



Ecole Nationale des Ponts et Chaussées

Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France).

Thèse
présentée par
Gwennou LE MIGNON

pour obtenir le grade de
Docteur
de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées
en Géologie de l'Ingénieur

Directeur de thèse : Roger COJEAN

Présentée et soutenue publiquement le 15 mars 2004, devant le jury composé de :

MM. Olivier MAQUAIRE	Rapporteur
Aurèle PARRIAUX	Rapporteur
Hocine BENDJOURI	Examineur
Bernard CERVELLE	Examineur
Blaise SOUFFACHÉ	Examineur

AVANT PROPOS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui ont permis qu'il se fasse.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur Michel Deveughèle, directeur du CGI, pour m'avoir accueilli et soutenu ma recherche dans le domaine des risques naturels.

Ma reconnaissance est toute acquise à mon directeur de thèse, Monsieur Roger Cojean, Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris et à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, qui m'a donné les bases de mon travail, l'a orienté et l'a suivi avec attention et patience.

Je remercie également Monsieur P. Veltz, Directeur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ainsi que l'ensemble de la direction de la Recherche pour la bourse d'étude qu'ils m'ont accordée.

Je voudrais remercier particulièrement Monsieur Olivier Maquaire, Maître de Conférence, H.D.R., à l'Université de Louis Pasteur (Strasbourg), Institut de Physique du Globe, et Monsieur Aurèle Parriaux, Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Geolep-Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement, pour leur participation en tant que rapporteurs.

Je suis reconnaissant à Monsieur Blaise Souffaché, Docteur d'Etat, Maître de Conférence à l'Université d'Orsay, d'avoir accepté d'examiner ce travail. Je le remercie particulièrement de m'avoir donné l'opportunité d'une vue d'ensemble de mon site d'étude : la vallée de l'Ubaye, grâce à ses compétences de pilote.

Je suis également reconnaissant à Monsieur Bernard Cervelle, Professeur à l'Université de Marne la Vallée, Laboratoire des Géomatériaux, et Monsieur Hocine Bendjoudi, Maître de Conférence, H.D.R., à l'Université de Paris 6, Laboratoire de Géologie Appliquée, pour m'avoir consacré une partie de leur temps en examinant ce manuscrit.

Mes remerciements s'adressent aussi à toutes les personnes dont l'intervention a contribué au déroulement de ce travail :

- l'ensemble des personnes de l'équipe du Service O.N.F.-R.T.M. de Digne-Barcelonnette et plus particulièrement à Messieurs Goueffon et Sasseus, directeurs de la Division, pour m'avoir permis d'accéder aux archives ; à Messieurs Vauterin et Deymier, ingénieurs en charge de la vallée de l'Ubaye, à Monsieur Marie, géologue R.T.M., à Messieurs Guiter, Matelin et Peyron, techniciens R.T.M., pour leurs discussions et visites de terrains enrichissantes ;
- Monsieur Boyer, Maître de Conférence à l'Université de Paris 6, Mademoiselle Aloui de Université Paris 6, et Thomas Condom, doctorant à l'Université de Paris 6, pour leur aide tant en laboratoire que sur le terrain ;
- Monsieur Hippolyte, Chargé de Recherche C.N.R.S.-Chambéry, et Monsieur Nicoud, Maître de Conférence à l'Université de Chambéry, pour leur collaboration active sur le terrain ;

- aux chercheurs du CGI, plus particulièrement à Monsieur Joël Billiotte, Maître de Recherche, pour ses conseils et son aide très précieuse aussi bien en laboratoire qu'en logistique ; à Madame Martine Audiguier, Ingénieur de Recherche, pour sa disponibilité et son apport dans l'analyse des résultats de laboratoire ;
- Messieurs José Roselly-Benoît, Oliver Lesaffre, Mohammed Talbi, Jean Souvirou et Serge Bihannic pour leur apport essentiel à sa réalisation matérielle.

L'occasion m'a été donnée de côtoyer de nombreux doctorants et stagiaires qui m'ont beaucoup apporté par leurs idées, leurs encouragements, et la sympathique ambiance de travail qu'ils ont entretenue. Je remercie particulièrement Pascal Laugier, Nicolas Pollet, Mathilde Koscielny et Jérôme Sénémaud pour nos fructueux échanges tant en laboratoire que sur le terrain. Je remercie également vivement Dan Touitou et Yaojoun Caï pour leur aide précieuse sur FLAC, et Essaïeb Hamdi, Crépin Kouassi, Céline Bourdeau, Ik Woo, Cécile Roland et Philippe Robino pour les nombreuses discussions que nous avons pu avoir.

Enfin un grand merci à toute ma famille, à Lina, à Frédéric, à mes amis qui savent combien leurs encouragements ont été importants.

Résumé

Les risques naturels constituent un axe de recherche en développement constant, les zones habitées étant de plus en plus variées et les exigences de la maîtrise des risques étant de plus en plus fortes. Les zones de montagne sont parmi les régions concernées par différents types d'aléas.

Cette étude s'est attachée à un domaine particulier des risques naturels en montagne : les glissements-coulées. Ces derniers sont des processus complexes de déstabilisation de versants, car ils comprennent deux phases distinctes. En effet, la partie amont se comporte comme un glissement classique (modèle élastoplastique), alors que la partie aval se comporte comme une coulée boueuse (modèle viscoplastique). Ce type de processus de déstabilisation de versant se réalise dans des conditions particulières, puisqu'il faut la conjonction de matériaux fins ayant un comportement proche de la thixotropie et d'une quantité importante d'eau. Cette eau peut intervenir sous différentes formes, soit par infiltration directe, soit par remontée de nappe.

Dans ce contexte, ce travail a pour but de mieux comprendre les mécanismes de ces mouvements de versant. Il s'est appuyé sur des cas concrets situés dans la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence).

Dans un premier temps, le caractère géologique particulier de cette région a été étudié afin de déterminer les conditions géomécanique et hydrogéologique des versants affectés. Il ressort que ces glissements-coulées ont lieu, essentiellement, dans les Terres Noires (marnes du Callovo-oxfordien) qui sont chevauchées par les Flysch à Helminthoïdes de la nappe de l'Embrunais-Ubaye. Ces marnes ont un comportement mécanique particulier et sont particulièrement sensibles à l'altération. De plus, le contexte hydrogéologique, défini en partie à l'aide de mesures hydrochimiques, influence sur la stabilité des versants à deux échelles : par infiltration directe et circulation hypodermique, et par venues d'eau depuis l'aquifère des flyschs drainé par le chevauchement.

Les glissements-coulées de la zone d'étude comprennent notamment celui de la Valette et celui du torrent de Poche. Ces deux glissements-coulées présentent, tous deux, des processus d'évolution analogues. En effet, deux grands types d'évolution sont possibles : la réactivation d'une coulée de boue, et l'évolution régressive et latérale du glissement aboutissant à une remobilisation complète du versant.

