrogéologique, a été mise en œuvre pour la première fois sur ce mouvement de terrain. Les méthodes électriques et électromagnétiques ont fait l'objet de nombreuses adaptations de mise en œuvre et d'interprétation avec le développement d'outils d'interprétation conjointe (Schmutz, 2000 ; Schmutz *et al.*, 2000).

Les méthodes électriques à courant continu, et électromagnétiques dans les domaines temporel et fréquentiel mesurent le même paramètre physique, à savoir la résistivité électrique des terrains qui est fortement corrélée à la teneur en eau et en argile. Ces méthodes sont complémentaires du point de vue de la sensibilité aux terrains conducteurs/résistants, mais également de celui de la profondeur d'investigation. Bien que les mêmes profondeurs puissent être théoriquement atteintes, dans la pratique, la méthode électrique ne permet pas de prospecter à plus d'une dizaine de mètres. Cette limitation provient principalement de la topographie escarpée du site d'étude qui ne permet pas de réaliser des profils d'une longueur supérieure à 50 m environ, des variations latérales de structure qui augmentent avec cette distance, et de la faiblesse des valeurs de résistivité des terrains argilo-marneux. Le TDEM, quant à lui, permet d'atteindre des profondeurs

de 30 à 40 m avec un dispositif d'extension limitée, mais il est aveugle sur les 4-5 premiers mètres.

La masse accumulée et la roche *in situ* diffèrent par leurs teneurs en eau, leurs porosités et leurs compacités. Pour ces raisons, plusieurs méthodes complémentaires ont été utilisées pour répondre à la complexité du site. Les méthodes de mesure de la résistivité électrique (électrique par courant continu et TDEM) ont été choisies en raison de la présence supposée d'une nappe jusqu'à la base de la coulée. La sismique réfraction a été mise en œuvre pour déterminer les variations latérales d'épaisseur et la stratification interne de la coulée à partir des contrastes de vitesses de propagation des ondes sismiques.

4.4.1

Les outils et dispositifs utilisés

Les fondements des méthodes géophysiques sont développés dans Turner et Schuster (1996), et Reynolds (1997), et plus particulièrement dans Kaufmann et Keller (1983) et Descloîtres (1998) pour la méthode TDEM désormais bien établie. Ainsi, nous ne développerons ni les principes de base théoriques et les domaines d'application des différentes méthodes retenues, ni les différents dispositifs utilisés. Il est à noter également qu'une prospection Slingram, méthode électromagnétique à faible nombre d'induction, a été réalisée sur une zone d'environ 150 m de large et 100 m de long et s'est révélée être un bon outil de reconnaissance des zones de conductivités

différentes. L'interprétation qualitative obtenue est en accord la plupart du temps avec les résultats et observations disponibles (Schmutz, 2000).

• La prospection électrique

L'équipement de prospection électrique utilisé est composé d'un résistivimètre Syscal R1 (Iris Instruments) et d'un dispositif multi-électrodes de trente-deux électrodes comprenant un microprocesseur de pilotage des mesures. Cette technique instrumentale (panneau multi-électrode) permet d'acquérir, après l'installation du dispositif, un grand nombre de mesures correspondant aux combinaisons de quatre électrodes parmi toutes celles disponibles. Le dispositif de prospection pôle-pôle (caractérisé par une électrode d'injection et une électrode de mesure, placées à l'infini) a été employé car il a l'avantage de minimiser le nombre d'électrodes nécessaires à la réalisation d'un profil. Par ailleurs, le signal décroît en $1/r$ contre $1/r^2$ ou $1/r^3$ pour les dispositifs Wenner, Schlumberger ou dipôle-dipôle, ce qui se traduit par une profondeur d'investigation plus importante. En revanche, le dispositif pôle-pôle est le moins sensible aux hétérogénéités de surface, latérales et locales, ce qui constitue un inconvénient dans la recherche des discontinuités latérales. Trois campagnes (mai 1997, octobre 1997 et octobre 1998) ont permis de réaliser plus de 300 sondages avec un espacement constant de 4 m entre deux sondages successifs.

• La prospection TDEM

Une prospection TDEM a été entreprise pour étendre la profondeur d'investigation des mesures de résistivité par courant continu au-delà d'une dizaine de mètres. La technique TDEM est une méthode de pros-

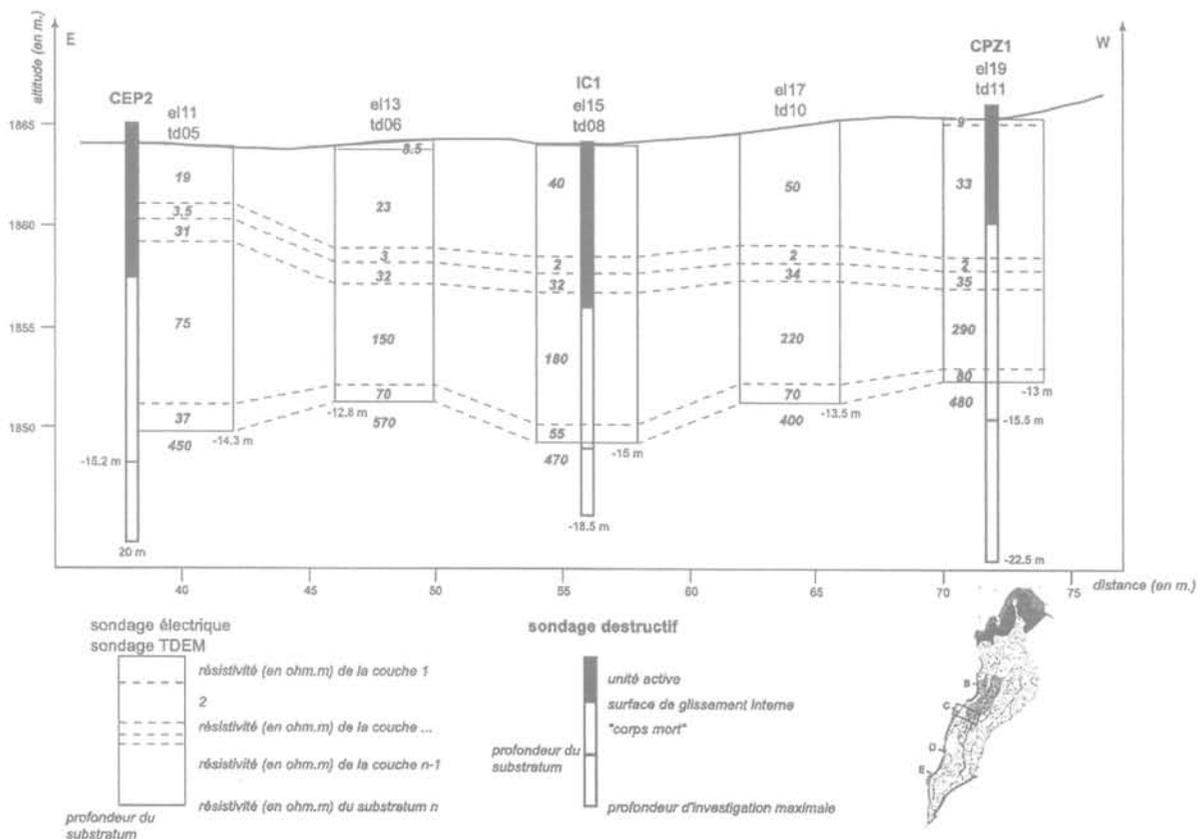


FIG. 5 Interprétation jointe de cinq couples de sondages TDEM-électrique avec sondages géotechniques sur le secteur Est du transect C (localisation sur la figure 2A).
Joint interpretation of 5 electrical-TDEM sounding pairs and comparison with geotechnical interpretation (see Figure 2A for location).