Cette étude de terrain et de scénarios a été complétée, pour le glissement-coulée de la Valette, par une modélisation en déformation (code de calcul FLAC) qui a permis de confirmer ces scénarios en mettant en évidence l'existence d'un seuil dans la réactivation de la coulée de boue. Ceci est à rapprocher du fait que l'ensemble des versants étudiés ont déjà été liés à des déstabilisations post-glaciaires, qui semblent être réactivées actuellement à travers ces glissements-coulées présentant des évolutions relativement rapides.

TABLE DES MATIERES

<i>Introduction générale</i>	<i>1</i>
Chapitre 1 : Les glissements-coulées et processus associés ou voisins	3
1.1. Terminologie et classifications	3
1.1.1. La classification de Varnes (1978)	3
1.1.2. La classification de Hutchinson (1988)	6
1.1.3. La classification de Hungr et al (2001)	8
1.1.4. Le cas des glissements-coulées : incertitudes par manque de caractérisations objectives	9
1.1.5. Conclusion sur les classifications	11
1.2. Présentation des processus de glissements et coulées boueuses	12
1.2.1 Introduction	12
1.2.2. Glissements de terrain	14
1.2.3. Glissements dans les argiles sensibles	15
1.2.4. Ecoulements hyper-concentrés et laves torrentielles	16
1.2.5. Solifluxion, coulées boueuses et glissements-coulées	17
1.3. Principaux facteurs déclenchants des glissements-coulées	22
1.3.1. Le rôle primordial de l'eau	22
1.3.1.1. Effets des précipitations	22
1.3.1.2. Influence de la présence d'une nappe	24
1.3.1.3. Effet de la descente d'un front d'infiltration	26
1.3.1.4. Rôle de végétation et de l'ensoleillement	27
1.3.2. Les autres facteurs déclenchants	27
1.3.2.1. L'affaiblissement progressif des caractéristiques mécaniques	27
1.3.2.2. Les séismes	28
1.3.2.3. Les facteurs anthropiques	28
1.4. Conclusions	28
Chapitre 2 : Contexte géologique, géomorphologique et géotechnique des glissements-coulées de la région de Barcelonnette	29
2.1. Données générales sur la région d'étude	29
2.2. Cadre structural de la fenêtre de Barcelonnette et de la zone d'étude	31
2.2.1. La fenêtre de Barcelonnette dans le contexte géologique régional	31
2.2.2. Contexte géologique et structural de la zone d'étude	34
2.2.2.1. L'Autochtone : les Terres Noires du Callovo-Oxfordien	34
2.2.2.2. Les nappes de l'Embrunais : Nappe de l'Autapie et Nappe du Parpaillon	38
2.2.2.3. Eléments sur le contact anormal entre l'Autochtone et la nappe de l'Autapie	41
2.2.3. Cadre géomorphologique	42
2.2.3.1. Formations de versant et formes d'érosion	43
2.2.3.2. Les dépôts torrentiels	46
2.2.4. Mouvements de versant	46
2.3. Caractéristiques pétrophysiques et géotechniques des zones d'études : glissement-coulée de la Valette, glissement coulée de Poche et Adroit de Barcelonnette	47
2.3.1. Contexte général de l'échantillonnage	47

2.3.2. Caractéristiques pétrophysiques et géotechniques des matériaux impliqués dans les glissements	51
2.3.2.1. Caractéristiques granulométriques des matériaux	51
2.3.2.2. Identification minéralogique	54
2.3.2.3. Les limites d'Atterberg	54
2.3.3.4. Caractérisation de la fraction argileuse	59
2.3.3.5. Teneur en carbonates	63
2.3.3.6. Teneur en matière organique	64
2.3.3.7. Caractéristiques mécaniques	65
2.4. Conclusions	66
Chapitre 3 : L'eau : le contexte hydrologique et hydrogéologique d'un versant instable	69
3.1. Apports de l'analyse hydrogéologique sur la compréhension des processus de déstabilisation de versants	69
3.1.1. Outils d'analyses pour la connaissance des aquifères	69
3.1.1.1. L'inventaire des sources et l'analyse de leur contexte géologique	69
3.1.1.2. Analyse du fonctionnement hydrogéologique	70
3.1.1.3. Autres moyens d'investigations possibles : piézométrie et pompages d'essais, les prélèvements d'échantillons ...	73
3.1.2. Mise en évidence de caractères hydrochimiques particuliers liés à des caractéristiques d'évolution du glissement	73
3.2. Le glissement-coulée du torrent de Poche	75
3.2.1. Vue d'ensemble du bassin versant du torrent de Poche : torrents et sources	75
3.2.1.1. Les torrents et leur aménagement	75
3.2.1.2. Inventaire des circulations d'eau sur le site	76
3.2.1.3. Contexte lithologique, et structural – configuration hydrogéologique du site	77
3.2.2. Résultats des analyses	78
3.2.3. Relation minéralisation – eau infiltrée dans le glissement	79
3.3. Le glissement-coulée de la Valette et son contexte	79
3.3.1. Présentation détaillée du versant : torrents et sources	79
3.3.1.1. Présentation du versant du torrent de la Valette : torrents et différents aménagements	79
3.3.1.2. Inventaire des sources du versant et du glissement	80
3.3.1.3. Liens entre présence des sources, lithologie et structure	82
3.3.1.4. Type de configuration hydrogéologique	82
3.3.2. Relation eau – déplacements du glissement-coulée	84
3.3.3. Mesures de terrain et dosages en laboratoire : résultats des analyses	88
3.3.3.1. Les anions	88
3.3.3.2. Les cations	89
3.3.4. Analyse des conditions d'infiltration et d'écoulement des eaux dans le versant par le suivi chimique des sources	90
3.3.4.1. Influence de la pluviométrie sur les sources	90
3.3.4.2. Relation entre la position structurale des sources et leurs évolutions chimiques	93
3.3.4.3. Les différents faciès de sources	96
3.4. Conclusions : Relation eau – zones en glissement	97
3.4.1. Caractère particulier des sources dans les zones instables	97
3.4.2. Mise en évidence de la double "alimentation" des zones en glissement	98
3.4.3. Synthèse	99

Chapitre 4	: Les différents scénarios d'évolutions pour les glissements-coulées étudiés	101
4.1. Le glissement-coulée de Poche		101
4.1.1. Historique des instabilités sur le site du glissement		103
4.1.3. Indices de terrain sur les scénarios d'évolution du glissement		108
4.1.3.1. Réactivation de la coulée de boue		108
4.1.3.2. Evolution régressive et expansion latérale		111
4.2. Le glissement-coulée de la Valette		112
4.2.1. Données sur les processus de déstabilisation et mesures de protection		112
4.2.1.1. Contexte géologique et historique des déstabilisations		112
4.2.1.2. Mesures de protection passives et actives		117
4.2.2. Différents indices de terrain et mesures mettant en évidence les évolutions du glissement		120
4.2.2.1. Réactivation de la coulée de boue		120
4.2.2.2. Evolution régressive du glissement en amont et latéralement		122
4.2.2.3. Facteurs explicatifs de l'évolution du glissement-coulée		130
4.2.3. Simulation numérique de quelques scénarios		133
4.2.3.1. Présentation du code de calcul utilisé : <i>FLAC</i> ®		133
4.2.3.2. Paramètres utiles à la modélisation des scénarios		134
4.2.3.3. Influence de la montée d'une nappe		136
4.2.3.4. Influence de la descente d'un front d'infiltration		141
4.2.3.5. Conclusions		143
4.2.4. Evolutions et synthèse sur le glissement-coulée de la Valette		143
4.3. Les différentes instabilités (sur l'Adroit de Barcelonnette)		146
4.4. Rôle de l'eau sur les versants de Terres Noires et conclusions		147
4.4.1. Importance de la maîtrise de l'eau sur les versants		147
4.4.2. Rôle de l'héritage glaciaire et périglaciaire du versant		148
Conclusion générale		149
Références bibliographiques		153
Annexe 1	documents relatifs au Chapitre 1	I
Annexe 2	figures et tableaux relatifs au Chapitre 2	V
Annexe 3	documents relatifs au Chapitre 3	XI
Annexe 4	figures relatives au Chapitre 4	LIII

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1. Classification abrégée de Varnes (1978) – voir aussi Annexe 1-1. _____	4
Figure 1-2. Degré d'activité en fonction des vitesses de déplacement (d'après Varnes, 1978). _____	6
Figure 1-3. Classes de vitesses en fonction des vitesses de déplacement (d'après Hungr et al, 2001). _____	9
Figure 1-4. Représentation des domaines des mouvements de terrain et de l'hydraulique torrentielle _____	13
Figure 1-5. Nomenclature descriptive, couramment admise, d'un glissement terrain - légende complète en Annexe 1-2 (d'après IAEG, 1990). _____	14
Figure 1-6. Exemple de déstabilisation dans les argiles sensibles à Breckenridge au Canada. _____	15
Figure 1-7. Schéma d'une lave torrentielle (d'après Pierson 1986, in Hungr 2001). _____	16
Figure 1-8. Courbes granulométriques des matériaux impliqués dans les coulées de boue (Hutchinson, 1988). _____	17
Figure 1-9. Morphologie d'une coulée de boue. _____	18
Figure 1-10. Morphologie d'un glissement-coulée (d'après Corominas, 1995). _____	19
Figure 1-11. Différents profils d'écoulement de coulée boueuse (d'après Brunnsden 1984). _____	21
Figure 1-12. Effets principaux des précipitations _____	23
Figure 1-13. Relations entre le déclenchement de glissements de terrain dans les formations superficielles et les paramètres hydrologiques : intensité horaire de l'événement pluviométrique et hauteur de pluie cumulée de l'événement en pourcentage du module pluviométrique annuel (d'après Govi et al, 1985). _____	23
Figure 1-14. Représentation d'une pente semi-infinie avec les paramètres décrivant l'influence d'un front d'infiltration et la nappe. _____	25
Figure 1-15. Influence de la végétation sur la succion (d'après Cherubini et Giasi, 1997). _____	27
Figure 2-1. Localisation de la zone d'étude (d'après Michelin, carte 334, 2002). _____	29
Figure 2-2. Précipitations moyennes mensuelles, de 1961 à 2000, enregistrées à la station du Verger (à 1140 m d'altitude) -Données R.T.M., d'après Météo-France (valeurs moyennes, valeurs \pm 2 écarts-types). _____	30
Figure 2-3. Débit moyen de l'Ubaye (Barcelonnette : altitude de 1135 m et surface de bassin versant de 549 km ² ; Roche Rousse : altitude de 790 m et surface de bassin versant = 946 km ²), d'après Légier (1977). _____	31
Figure 2-4. Schéma structural de l'Embrunais-Ubaye (d'après Kerckhove, 1969). _____	32
Figure 2-5. Coupe structurale des Alpes du sud, à la latitude de Barcelonnette. _____	33
Figure 2-6a. Cartographie de la fenêtre de Barcelonnette (d'après Plan, 1968). _____	34
Figure 2-7. Colonnes stratigraphiques des unités présentes dans la fenêtre de Barcelonnette. _____	35
Figure 2-8. Affleurement de Terres Noires présentant une schistosité pénétrative et de nombreux filonnets de calcite (ravine côté rive gauche du torrent de la Valette, 1250 m). _____	36
Figure 2-9. Ravines de Terres Noires laissant apparaître un horizon de teinte crème d'altération. _____	37
Figure 2-10. Affleurement de calcaire planctonique de la nappe du Pelat (affleurement à mi-chemin entre le torrent de Faucon et celui de la Valette à une altitude d'environ 1550 m). _____	38
Figure 2-11. Vue d'un affleurement de Flysch dissocié (sur le versant Est de la crête de Soleil-Bœuf, 2100 m). _____	39
Figure 2-12. Vue de figures sédimentaires dans les flyschs en rive droite du torrent de Faucon (1620 m), au N-E de Barcelonnette. _____	40
Figure 2-13. Vue du Flysch à Helminthoïdes de la nappe du Parpaillon avec quelques plis visibles (en amont de Jausiers en rive droite de l'Ubaye). _____	41
Figure 2-14. Zone de chevauchement mettant en contact les Terres Noires et le Flysch dissocié de la nappe de l'Autapie (rive droite du Riou Chamous, 1820 m). _____	42
Figure 2-15. Affleurement de moraine sur l'Adroit de Barcelonnette (1320 m). _____	43
Figure 2-16. Coupe réalisée lors d'une fouille –levée en rive gauche de l'Ubaye en face du torrent de Faucon vers la cote 1500 m (d'après Légier, 1977). _____	44
Figure 2-17. Vue de la crête de Soleil-Bœuf montrant des petits mouvements de terrain superficiels. _____	45