pection électromagnétique à source contrôlée. Les principaux avantages de cette méthode sont sa profondeur de pénétration importante pour un dispositif géométrique relativement peu étendu en surface, et une grande sensibilité en présence de corps conducteurs. L'équipement utilisé est un matériel PROTEM avec un émetteur EM47 (Geonics Ltd.) spécialement conçu pour des investigations peu profondes. Après une recherche préalable sur le site, les caractéristiques du dispositif, le mieux adapté pour cette étude sont : une boucle d'émission monopole de 5 m x 5 m, une distance entre les centres des bobines émettrice et réceptrice de 12,5 m. Le profil TDEM est réalisé de la même manière qu'en prospection électrique en déplaçant le dispositif de géométrie et de dimensions fixes le long d'un transect.

Plus de 200 sondages ont été réalisés lors de trois campagnes en mai 1997, octobre 1997 et juillet 1999, principalement sur les transects B et C. La distance entre deux points de sondages est de 5 m.

Puisque seule une interprétation 1-D était envisageable pour la méthode TDEM, il a été vérifié *a priori* que l'hypothèse d'un milieu tabulaire pouvait être utilisée localement, malgré la complexité 3-D du site. Cette vérification a consisté à comparer les enregistrements de sondages azimutaux, c'est-à-dire réalisés successivement à partir d'un même point central en déplaçant dans les quatre directions cardinales le dispositif d'acquisition (boucle émettrice et réceptrice). L'hypothèse est vérifiée si les enregistrements sont superposables, ou si les valeurs obtenues après interprétation des quatre sondages se situent dans la même gamme d'équivalence représentant toutes les solutions admissibles pour un même jeu de données. L'invariance a été vérifiée loin des échines, dans le compartiment central de la coulée. En revanche, à proximité des échines affleurantes ou sub-affleurantes, l'interprétation 1-D n'est plus valable. Ceci constitue un des résultats importants de ces travaux, car cela signifie qu'une acquisition et une interprétation 1-D sont suffisantes sous certaines conditions.

• La prospection sismique-réfraction

Deux campagnes de sismique réfraction comportant un total de 62 tirs suivant six profils différents ont été réalisées en mai 1997 et mai 1998. L'objectif de ces profils était de déterminer l'épaisseur et la structure interne de la coulée, parallèlement et perpendiculairement à son sens d'écoulement. Les profils ont été enregistrés à l'aide d'un système d'acquisition sismique à 24 traces régulièrement espacées de deux (ou quatre) mètres le long des profils. Des tirs à l'explosif (100 ou 200 g de cordeau détonnant) ont permis d'obtenir des enregistrements de bonne qualité.

Les vitesses moyennes obtenues sont en accord avec celles trouvées dans la littérature pour ce type de roches. Lorsque le terrain peut être considéré comme localement tabulaire, le modèle de terrain est globalement compatible avec celui obtenu par la géotechnique et par l'interprétation conjointe des méthodes électriques et électromagnétiques.

4.4.2

L'inversion conjointe de données électriques et TDEM

Précisons au préalable que les valeurs de résistivités apparentes obtenues avec les différentes méthodes

ne sont pas comparables, car elles sont dépendantes de la profondeur d'investigation et de la sensibilité aux conducteurs, c'est-à-dire du dispositif de mesure utilisé. Les résultats des sondages TDEM et électriques, et l'interprétation d'un panneau électrique (profil C) et des sondages TDEM en variation continue ont été donnés dans Schmutz *et al.* (1999). Nous choisissons de présenter les résultats les plus intéressants obtenus par une inversion conjointe de données électriques et TDEM.

Les sondages sur lesquels un traitement d'inversion conjointe a été effectué se situent dans une zone où l'hypothèse d'un milieu localement tabulaire est vérifiée. L'interprétation peut être effectuée après inversion en mode multicouche ou à « nombre minimum de couches ». Le premier mode permet de connaître la variation de la valeur de résistivité avec la profondeur et d'évaluer le nombre de terrain minimal. Il ne permet toutefois pas de connaître la profondeur de ces terrains. C'est pourquoi l'interprétation en nombre « minimal » de couches est indispensable, même si en raison de la non-unicité de la solution due au principe d'équivalence, elle reste délicate à employer. Ainsi un modèle mathématiquement correct (au sens des erreurs quadratiques moyennes) peut être géologiquement totalement aberrant. En revanche, la famille des solutions se réduit considérablement lorsqu'on inverse de manière conjointe deux jeux de données électrique et TDEM, car cette combinaison optimise leurs sensibilités différentes (Schmutz *et al.*, 2000).

L'inversion conjointe a été réalisée à partir des données enregistrées sur le transect C qui bénéficie des forages géotechniques identifiant le toit du substratum. Le schéma général (Fig. 5) consiste en une alternance de terrains conducteurs et résistants. L'interprétation de ces différentes couches est donnée dans le paragraphe 5.3.1.

Ainsi, dans le cas de variations latérales modérées (pas d'échines affleurantes ou sub-affleurantes), une détermination très précise de la structure peut être obtenue en accord avec les informations disponibles par ailleurs (géotechnique, photographies aériennes), et ce, sans fixer de paramètre *a priori* dans le modèle.

5

Synthèse et résultats

Les investigations, traitements et analyses fournissent des informations de diverses natures, qualitatives ou quantitatives qui peuvent être comparées, ajustées et validées. Ainsi, des interprétations objectives et étayées sont proposées sur l'évolution historique du mouvement, la position et forme de la paléotopographie, la structure interne de la coulée de débris dans la zone d'accumulation et dans la zone d'ablation. Un modèle conceptuel d'évolution du glissement-coulée est aussi proposé.

5.1

L'évolution historique du mouvement

L'analyse multi-temporelle des ortho-images et MNT permet de situer les secteurs et les périodes de déclenchement et d'extension du glissement-coulée, de définir des vitesses de recul de l'escarpement principal

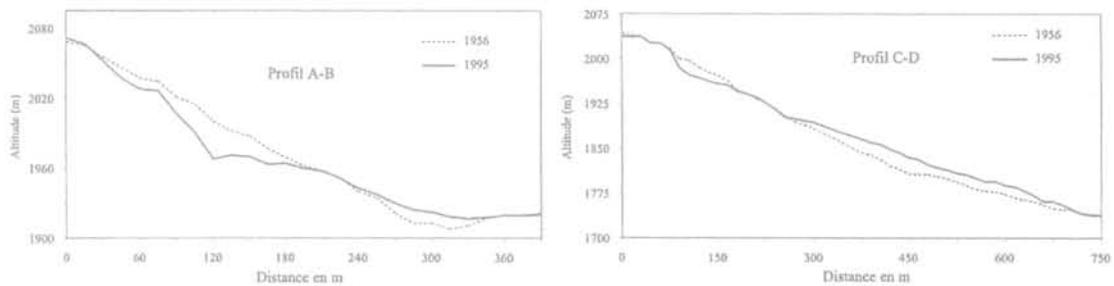
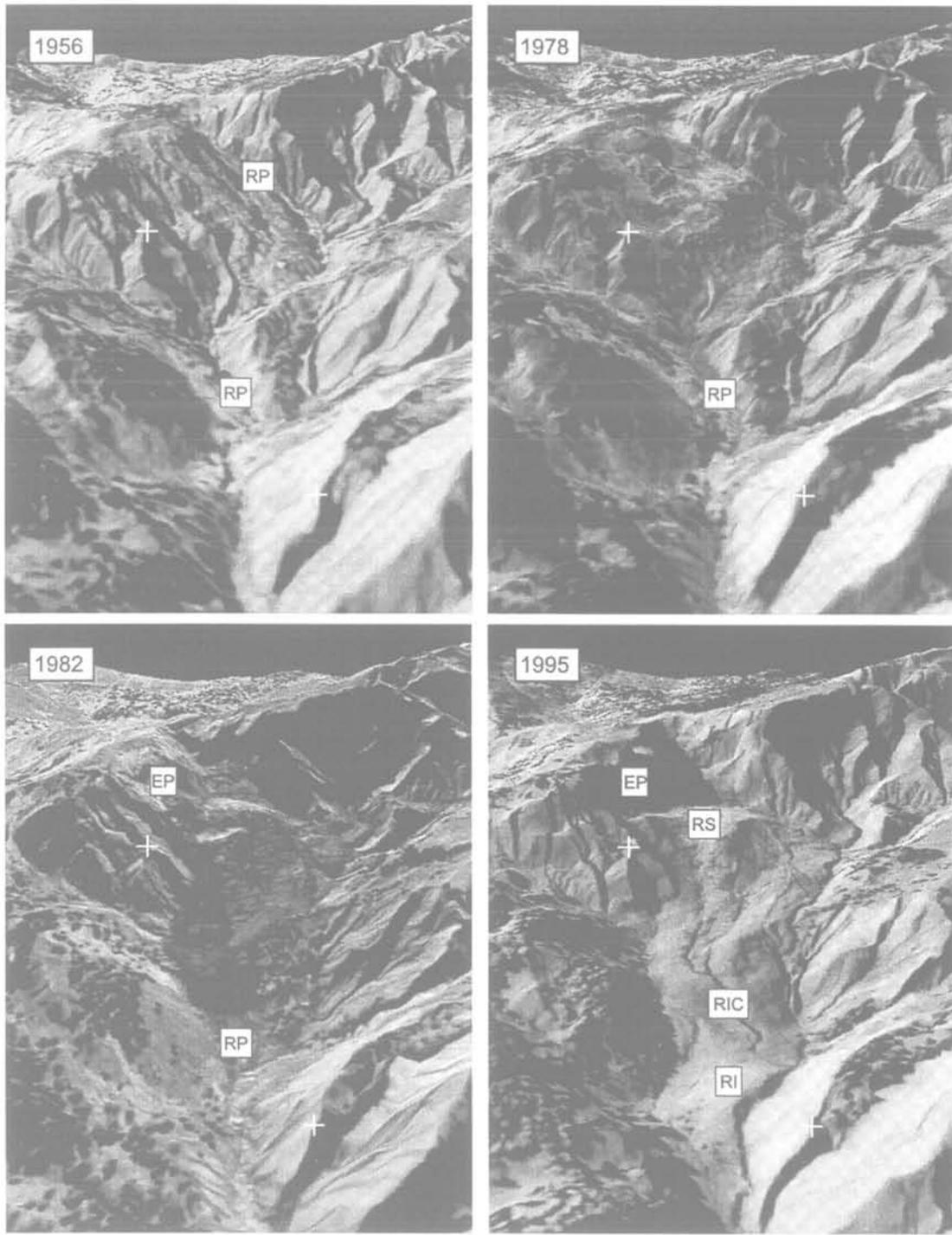


FIG. 6 Vues perspectives du bassin torrentiel des roubines en 1956, 1978, 1982 et 1995. RP : ravine principale ; EP : escarpement principal ; RS : replat supérieur ; RIC : ravine intra-coulée. Exploitations quantitatives des traitements photogrammétriques numériques – profils multi-temporels.

Perspective views of the Super-Sauze torrential basin in 1956, 1978, 1982 et 1995. RP : main gully ; EP : present time main scarp ; RS : upper shelf ; RIC : intra-flowing gully. Quantitative interpretations from digital photogrammetric results – multi-temporel topographic profiles.

ou des vitesses d'extension de la coulée de débris (Weber, 2001). Les quatre vues perspectives de 1956, 1978, 1982 et 1995 (Fig. 6) permettent de l'illustrer. Celles de 1971 et 1978 seront trouvées dans Weber et Hermann (2000).

Avant 1956, de nombreuses ravines, parallèles et certaines coalescentes se sont développées (Fig. 2B) où les terrains de couverture morainique sont peu présents. En contrebas du glacier rocheux, une ravine présente un recul, une largeur et une profondeur largement plus importantes que ses voisines ; la moraine y est déjà largement entaillée par le ruissellement superficiel.

Entre 1956 et 1971, des glissements superficiels s'opèrent, essentiellement aux dépens de la moraine, et provoquent un remplissage partiel des ravines du bassin. La ravine principale et la plupart des crêtes d'interfluvés émergent encore entre ces accumulations.

Entre 1971 et 1978 puis surtout entre 1978 et 1982, des ruptures importantes affectent le substratum marneux. Elles se traduisent par l'extension croissante d'un escarpement principal dans la partie supérieure du bassin. Les marnes déstabilisées se transforment en coulées visqueuses fossilisant les ravines situées en contrebas.

Dans les années 80-90, si le recul de l'escarpement est modeste à l'amont, la coulée s'est considérablement développée (en largeur, en longueur et en épaisseur) dans le thalweg principal.

Ainsi, les mobilisations de matériau les plus importantes ont été détectées entre 1971 et 1982. Les profils topographiques linéaires (Fig. 2A) issus des différents modèles altimétriques montrent très bien l'inversion progressive du relief qui s'opère le long d'un profil longitudinal entre zones d'ablation et d'accumulation (Fig. 6).

5.2

Position et forme de la paléotopographie

La position et la forme de la paléotopographie ont été définies en croisant les informations issues des investigations *in situ*, des observations morphologiques de surface et des photo-interprétations des photographies ortho-rectifiées de 1956 et 1995 (Flageollet *et al.*, 2000). L'ancienne topographie est constituée par une série de crêtes quasi-intactes dans la zone d'accumulation (Fig. 7). Au droit du transect B, les échines (4) et (3) émergent de la coulée sur quelques mètres de longueur (Fig. 2A, Fig. 7) alors que l'échine (7) est située à quelques mètres sous la surface. La coulée présente une épaisseur maximale dans l'axe de la ravine principale du bassin torrentiel de 1956. Elle atteint :

- un maximum de 20 m dans la zone d'ablation (profil A) ;
- un maximum de 8 m le long du profil B dans la zone d'accumulation ;
- une vingtaine de mètres dans la partie est du profil C qui correspond à la zone de confluence des ravines du bassin torrentiel de 1956.