Figure 2-18. Exemple de ravines dans les Terres Noires conduisant à un paysage de badlands (au sommet des ravines, les teintes claires correspondent à un niveau d'altération).	45
Figure 2-19. Quantification, sur des bassins versant expérimentaux, des différents processus d'érosion dans les Terres Noires (Buffalo, 1989).	46
Figure 2-20. Positionnement des échantillons prélevés sur le glissement-coulée de la Valette et emplacement du profil repère pour le suivi des volumes en transit.	49
Figure 2-21. Positionnement des échantillons prélevés sur le glissement-coulée de Poche.	50
Figure 2-22. Courbes granulométriques de tous les échantillons prélevés sur le versant de la Valette, avec quelques courbes de référence de coulées de boue issues de Hutchinson, 1988.	52
Figure 2-23. Courbes granulométriques de tous les échantillons prélevés sur le versant du torrent de Poche, avec quelques courbes de référence de coulées de boue issues de Hutchinson, 1988.	53
Figure 2-24. Courbes granulométriques des Terres Noires comparées aux produits de coulées.	53
Figure 2-25. Représentation des limites d'Atterberg par rapport à l'état d'un sol (w = teneur pondérale en eau et I_p = indice de plasticité).	54
Figure 2-26. Représentation des échantillons analysés dans le diagramme de Casagrande pour le versant de la Valette (les triangles sont pour les Terres Noires, les cercles pour les matériaux de la coulée, les losanges pour les matériaux à mouvement rapide, et les carrés pour les matériaux remaniés).	56
Figure 2-27. Représentation des échantillons analysés dans le diagramme de Casagrande pour le torrent de Poche (les figurés pleins représentent les matériaux remaniés et les autres les produits de la coulée).	57
Figure 2-28. VB en fonction du pourcentage de particules inférieures à $2 \mu\text{m}$ pour les échantillons de la Valette (les triangles sont pour les Terres Noires, les cercles pour les matériaux de la coulée, les losanges pour les matériaux à mouvement rapide, et les carrés pour les matériaux remaniés).	60
Figure 2-29. VB en fonction du pourcentage de particules inférieures à $2 \mu\text{m}$ pour les échantillons du torrent de Poche (les figurés pleins représentent les matériaux remaniés et les autres les produits de la coulée).	61
Figure 2-30. Graphe présentant la valeur de bleu par rapport à la teneur en carbonate.	61
Figure 2-31. Echantillons de l'étude dans le repère Indice de nocivité - $\% < 2 \mu\text{m}$.	63
Figure 3-1. Corrélation entre la conductivité d'une source, son débit, et le ratio Ca/Mg d'une part et des épisodes orageux d'autre part (Desmarais et Rojstaczer, 2002).	71
Figure 3-2. Schéma de principe d'un essai de traçage.	72
Figure 3-3. Coupe schématique du glissement de La Clapière – Alpes Maritimes (Guglielmi et al, 2000).	74
Figure 3-4. Réseau hydrographique de la fenêtre de l'Ubaye (version agrandie en Annexe 3-4).	76
Figure 3-5. Carte des différentes sources mesurées sur le site du glissement-coulée de Poche.	77
Figure 3-6. Carte de l'inventaire du versant réalisé autour du glissement-coulée de la Valette.	80
Figure 3-7. Carte de l'inventaire réalisé sur le glissement-coulée de la Valette.	81
Figure 3-8. Carte des conductivités des sources, mesurées en mai 2002.	83
Figure 3-9. Schéma de principe de la configuration hydrogéologique du versant.	84
Figure 3-10. Pluviométrie journalière et volumes transitant, par période de 15 jours, au travers d'un profil repère. La pluviométrie est construite à partir des données Météo-France entre août 1988 et janvier 1999 (trait pointillé), et ensuite à partir du pluviomètre R.T.M. Les valeurs de volumes sont des données R.T.M. Les trait pleins indiquent les dates où le système de drainage superficiel a été repris.	85
Figure 3-11. Données météorologiques et hydrologiques calculées par la formule de Thornthwaite (précipitations et températures de la station Météo-France du Verger, moyennes mensuelles respectivement sur les périodes suivantes : 1961 à 2000 et 1988 à 1999).	86
Figure 3-12. Graphe présentant les déplacements avant reprise du réseau de drainage.	87
Figure 3-13. Graphe présentant les déplacements après reprise du réseau de drainage (opération effectuée courant été 1993). Par rapport à la situation précédente (cf. Figure 3-12) les déplacements sont réduits, avec une pluviométrie comparable.	87
Figure 3-14. Conductivité des sources du glissement et pluviométrie sur le glissement (les numéros correspondant aux sources sont en Figure 3-7 et Annexe 3-6).	91

Figure 3-15. Conductivité des sources du versant autour du glissement-coulée en fonction de la pluviométrie : (a) côté ouest ; (b) : côté est. (numéro des sources en Figure 3-6 et Annexe 3-5).	92
Figure 3-16. Concentration du calcium (Ca^{2+}) en fonction de la concentration de sulfates (SO_4^{2-}), sur l'ensemble du versant.	94
Figure 3-17. Concentration de Mg^{2+} en fonction de SO_4^{2-} (sur l'ensemble du versant).	94
Figure 3-18. Concentration de Ca^{2+} en fonction de Mg^{2+} (sur l'ensemble du versant).	95
Figure 3-19. Concentration de Mg^{2+} en fonction de celle de K^+ (sur l'ensemble du versant)	97
Figure 3-20. Coupe synthétique pour le glissement-coulée de la Valette (pour le cas du glissement-coulée de Poche, le chevauchement serait plus en amont de l'escarpement).	99
Figure 4-1. Vue générale et contexte du glissement-coulée de Poche (a : photographie prise depuis le versant rive droite en octobre 2002 ; b : contexte schématique).	102
Figure 4-2. Vue aérienne du torrent de Poche et du glissement-coulée (cliché J.-C. Hippolyte, mai 2001).	103
Figure 4-3. Glissement-coulée de Poche en 1977 (d'après A. Légier, 1977).	104
Figure 4-4. Carte (actuelle) du glissement-coulée de Poche et de son contexte.	105
Figure 4-5. Fentes de traction sur le corps de la coulée active au contact du terrain en place (a) ; schéma de principe du modèle de Riedel (b).	106
Figure 4-6. Exemples de stries sur une levée latérale du glissement-coulée de Poche.	107
Figure 4-7. Vue, depuis la niche d'arrachement, du corps de la coulée blanchi par les efflorescences.	107
Figure 4-8. Extrait d'une photographie aérienne en 2000 de la mission FD-04_250 (cliché 1723, IGN).	109
Figure 4-9. Vue schématique de la photographie aérienne présentée en Figure 4-8.	110
Figure 4-10. Vues du torrent de Poche en amont du glissement-coulée : les berges sont instables et il y a plusieurs zones de dépôts de laves torrentielles.	111
Figure 4-11. Vue générale du glissement-coulée de la Valette depuis la rive gauche de l'Ubaye.	113
Figure 4-12. Vue d'un bloc (sub en place) de flysch de la nappe de l'Autapie, en rive gauche du glissement-coulée, présentant des micro-plis soulignant le caractère perturbé de la zone de chevauchement.	114
Figure 4-13. Carte du glissement-coulée de la Valette et de son contexte géologique proche.	115
Figure 4-14. Vue du glissement-coulée de la Valette avant le déclenchement de la coulée boueuse.	116
Figure 4-15. Vue de la coulée juste après son déclenchement en 1988 (cliché RTM).	117
Figure 4-16. Vue des travaux de remodelage et de drainage entrepris sur la partie en glissement.	118
Figure 4-17. Vue du glissement-coulée de la Valette et du piège à matériaux (mai 2002).	119
Figure 4-18. Vue de la coulée de la Valette au niveau de l'ancienne confluence entre le torrent de Serre et le torrent de la Valette. (a) : cliché R.T.M. à la fin des années 80 ; (b) : vue en 1999 ; l'interfluve est marqué par des pointillés.	121
Figure 4-19. Exemple d'un petit glissement affectant les berges du torrent de la Valette, en amont du piège à matériaux en front de coulée.	121
Figure 4-20. Niche d'arrachement du glissement-coulée de la Valette (en 1999).	122
Figure 4-21. Vue d'une fracture en sous bois, en amont de la niche d'arrachement du glissement-coulée.	123
Figure 4-22. Exemples de graphe de déplacements sur points surveillés en amont de la niche d'arrachement (d'après R.T.M.).	123
Figure 4-23. Vue d'un petit glissement en rive gauche (vers 1650 m) légèrement en dessous du contact entre les Terres Noires et les flyschs de la nappe de l'Autapie (octobre 2002).	124
Figure 4-24. Vues aériennes de 1971 et 1982 du glissement-coulée de la Valette.	126
Figure 4-25. Vues aériennes de 1988 et 1997 du glissement-coulée de la Valette.	127
Figure 4-26. Vue aérienne de 2000 du glissement-coulée de la Valette (IGN, 2000).	128
Figure 4-27. Photo-interprétation du cliché de la mission IGN, 2000.	129
Figure 4-28. Vue oblique du glissement-coulée et de la crête de Soleil-Bœuf, fracturée, depuis la rive ouest du Riou Chamous (juin 2002).	130
Figure 4-29. Plan de faille avec des stries sur la crête de Soleil-Bœuf ; orientation du plan N 125° E, 90° avec un pitch de 15° vers l'Est, à composante sénestre.	131

Figure 4-30. Escarpement soulignant une ancienne niche d'arrachement. _____	132
Figure 4-31. Vue des prairies de Chalanche depuis la crête de Soleil-Bœuf avec leur morphologie de paléoglisserment. _____	132
Figure 4-32. Paquets glissés en contre-bas, sur l'ubac, de la crête de Soleil-Bœuf (mai 2000). _____	133
Figure 4-33. Coupe de principe retenue pour la simulation numérique. _____	135
Figure 4-34. Augmentation des vitesses de déplacement lorsque la nappe sature à moitié les matériaux de la coulée. _____	137
Figure 4-35. La nappe sature presque totalement les matériaux de la coulée (la nappe est à -2 mailles de la surface topographique) et la plasticité se développe. _____	137
Figure 4-36. Variations des déplacements horizontaux en fonction de l'abscisse du profil pour 4 situations de nappe. "S1" correspond à la situation de nappe basse et "S4" à la situation de nappe la plus haute simulée. ___	138
Figure 4-37. Influence de la montée de la nappe sur le facteur de sécurité local _____	140
Figure 4-38. Evolution de la plasticité en fonction de la hauteur de la nappe, pour la coulée à sa base. _____	141
Figure 4-39. Développement d'une rupture progressive dans les flyschs, en amont de la niche d'arrachement (lorsque la coulée commence à être saturée, et que les déplacements s'accélèrent). _____	142
Figure 4-40. Saturation totale des matériaux de la coulée par un front d'infiltration avec une nappe en base de coulée. _____	142
Figure 4-41. Le site de la Valette, en coupe, avant déclenchement du glissement et son initiation en 1982 (la situation en 1971 prend appui sur les photographies aériennes I.G.N.). _____	144
Figure 4-42. Le site de la Valette, vues en coupe, au moment du déclenchement de la coulée boueuse et son évolution à ce jour. _____	145
Figure 4-43. Panorama de l'Adroit de Barcelonnette (clichés octobre 2002). _____	146

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1. Classification abrégée de Hutchinson (1988).	7
Tableau 1-2. Classification résumée, de Hungr et al (2001), des déstabilisations de versant de type écoulement.	8
Tableau 1-3. Classification synthétique (en différentes langues) des différents mouvements de versant sur des critères géomorphologiques, et géologiques (d'après Dikau et al., 1996).	10
Tableau 1-4. Exemple de classification des coulées de boues en fonction de leur comportement durant la phase de mouvement (d'après Takada 1968, in Brunsden 1984).	10
Tableau 1-5. Les différentes dénominations pour les glissements-coulées et les coulées boueuses dans les classifications de Varnes (1978), Hutchinson (1988) et Hungr et al (2001).	11
Tableau 1-6. Comparaison des trois principales classifications (d'après Hungr et al, 2001).	12
Tableau 2-1. Echelle des indice de consistances (Ic) et correspondance avec l'état in situ du matériau.	55
Tableau 2-2. Classification des sols en fonction de l'indice de Skempton.	57
Tableau 2-3. Résultats des indices de Skempton pour les échantillons de la Valette.	58
Tableau 2-4. Résultats des indices de Skempton pour les échantillons du torrent de Poche.	58
Tableau 2-5. Valeurs de bleu pour les échantillons de la Valette	59
Tableau 2-6. Valeurs de bleu pour les échantillons du torrent de Poche	59
Tableau 2-7. Classes de sols en fonction de l'indice de nocivité (d'après Lautrin, 1989).	60
Tableau 2-8. Indices de nocivité pour les échantillons de la Valette	62
Tableau 2-9. Indices de nocivité pour les échantillons du torrent de Poche	62
Tableau 2-10. Calcimétrie moyenne sur les échantillons prélevés à la Valette.	63
Tableau 2-11. Teneur moyenne en matière organique sur les échantillons prélevés à la Valette.	64
Tableau 2-12. Valeurs moyennes pour le versant de la Valette et les marnes prélevées dans le Riou Bourdoux – RB. Ici, les marnes prélevées dans le Riou Bourdoux l'ont été sans aucun remaniement sur des blocs (H = stratification horizontale ; V = stratification verticale).	65
Tableau 2-13. Valeurs moyennes pour le versant du torrent de Poche.	65
Tableau 2-14. Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques obtenues par Maquaire et al (2003), pour la région de Barcelonnette.	66
Tableau 3-1. Valeurs des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité pour différents minéraux argileux en fonction de leur cation échangeable (d'après Cornell 1951 in Lambe et Whitman 1979).	95
Tableau 4-1. Caractéristiques mécaniques utilisées pour la constitution de la grille.	136

Introduction générale

L'emprise croissante des aménagements sur le milieu naturel conduit des populations à se trouver exposées à de nouveaux risques ou à occuper des zones jugées par le passé dangereuses.

Ceci a pour conséquence une demande constante du renforcement des moyens de protection face à ces risques dits naturels, c'est à dire dont l'origine n'est pas liée directement à l'activité humaine. Un des milieux, où ces risques sont les plus représentés, est la montagne où les risques liés aux mouvements de versants, aux crues torrentielles, aux avalanches... sont très importants.

Ce travail s'inscrit dans un axe de recherche relatif aux risques naturels, et plus particulièrement aux risques naturels en montagne. Il a pour but de contribuer à une meilleure compréhension des processus particuliers de déstabilisation de versant que sont les glissements et coulées boueuses. Il s'intègre dans le cadre d'un large programme de recherche pour la Fondation MAIF, mené en collaboration avec plusieurs instituts de recherches en France.

Afin d'illustrer la démarche établie au cours de ce travail de recherche, nous avons choisi de nous appuyer sur la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France) et plus particulièrement sur deux grands glissements-coulées de la région : celui du torrent de Poche et celui du torrent de la Valette.