Puis, l'épaisseur diminue progressivement vers l'aval (8 à 9 m le long du profil E et quelques mètres au pied de la coulée). L'incertitude sur l'épaisseur est minimale sur les profils B à E. En revanche, la position du substratum dans la zone d'ablation est encore incertaine, en raison des nombreux pseudo-blocages obtenus sur les essais pénétrométriques du transect A

(blocs morainiques et nombreux panneaux et blocs de marnes structurées). Les sondages au pénétromètre réalisés en partie inférieure de la coulée, à partir du profil D atteignent des profondeurs supérieures à celles obtenues dans les sondages de la partie amont. Cela traduit, d'une part un nombre plus réduit de blocs de moraines, et d'autre part une plus grande fragmentation des blocs de marnes au sein de la formation remaniée (Flageollet *et al.*, 2000).

Ce compartimentage lié à la présence des ravines et des échines est également mis en évidence grâce aux mesures des déplacements de surface. Les compartiments présentent des comportements cinématique, hydrodynamique et mécanique différents, variables saisonnièrement en relation avec les conditions climatiques (Flageollet *et al.*, 2000 ; Malet *et al.*, 2001).

5.3

La structure interne de la coulée de débris

5.3.1

Dans la zone d'accumulation

La coulée constitue une langue hétérogène à forte matrice limono-sableuse mélangée à des débris morainiques. Dans la zone d'accumulation (transects B à E), trois couches « géotechniques » peuvent être identifiées, sur la base des critères de résistance, des contrastes dans la nature des matériaux et des déformations et cisaillements des tubes inclinométriques et piézométriques. La structure verticale de la coulée est composée (Fig. 7) :

- d'une unité superficielle épaisse de 5 à 9 m ($Q_d < 10$ MPa, $E_M < 15$ Mpa, vitesses de déplacement superficiel supérieure à 5 m/an). Une surface de glissement a été identifiée à une profondeur de l'ordre de 5 m sur le transect B et 8 m de profondeur sur le transect C. Selon la forme de la paléotopographie et la position saisonnière de la nappe, cette unité active peut être subdivisée en deux sous-unités (1a et 1b) ;

- d'une unité profonde ayant une épaisseur maximale de 10 m sur le transect C et de 5-6 m au droit du transect B. Sur la base des mesures inclinométriques et des essais pressiométriques ($E_M > 15$ Mpa, $Pl > 4$ Mpa), cette unité est considérée comme imperméable, très compactée, aux très faibles déplacements ou stable comme un « corps mort », comme cela avait été identifié à La Valette (Colas et Locat, 1993) ou sur la coulée de débris de Slumgullion (Varnes *et al.*, 1996).

La géophysique indique la même succession de couches avec des gammes de résistivité et de vitesses sismiques respectivement pour chaque couche de : 5-40 $\Omega.m$ et 450-600 m/s pour la couche 1 ; de 45-100 $\Omega.m$ et 450-600 m/s pour la couche 2 (corps mort) et $> 100 \Omega.m$ et 2 200-5 000 m/s pour le substratum (Schmutz *et al.*, 1999 ; Schmutz, 2000). Toutefois, l'interprétation jointe électrique-TDEM a permis de mettre en évidence des lits intermédiaires (Schmutz *et al.*, 2000) non détectés par la prospection géotechnique. Ils apparaissent cependant vraisemblables et constituent donc un apport efficace et inédit de l'inversion jointe. A partir du modèle géophysique en six couches (Fig. 5), en considérant un modèle général comprenant une masse

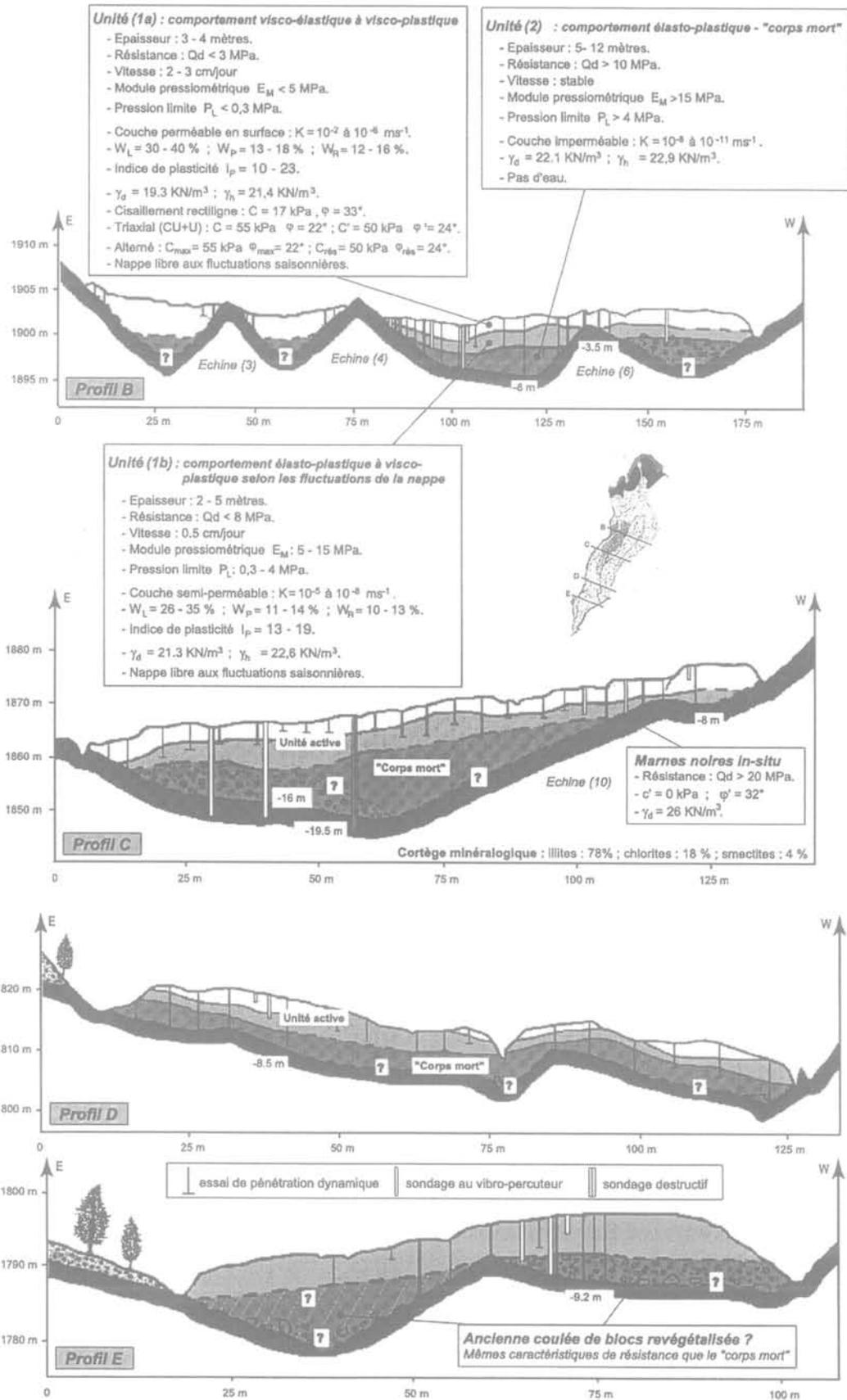


FIG. 7 Structure interne de la coulée dans la zone d'accumulation (localisation des profils sur la figure 2A).