Le caractère géologique particulier de la région de Barcelonnette a permis de se baser sur un site d'étude dans lequel les contrastes, à grande échelle, sont bien marqués. En effet, dans le contexte géologique alpin, la vallée est un objet géologique particulier puisqu'elle se présente sous la forme d'une fenêtre tectonique.

A la faveur de cette particularité géologique, des marnes jurassiques affleurent largement, avec une couverture superficielle (altérites et moraines) importante. Cet ensemble est limité par des formations de flyschs constituant des nappes de charriages.

La fenêtre de Barcelonnette est caractérisée par l'abondance de ses instabilités de versants, ainsi que par ses phénomènes torrentiels relativement fréquents.

Par ailleurs, la vallée est un des sites où ont été décrits pour la première fois les processus de laves torrentielles et où ont été entrepris des travaux d'aménagement des terrains en montagne dès la fin du 19^{ème} et le début du 20^{ème} siècle.

Ce travail tout d'abord s'attache à décrire et analyser les processus de glissements-coulées, en les intégrant dans le contexte plus large des instabilités de versants. Ceci en prenant appui sur différentes classifications de mouvements de versant et exemples largement reconnus pour pouvoir servir d'objets de référence. Cette première partie s'attache aussi à dégager clairement le rôle de l'eau dans les processus de mouvements de versants ainsi que l'importance des caractéristiques des matériaux mis en mouvement.

Ensuite, le problème plus spécifique de la zone d'étude est abordé suivant deux grandes composantes : la présentation géologique et géomécanique du site d'une part, et la compréhension du fonctionnement hydrogéologique de la zone d'autre part.

La première composante s'appuie sur différentes missions de terrain et de prélèvements d'échantillons qui ont été par la suite analysés au laboratoire, afin de déterminer plusieurs paramètres caractérisant l'état géomécanique des sites étudiés.

Les investigations hydrogéologiques s'appuient également sur des missions de terrain avec une mise en œuvre de moyens d'investigation légers et relativement rapides. Les résultats de cette étude hydrogéologique ont été comparés avec ceux d'autres sites de glissements ayant déjà fait l'objet d'études analogues.

Enfin, l'analyse des différentes données recueillies relatives aux deux glissements-coulées plus particulièrement étudiés ont permis d'envisager différents scénarios d'évolution des deux sites étudiés, lesquels ont été confirmés par une tentative de modélisation. Ces différents scénarios ont aussi été intégrés plus largement dans le contexte régional afin de prendre en compte le caractère général des problématiques de glissements-coulées.

Chapitre 1 : Les glissements-coulées et processus associés ou voisins

1.1. Terminologie et classifications

Les classifications visant à décrire et à déterminer les différents processus de déstabilisation de versant sont nombreuses. Certaines d'entre elles sont présentées ci-après en mettant l'accent sur les glissements-coulées et processus associés ou voisins.

1.1.1. La classification de Varnes (1978)

Une des classifications les plus citées et utilisées est celle de Varnes (1978). Elle repose sur deux axes qui sont d'une part le type de mouvement en rapport avec la structure géologique, et d'autre part la nature des formations affectées par la déstabilisation étudiée (cf. Figure 1-1).

Les types de mouvements de versant suivants sont différenciés :

- "Falls"

Il s'agit de masses de taille variable qui se détachent d'une pente escarpée ou d'une falaise. Les vitesses de déplacement sont rapides à extrêmement rapides, avec des rebonds et des trajectoires paraboliques. Ces déplacements peuvent être ou non précédés de petits déplacements. On distingue les "rock falls" lorsque la masse se détache du bedrock, les "debris falls" composés par des fragments détritiques grossiers, et les "earth falls" composés de fragments détritiques fins.

- "Topples"

Il s'agit d'un processus de basculement d'une unité sur un pivot situé en dessous ou sur une unité inférieure, sous l'action de la gravité et de forces exercées par des blocs adjacents ou des pressions de fluides.

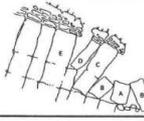
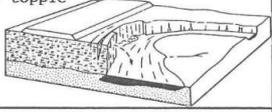
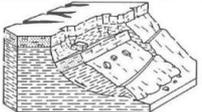
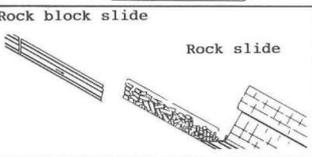
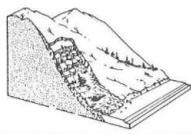
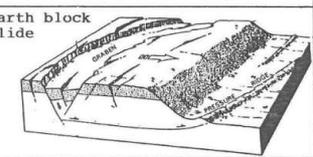
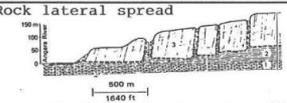
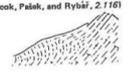
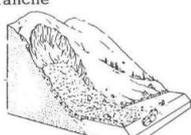
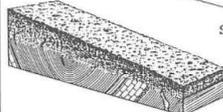
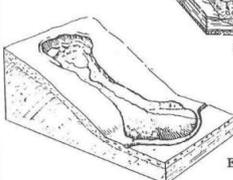
TYPE OF MOVEMENT	TYPE OF MATERIAL		
	BED ROCK	ENGINEERING SOIL	
		DEBRIS	EARTH
I. FALLS	Rock fall 	Debris fall	Earth fall
II. TOPPLES	Rock topple 	Debris topple 	Earth topple
III. SLIDES A. ROTATIONAL B. TRANSLATIONAL	Rock slump 	Debris slump 	Earth slump 
	Rock block slide Rock slide 	Debris slide 	Earth block slide 
IV. LATERAL SPREADS	Rock lateral spread 		Earth lateral spread 
V. FLOWS	Gravitational sagging (Nemok, Pašek, and Rybář, 2.7.1961)  (Zischinsky, 2.1941) 	Debris avalanche  Soil creep 	Rapid earth flow (Quick clay flow)  Earth flow 

Figure 1-1. Classification abrégée de Varnes (1978) – voir aussi Annexe 1-1.

- "Slides"

Les "slides" sont des glissements de terrain, par insuffisance de résistance au cisaillement sur une ou plusieurs surfaces de rupture.

Le mouvement peut être progressif, c'est à dire que le cisaillement peut ne pas être simultané sur la totalité de la surface de rupture. La propagation de la rupture est contrôlée par le développement des zones entrant en plasticité.

La surface de cisaillement devient alors une surface de séparation entre matériau en place et matériau en mouvement.

Cette catégorie a été subdivisée en glissements rotationnels et translationnels (ou plan) :

- "Rotational slides" : c'est l'exemple le plus commun. La surface de rupture présente une concavité orientée vers le haut. Il peut y avoir des fissures concentriques en plan, et concaves suivant la direction du glissement. L'image classique est la forme d'une cuillère. La forme du glissement peut être influencée par la nature des terrains concernés et les éventuelles discontinuités rencontrées. L'escarpement au niveau de la niche d'arrachement peut être relativement vertical et les mouvements sont relativement rapides. En amont de la niche d'arrachement, il peut apparaître des

fissures de traction et une évolution régressive vers l'amont ou latérale du mouvement est possible.