Internal structure of the flow in the accumulation zone (cross-sections are localized on Figure 2A).

active superposée à une masse stabilisée, elle-même superposée au substratum, il s'agirait :

– d'une zone de transition d'épaisseur faible (0,7-0,9 m) de boue très lâche et humide entre la masse active et la

masse « stabilisée ». Cet horizon est le plus conducteur avec des résistivités peu contrastées (2-3 $\Omega.m$) et des facteurs d'anisotropie s'étendant de 0,35 à 1. Ces valeurs de résistivités correspondent aux résistivités mesurées dans les échantillons d'eau pure. Par ailleurs, aucun effet de polarisation provoquée dû à des minéraux métalliques ou argileux ne perturbe les mesures. De ce fait, cet horizon doit être saturé ;

– du toit de la masse stabilisée, sur une épaisseur très mince de 0,7-0,9 m, le matériau est compacté et « glacé », comme cela est parfois observé sur les surfaces de glissement. Les résistivités sont supérieures au précédent terrain (31-35 $\Omega.m$). Le facteur d'anisotropie moyen est de 0,9-1 ;

– de la transition entre la masse stabilisée et le substratum. D'une faible épaisseur (0,7-1,4 m), cet horizon peut correspondre au manteau d'altération des marnes en place (altérite et régo-lite mélangé à des formations de pente) ou à des épandages de moraines (Weber, 2001). La gamme de résistivité varie de 37 à 80 $\Omega.m$ pour un facteur d'anisotropie compris entre 0,7 et 1.

5.3.2

Dans la zone d'ablation

A l'inverse, dans la zone d'ablation (transect A), la géométrie de la masse accumulée et la forme de la surface de rupture reste délicate à définir. Les trois forages

profonds EP5, EP8 et F1 localisent, respectivement, les marnes *in situ* à -19,50 m, -20,50 m et -8,85 m sous la surface topographique actuelle (Fig. 8A). Les profils photogrammétriques montrent un abaissement de l'altitude de 15 à 20 m entre 1956 et 1995 (Fig. 6). L'altitude des terrains en place s'est donc abaissée localement de 40 m au maximum avec un encaissement comblé sur la moitié environ de sa hauteur. La surface de rupture présente une forme irrégulière qui s'apparente à celles des ravines qui se trouvaient initialement 30 à 40 m au-dessus. La localisation des forages sur l'ortho-photographie de 1956 montre d'ailleurs que les différences de profondeur coïncident avec l'emplacement d'une ravine et de l'échine (4) du paléo-relief (Figs. 2B et 8B).

L'interprétation des profils inclinométriques (du 10 septembre au 1^{er} octobre 1996, date après laquelle la torpille était bloquée) et surtout le suivi des déplacements des têtes de forage (topométrie), de leur déformation puis cisaillement (passage de gabarits dans les tubages), d'octobre 1996 à juillet 2000, va aussi dans ce sens. Sur la coupe AA' de la figure 7a, les altitudes de cisaillement des tubages s'alignent parfaitement le long d'une surface de rupture située -8,50 m sous la surface topographique, vers 1 950 m d'altitude. Cette surface de glissement principale est calée et contrainte sur le toit d'échines, non tronquées lors du paroxysme du mouvement. Les déformations et cisaillements successifs des tubes au cours de leur déplacement permettent de proposer un profil interprétatif de vitesse (Fig. 8D). Il montre des déplacements qui s'amortissent, à partir de

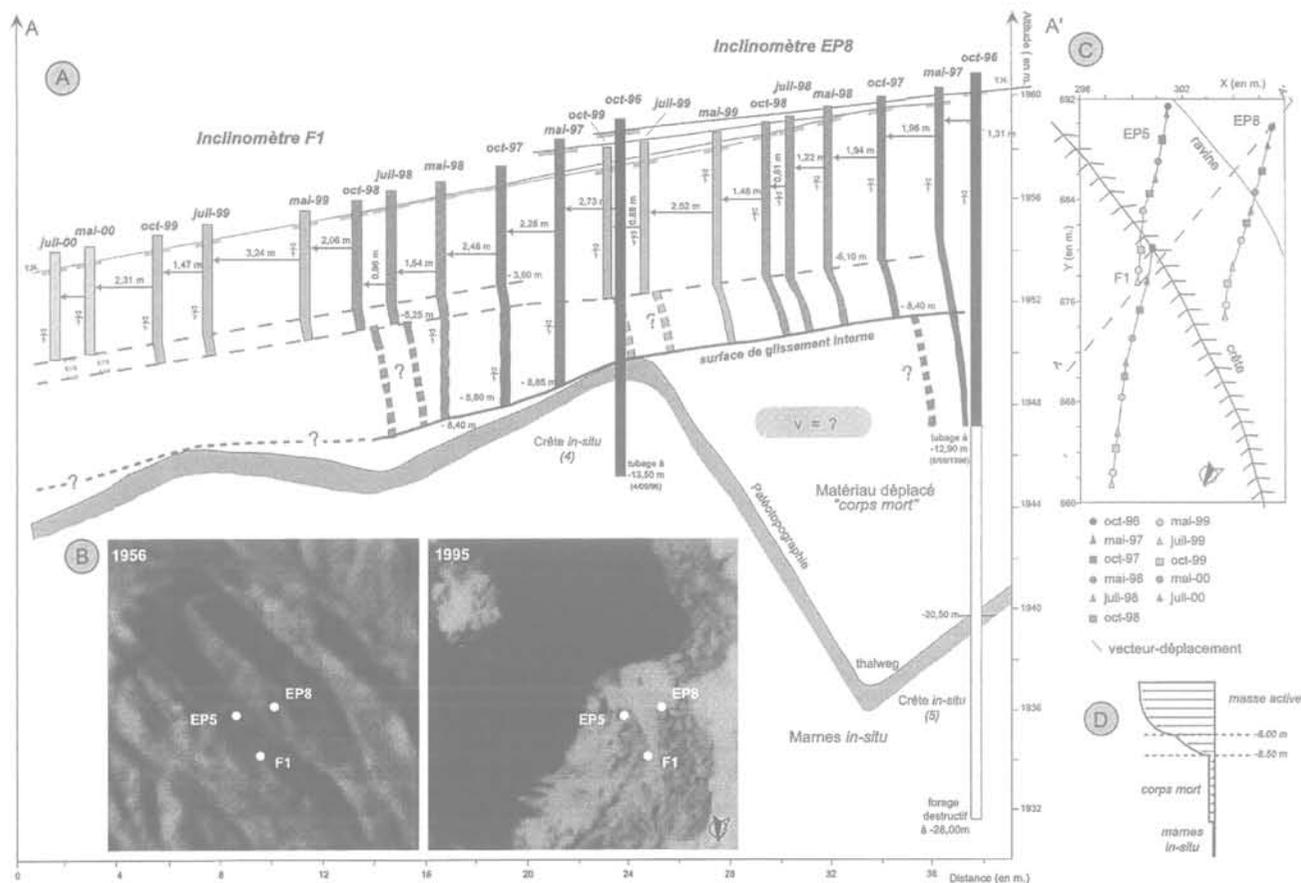


FIG. 8 Schéma interprétatif du suivi des inclinomètres du replat supérieur (zone d'ablation) entre 1996 et 2000 (8A), extrait des ortho-photographies de 1956 et 1995 et position respective des sondages (8B), vecteurs-déplacement des têtes de tubage (8C) et profil vertical de vitesse de la coulée (8D). Interpretative scheme of inclinometer position on upper shelf (ablation zone) between 1996 et 2000 (8A). 1956 and 1995 ortho-rectified pictures and respective location of drills (8B). Displacement-vectors of the head-tubes (8C) and velocity vertical profile of the flow (8d).

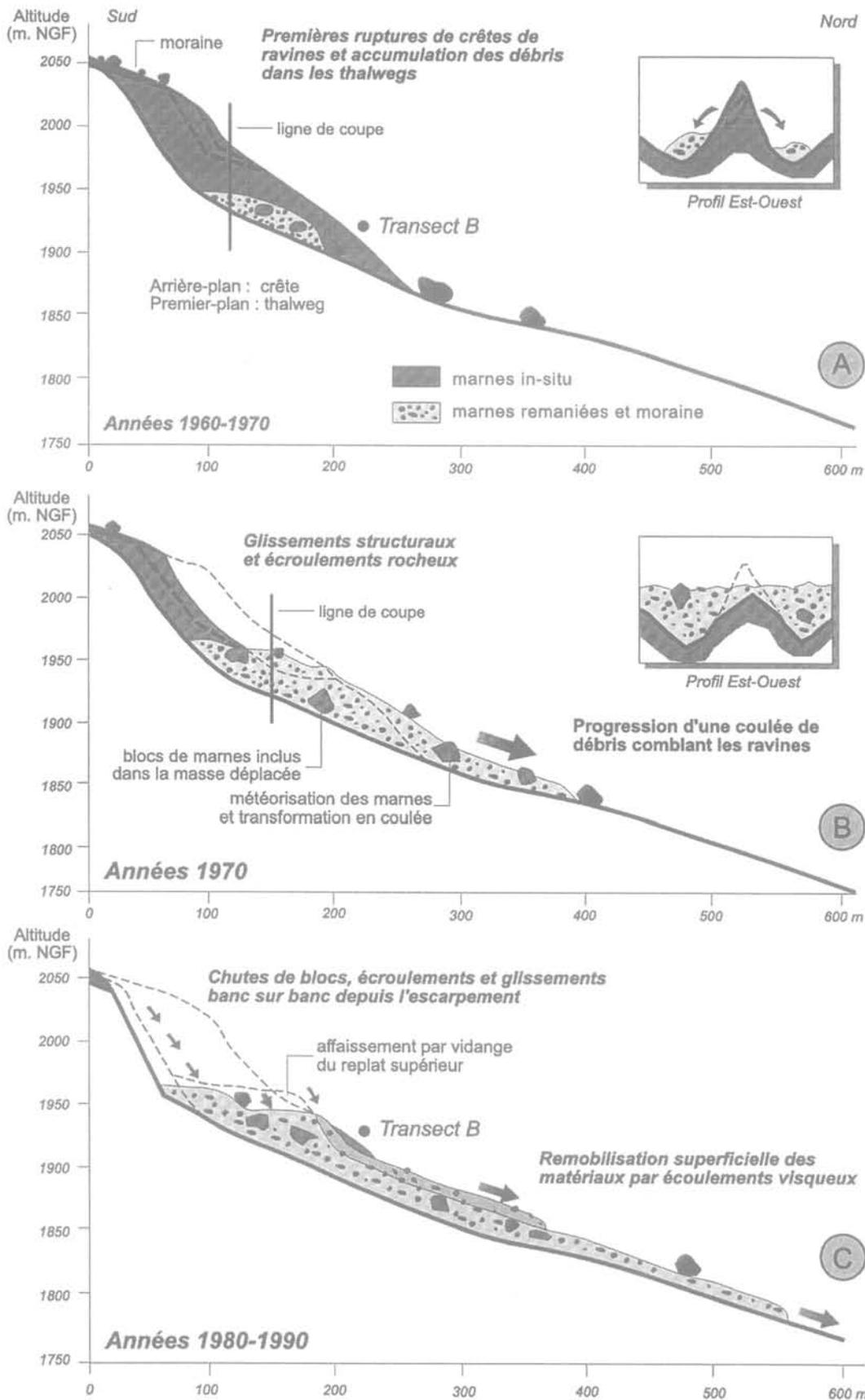


FIG. 9 Modèle conceptuel d'évolution du glissement-coulée de Super-Sauze.
Qualitative evolution model of the Super-Sauze earthflow.

DIAO : A. Bouzignou (CEREG, 1998). Modifié par J.-P. Mallet et D. Weber (CEREG, 2000).

3-4 m, progressivement vers la profondeur. Ce même modèle géotechnique peut être adopté dans la zone d'accumulation :

– masse active d'une épaisseur de 8 à 9 m, aux vitesses superficielles très variables, d'une zone à l'autre de la coulée, de 2 à plus de 10 m/an, avec une discontinuité

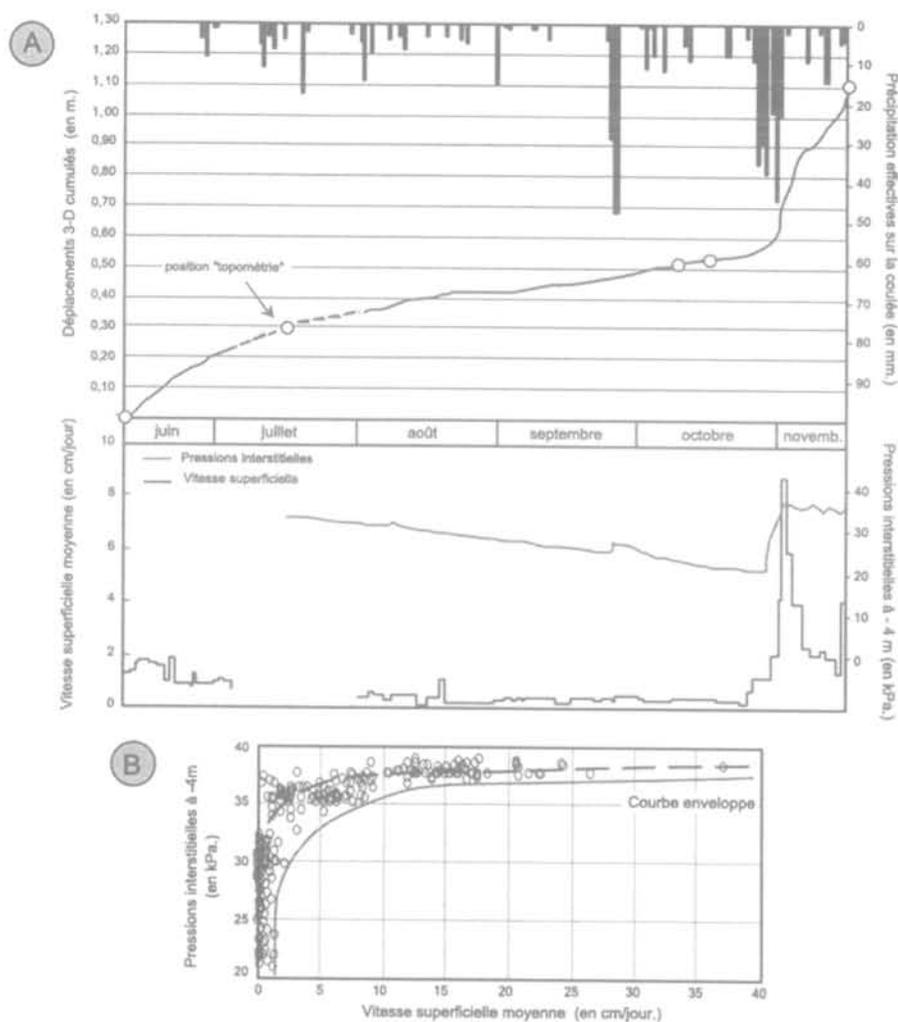


FIG. 10 Exemple de relation pluie-nappe-déplacements pour la période juin 1999-novembre 1999 sur le transect B (10A) et relation pressions interstitielles/vitesse superficielle moyenne (10B).