- "Translational slides" : dans ce cas, la masse évolue le long d'un plan de faible résistance mécanique. Un glissement plan, dans lequel une seule unité est mobilisée, peut être appelé "block slide". Les glissements plans sont très souvent contrôlés par la structure géologique du massif et les surfaces ou zones de plus faible résistance mécanique.

- "Lateral spreads"

Le mouvement dominant est l'extension régressive et latérale par fractures de traction ou par cisaillement. Les blocs évoluent en translation jusqu'à former des reliefs en horsts et grabens avec un fluage en pied. Ces mouvements se déclenchent sans que des indices de surface soient préalablement clairement identifiables.

- "Flows"

Les écoulements ou "flows" impliquent des matériaux peu ou non-consolidés qui s'écoulent plus ou moins rapidement suivant leurs teneurs en eau. Sur de nombreux points, le profil de distribution des vitesses ressemble à celui d'un fluide visqueux.

Ces processus peuvent parfois être précédés de phénomènes de fluage, déformation lente et continue dans le temps, se développant sous une contrainte constante. Ce fluage évolue de façon non perceptible, jusqu'à une accélération qui conduit à la rupture.

- "Flows in Bedrock" : les déformations se concentrent le long de discontinuités pré-existantes.
- "Flows in Debris and Earth" : le mouvement est proche de celui d'un écoulement de débris, au sens formation superficielle d'altération. La fluidisation de la masse mobilisée sous l'effet de l'eau n'est pas forcément visible. Cependant, la limite entre les matériaux stables et ceux mobilisés est assez bien marquée par une zone de mouvements différentiels où se concentrent des efforts de cisaillement.
- "Debris flows" appelé parfois "Mud flows" : d'après Varnes (1978), dans certaines classifications la distinction s'effectue a posteriori par la taille des particules. C'est à dire que le terme de "Debris" dénote un haut pourcentage de matériaux grossiers, alors que le terme de "mud flow" est réservé à un "earth flow" contenant au moins 50% de matériaux fins (inférieur au sable). Les sous-types suivants sont distingués :
 - "extremely rapid debris flow" : est préféré à "Debris Avalanche", car l'usage du terme avalanche doit être réservé au phénomène neigeux.
 - "subaerial flow" : pour des matériaux fins comme le sable, les silts ou les argiles. Leurs teneurs en eau et leurs vitesses sont très variables. Pour les cas où la teneur en eau est la plus élevée, l'expression "mud flows" est utilisée.

→ "rapid earth flow" ou "earth flow" : se produit aussi dans les matériaux fins à argileux. Ce processus est une évolution d'un processus de glissement en étalement avec une liquéfaction de la masse et une évolution régressive. La vitesse de ce processus est influencée par la teneur et le type d'argile, le degré d'altération, et la teneur en eau des terrains affectés.

→ "dry flow" et "loess flow" : écoulement de matériaux superficiels peu ou non saturés. Le déclenchement est souvent dû à une sollicitation mécanique de type séisme.

- "Complex"

Très souvent, les mouvements de versant évoluent vers une combinaison de plusieurs types de processus. Ils sont alors dits complexes.

Cette classification propose également une échelle de vitesse afin de caractériser le degré d'activité des différents mouvements (cf. Figure 1-2). Mais dans de nombreux cas, les vitesses ne sont que très approximatives dans la phase de rupture.

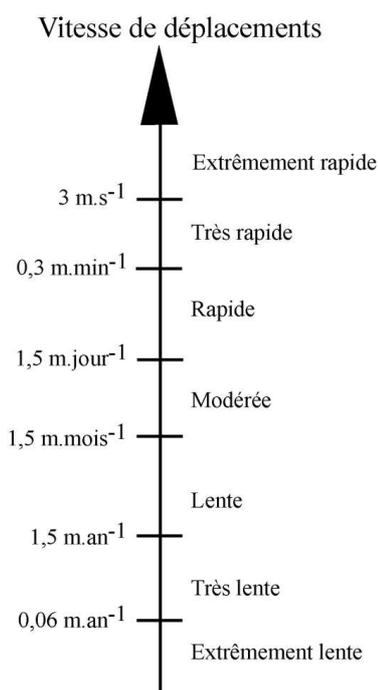


Figure 1-2. Degré d'activité en fonction des vitesses de déplacement (d'après Varnes, 1978).

1.1.2. La classification de Hutchinson (1988)

La classification établie par Hutchinson (1988) s'appuie sur le contexte géologique et géomorphologique, mais aussi, dans une moindre mesure, sur le mode de propagation (cf. Tableau 1-1).

A. Rebond isostatique ("Rebound")	B. Fluage ("Creep")	C. Affaissement ("Sagging")	D. Glissements ("Landslides")	E. Mouvements de sols de type écoulement ("Debris movements of flow-like form")	F. Fauchage ("Topples")	G. Chutes ("Falls")	H. Mouvements complexes ("Complex slope movements")
post-excavation	superficiel, essentiellement saisonnier	affaissement simple associé à un glissement	rupture confinée	coulée de boue	selon discontinuités du massif	par détachement de blocs	bombement de vallée
post-érosion	profond et continu	double affaissement associé à deux glissements	rupture rotationnelle	coulée de boue périglaciaire	en traction	par remobilisation de blocs	mouvement en masses
	progressif, avant une rupture	affaissements multiples	rupture composée	glissement-coulée			ancienne falaise argileuse
	post-rupture		rupture translationnelle	lave torrentielle			glissement évoluant en aval en écoulement ou en coulée de boue
				sturzstroms			glissement déclenché par ruissellements et infiltrations
							glissements emboîtés
							glissements multiples

Tableau 1-1. Classification abrégée de Hutchinson (1988).

Il ressort de cette classification que le choix de départ comporte trop de paramètres. Ainsi certains processus peuvent se retrouver dans beaucoup de catégories, d'autant que les données de terrain dont nous pouvons disposer ne permettent pas toujours de connaître précisément tous les paramètres discriminants. La précision affichée et le nombre d'exemples paraît donc appréciable, mais les catégories sont beaucoup trop fines pour ne pas faire des "cas particuliers".

En ce qui concerne les vitesses, cette classification reprend celle de Varnes (1978).

Le domaine des coulées de boue ("mudslides") correspond ici au "mudflow" (cas particulier de "earthflow") pour Varnes (1978), avec pour exemple, La Coma et Gosol dans les Pyrénées. En outre, Hutchinson préconise l'abandon du terme "mudflow", car il est devenu trop imprécis et mal employé.

En ce qui concerne les glissements-coulées ("flow slide"), ils sont décrits comme une rupture rapide d'une masse granulaire se déplaçant rapidement sur de grandes distances. L'exemple cité est celui d'Aberfan. Toutefois, la catégorie "flow slide" est encore une fois compliquée par une abondance de choix des matériaux qui peuvent être mis en cause, sans que le phénomène ne diffère véritablement. Cette dernière catégorie correspondrait plus ou moins à la catégorie "debris slide" de Varnes (1978). La catégorie des glissements-coulées apparaît aussi dans la classe des mouvements complexes sous la dénomination de "slump earthflow".