Example of relation between effective daily precipitation-pore water pressure-displacements (measured by extensometry and topometry) on the B cross-section between June to November 1999 (10A). Pore water pressure and mean surficial velocity (10B).

de vitesse vers -5-6 m, au comportement « rigide-plastique » sur les deux premiers mètres, puis élasto-plastique à « visqueux » en profondeur ;

- « corps mort » dans le fond des ravines, dont l'écoulement est bloqué par la topographie en échines.

Ce dernier point mérite un commentaire : les directions des vecteurs déplacements des sondages (Fig. 8C) sont obliques à transverses par rapport aux axes des crêtes et ravines contrairement à l'aval, dans la zone d'accumulation, où les vecteurs sont calés sur la paléotopographie (Malet *et al.*, 2001). Cela indique clairement que dans cette zone amont en pente forte, la gravité l'emporte sur l'influence de la paléotopographie.

5.4

Modèle conceptuel d'évolution du glissement-coulée

L'ensemble des informations ainsi que le suivi de la rupture d'une échine sur le versant ouest de la coulée (Malet *et al.*, 2000), permet de proposer un modèle

conceptuel qualitatif d'évolution du glissement-coulée. Le mouvement majeur s'est initié selon des glissements structuraux sur des discontinuités existantes (tectonique et schistosité) qui sont encore nettement visibles sur l'escarpement principal. Les cassures et déformations sont accentuées par une faille localisée dans l'axe du bassin torrentiel. Sur le flanc est, les couches marneuses sont ployées et relevées avec des pendages parfois supérieurs à 60°. On comprend dès lors l'ampleur du phénomène (en terme de volume de matériau mobilisé), sa complexité (rupture de plusieurs échines) et sa progressivité. Les ruptures dans les marnes se sont initiées, dans les années 70, dans la partie haute des échines, avant de se propager vers l'aval ; en même temps, le matériau s'accumule dans les ravines (Fig. 9A). Puis, par étapes, l'escarpement recule, alors que les échines continuent à s'écrouler et le matériau à combler les thalwegs. Des panneaux et des dièdres, de plusieurs mètres cubes, sont emballés dans une matrice argilo-marneuse hétérogène et progressent dans les ravines. L'élévation du niveau d'accumulation dans les ravines fossilise progressivement l'ensemble de la paléotopographie et recouvre les échines (Fig. 9B). Ainsi, la coulée, très hétérogène se développe dans le

chenal d'écoulement et « charrie » des débris de toutes tailles. La coulée de débris continue à progresser rapidement vers l'aval (plus de 180 m depuis 1982). Mais, son alimentation est réduite à de petites chutes de blocs ou de plaquettes issues de l'escarpement. La conséquence est un démaigrissement de la zone d'accumulation amont et la réapparition des anciennes échines fossilisées le long du transect B (Fig. 9C). Comme souligné précédemment, la paléotopographie joue un rôle essentiel dans le développement de la coulée en chenalisant les écoulements sauf dans la partie amont en forte pente (cf. précédemment). Le recoupement des analyses photogrammétriques avec les informations géotechniques nous permet d'estimer un volume global actuel de matériaux remaniés de 650 000 m³.

5.5

Relations pluie-nappe-déplacements

Les vitesses d'avancée de la coulée varient grandement, dans l'espace et le temps, avec des valeurs de 0,5 à 10 cm/jour, voire des pics très ponctuels pouvant atteindre 40 cm/jour (Fig. 10A), selon les compartiments. Les vitesses les plus importantes sont localisées en partie amont, dans l'axe de la coulée. Cette variation spatiale et temporelle est directement liée aux battements de la nappe et aux pressions interstitielles générées. En effet, le comportement piézométrique de la coulée montre une grande amplitude des variations de pression (jusqu'à 20 kPa) avec des recharges brutales consécutives à la fonte de la neige au printemps, ou à des périodes climatiques défavorables (pour un seuil de 50 à 60 mm de précipitation efficace cumulée) à l'automne (Malet *et al.*, 2001). Les épisodes de nappe haute sont brefs et la pression maximale ne dépasse pas 35 kPa pour des piézomètres situés à 4 m de profondeur.

Les pics de vitesses correspondent aux pics de pressions interstitielles. Les accélérations (vitesses supérieures à 10 cm/jour) s'opèrent dès que la nappe atteint un seuil de -0,30 m/T.N. Le rôle des pressions interstitielles est renforcé par la pente en long du terrain qui, outre l'influence de la paléotopographie, accentue les différences de vitesses entre compartiments. La figure 10A montre un exemple d'enregistrement des relations pluie-nappe-déplacements (de juin à novembre 1999) sur le transect B.

La dynamique de la coulée est contrôlée par des seuils de pressions interstitielles. Le mouvement s'initie (Fig. 10B) dès que la nappe se situe entre -0,50 et -0,40 m de profondeur (i.e. 35 kPa à -4 m). De même, le mouvement diminue progressivement dès que le niveau redescend en dessous de -0,80 m de profondeur (i.e. 32 kPa à -4 m). La relation entre la pression interstitielle et les vitesses de déplacement peut être modélisée simplement par une régression hyperbolique avec un coefficient de détermination de 0,92. Le nuage de point est limité par une courbe enveloppe qui délimite le champ d'influence des pressions interstitielles sur la cinématique de la coulée. Dès que la nappe se situe au-dessus de -0,80 m par rapport à la surface, les mouvements se produisent avec une vitesse supé-

rieure à 2-3 cm/jour, l'amplitude atteinte étant alors fonction de l'intervalle de temps où le niveau de la nappe reste supérieur à un seuil de pression de 32 kPa.

6

Conclusion

Dans des bassins marneux fortement ravinés, des glissements structuraux (banc sur banc) se produisent, dans les secteurs où les avals-pendages atteignent des valeurs proches ou supérieures de celles de l'angle de frottement, en raison de la réduction voire de l'annulation de la cohésion liée à la décompression et des éventuelles surpressions liées aux infiltrations dans les différentes diaclases et interfaces. En évoluant, les matériaux issus de ces glissements forment une coulée de débris qui progresse en fossilisant un bassin torrentiel.

Sur ce site complexe, l'approche multidisciplinaire associant géomorphologie, géotechnique et géophysique fournit de précieux résultats complémentaires. Leurs comparaisons, ajustements, validation ont permis de reconstituer l'évolution historique du mouvement, de proposer un modèle conceptuel d'évolution, de définir la position et forme de la paléotopographie, la structure interne de la coulée de débris dans la zone d'accumulation et dans la zone d'ablation dans une gamme de précision tout à fait satisfaisante.

L'initiation des déplacements s'effectue sous l'action du déjaugage (pression interstitielle) et du changement d'état du matériau (du comportement élasto-plastique au comportement visco-élastique à visco-plastique). Le mouvement est ensuite uniquement entretenu sous l'action de la gravité, avec un amortissement progressif des vitesses lié aux forces de frottement et au ressuyage des matériaux.

Le comportement dynamique de ce type de coulée de débris, fréquent dans les Terres noires, doit donc être modélisé (thèse en cours, J.-P. Malet) en relation avec les conditions hydrodynamiques afin d'évaluer la probabilité de transformation rapide, de tout ou partie, en coulées boueuses ou en laves torrentielles comme cela a déjà été observé en mai 1999. De même, la compréhension des relations entre ravinement et initiation de mouvements gravitaire est essentielle pour la gestion de tels bassins torrentiels.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été engagée en juin 1996 avec le soutien financier du programme de recherche européen NEWTECH (New Technologies for Landslide Hazard Assessment and Management in Europe). Puis, elle a été financée par le CNRS (Centre national de la recherche scientifique) dans le cadre du Programme national sur les risques naturels (PNRN) de l'Institut national des sciences de l'univers (INSU), contrat PNRN 97/98/99-34MT (contribution n° 276). Elle se poursuit actuellement dans le cadre de l'Action concertée incitative (ACI Prévention des catastrophes naturelles) du ministère de la Recherche.

- Antoine P., Giraud A., Meunier M., Van Asch T.W.J. – « Geological and geotechnical properties of the "Terres noires" in southeastern France : weathering, erosion, solid transport and instability ». *Engineering Geology* n° 40, 1995, p. 223-234.
- Caris J.P.T., Van Asch T.W.J. – « Geophysical, geotechnical and hydrological investigations of a small landslide in the French Alps ». *Engineering Geology* n° 31, 1991, p. 249-276.
- Colas G., Locat J. – « Glissement et coulée de La Valette dans les Alpes-de-Haute-Provence : présentation générale et modélisation de la coulée ». *Bulletin de Liaison des Laboratoires des ponts et chaussées*, n° 187, 1993, p. 19-28.
- Descloîtres M. – « Les sondages électromagnétiques en domaine temporel (TDEM) : application à la prospection d'aquifères sur les volcans de Fogo (Cap Vert) et du Piton de la Fournaise (La Réunion) ». Thèse de doctorat, UPMC, Paris, 1998, 228 p.
- Durville J.-L., Serratrice J.-F. – « Description des roches et des massifs rocheux, exploitation de deux bases de données ». *Bulletin de liaison des Laboratoires des ponts et chaussées*, n° 211, 1997, p. 73-87.
- Flageollet J.-C., Malet J.-P., Maquaire O. – « The 3-D structure of the Super-Sauze earthflow : a first stage toward modeling its behaviour ». *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, vol. 9, n° 25, 2000, p. 785-791.
- Klotz S. – « Caractéristiques physiques et mécaniques des marnes noires callovo-oxfordiennes : application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France) ». Mémoire de DEA « Systèmes spatiaux et environnement », ULP, Strasbourg, 1999, 161 p.
- Kaufmann A.A., Keller G.V. – *Frequency and transient soundings*. Amsterdam, Elsevier, 1983, 686 p.
- Le Mignon G. – « Glissements et coulées boueuses : analyse et modélisation. Application au cas de La Valette (Alpes-de-Haute-Provence, France) ». Mémoire de DEA « Géomatériaux », ENSMP-ENPC, Paris, 1999, 45 p.
- Malet J.-P. – « Caractérisation et modélisation hydromécanique du glissement-coulée de Super-Sauze dans l'optique de la gestion du risque ». Mémoire de DEA « Systèmes spatiaux et environnement », ULP, Strasbourg, 1998, 176 p.
- Malet J.-P., Maquaire O., Klotz S. – « The Super-Sauze flowslide (Alpes-de-Haute-Provence, France). Triggering mechanisms and behaviour ». *Proceedings of the VIIIth International Symposium on Landslides*. London, T. Telford, 2000a, p. 999-1005.
- Malet J.-P., Hartig S., Calais E., Maquaire O. – « Apport du GPS au suivi en continu des mouvements de terrain. Application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France) ». *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Série IIa*, vol. 12, n° 331, 2000b, p. 175-182.
- Malet J.-P., Maquaire O., Calais E. – « The use of Global Positioning System techniques for the continuous monitoring of landslides. Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-de-Haute-Provence, France) ». *Geomorphology*, 2001, à paraître.
- McNeill J.D. – Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding ». Technical Note TN-27, Geonics, 1994, 15 p.
- Phan T.S.H. – « Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres noires du Sud-Est de la France ». Thèse de doctorat, UJF, Grenoble, 1993, 246 p.
- Reynolds J.M. – *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley Ed., 1997, 796 p.
- Schmutz M., Guérin R., Maquaire O., Descloîtres M., Schott J.J., Albouy Y. – « Apport de l'association des méthodes TDEM (Time-Domain Electromagnetism) et électrique pour la connaissance de la structure interne du glissement-coulée de Super-Sauze (Bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence, France) ». *Comptes rendus de l'Académie des sciences, Série IIa*, n° 328, 1999, p. 797-800.
- Schmutz M. – « Apport des méthodes géophysiques à la connaissance des glissements-coulées développés dans les marnes noires. Application à Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France) ». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2000, 230 p.
- Schmutz M., Albouy Y., Guérin R., Maquaire O., Vassal J., Schott J.J., Descloîtres M. – « Joint electrical and time domain electromagnetism (TDEM) data inversion applied to the Super-Sauze earthflow (France) ». *Surveys in Geophysics* n° 21, 2000, p. 371-390.
- Turner A.K., Schuster R.L. – *Landslides : investigation and mitigation*. Special report 247. Transportation research board, National Research Council, Washington, D.C., National Academy Press, 673 p. In particular chapter 10 « Subsurface exploration » by McGuffey V.C., Modeer VA Jr, Turner AK, 1996, p. 231-277.
- Van Asch T.W.J., Buma J.T. – « Modelling groundwater fluctuations and the frequency of movement of a landslide in the Terres noires, region of Barcelonnette (France) ». *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 22, vol. 2, 1997, p. 131-141.
- Varnes D.J., Smith K.S., Savage W.Z., Powers P.S. – « Deformation and control surveys, Slumgullion landslide ». *US Geological Survey Bulletin* 2130 1996, p. 43-49.
- Weber D., Herrmann A. – « Contribution de la photogrammétrie numérique à l'étude spatio-temporelle de versants instables : l'exemple du glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France) ». *Bulletin de la Société géologique de France* vol. 6, n° 171, 2000, p. 637-648.
- Weber D. – « Contribution de la géomorphologie à la connaissance des mouvements de terrains dans les Terres noires alpines : le glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France) ». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2001, 311 p. et annexes.