1.1.3. La classification de Hungr et al (2001)

Cette classification, relativement détaillée (cf. Tableau 1-2), est une des contributions les plus récentes, dans laquelle les auteurs ont adopté comme critères : le processus en cours lors du mouvement et les matériaux impliqués. Les matériaux impliqués sont qualifiés selon des critères géotechniques.

Les vitesses de déplacement sont aussi abordées à partir de la classification de Varnes (1978), avec quelques modifications pour les seuils de chaque catégories (cf. Figure 1-3).

Ces seuils de vitesses paraissent un peu plus adaptés à la réalité du terrains car ils sont plus élevés et mieux étagés.

Cependant, avec la répétition de certaines catégories qui ne se différencient que par les matériaux impliqués, il apparaît une certaine difficulté dans la détermination de certains processus. De plus, cette classification porte uniquement sur les événements dits à phase d'écoulement, c'est à dire correspondant à peu près à la catégorie des "Flows" ("écoulements") pour Varnes (1978).

Material	Water content	Special condition	Velocity	Name
Silt, Sand, Gravel, Debris (talus)	dry, moist or saturated	- no excess pore-pressure, - limited volume	various	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
Silt, Sand, Debris, Weak rock	saturated at rupture surface content	- liquefiable material, - constant water	Ex. Rapid	Sand (silt, debris, rock) flow slide
Sensitive clay	at or above liquid limit	- liquefaction in situ, - constant water content	Ex. Rapid	Clay flow slide
Peat	saturated	- excess pore-pressure	Slow to very rapid	Peat flow
Clay or Earth	near plastic limit	- slow movements, - plud flow (sliding)	< Rapid	Earth flow
Debris	saturated	- established channel, - increased water content	Ex. Rapid	Debris flow
Mud	at or above liquid limit	- fine-grained debris flow	> Very rapid	Mud flow
Debris	free water present	- flood	Ex. Rapid	Debris flood
Debris	partly or fully saturated	- no established channel, - relatively shallow, steep source	Ex. Rapid	Debris avalanche
Fragmented Rock	various, mainly dry	-intact rock at source, - large volume (> 10 000 m ³)	Ex. Rapid	Rock avalanche

Tableau 1-2. Classification résumée, de Hungr et al (2001), des déstabilisations de versant de type écoulement.

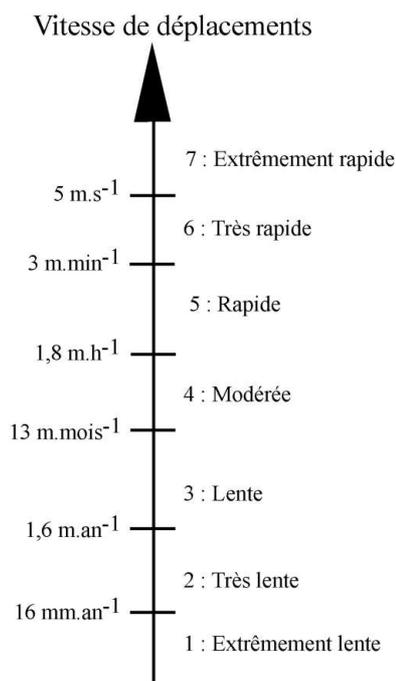


Figure 1-3. Classes de vitesses en fonction des vitesses de déplacement (d'après Hungr et al, 2001).

Pour le domaine des glissements-coulées, tels qu'Aberfan, la classification est relativement complexe car les nuances dans le processus de transport sont fines et les conditions sur les matériaux relativement peu explicitées.

En outre, la différenciation entre coulées de boue et laves torrentielles est plutôt floue, et ne s'attache qu'à la phase de propagation des matériaux selon leur nature. Ceci rend donc la classification un peu complexe à partir du moment où les matériaux mobilisés sont de nature diverses, ce qui est souvent le cas sur le terrain. Ainsi, un type de mouvement, dans cette classification, est difficilement comparable à un autre, en faisant abstraction du type précis de matériaux impliqués. De plus, les types de matériaux sont définis à la fois suivant des critères lithologiques et géotechniques, ce qui renforce encore la complexité de ces découpages.

1.1.4. Le cas des glissements-coulées : incertitudes par manque de caractérisations objectives

Le cas des mouvements complexes comme les glissements-coulées, mais aussi des coulées boueuses, a fait l'objet de nombreuses investigations et les classifications en rendent compte (cf. Tableau 1-3).

Il existe d'autres dénominations pour le terme de glissement-coulée, correspondant parfois à d'autres phénomènes, suivant les classifications de référence et la vitesse de réalisation pour certains auteurs (Prior et al 1968, in Brunsden 1984) : "composite mudflow", "earthflow", "earthslide" et parfois chez certains auteurs (Brunsden, 1984) : "quick clay flow", "retrogressive slide", "translational slide", mais aussi "slump earth flow" (Hutchinson, 1988).

		<i>Anglais</i>	<i>Français</i>	<i>Italien</i>	<i>Espagnol</i>
Slide (rotational)		slump (expression populaire) rotational slip rotational slide	chute de bloc glissement simple (rotationnel)	scivolamento (scorrimento) rotazionale	deslizamiento rotacional simple
Slide (translational)	debris slide	shallow translational slides, sheet slides, soil slips	glissements de débris	scivolamento (scorrimento) di detrito	deslizamiento de derrubios
	mudslide	earthflow (US usage)	glissement évoluant	scivolamento	coladas de
		mudflow (redundant usage, English) slump-earthflow	en coulée boueuse (foirage)	(scorrimento) di terra scivolamento (scorrimento) rotazionale-colata di terra	barro rotacion con flujo de tierras
Flow	rock flow (sackung)	sagging, rock creep, deep seated gravitational creep	déformation lente de versant rocheux, fauchage	deformazione profonda da creep in roccia	flujos de rocas
	debris flow	mudflow (old usage), lahar (volcanic mudflow)	coulée de débris <i>laves torrentielles</i>	colata di detrito	corriente de derrubios
	soil flow (mudflow)	mudflow, alpine mudflow, earthflow, sandflow	coulée boueuse coulée de sable	colata di terra	flujos de arena
Complex	flow slide	flow slide	glissement-coulée	scorrimento-colata	flujo deslizante

Tableau 1-3. Classification synthétique (en différentes langues) des différents mouvements de versant sur des critères géomorphologiques, et géologiques (d'après Dikau et al., 1996).

Le terme de "debris flow" est traduit par les auteurs par "coulée de débris", alors que "lave torrentielle" est la traduction la plus couramment admise pour désigner ces phénomènes en montagne.

Cette abondance de dénominations, et parfois de sous catégories, existe aussi pour les coulées de boue que certains auteurs assimilent à des laves torrentielles (cf. Tableau 1-4).

		description	correspondance
coulée de boue ("mudslides")	Type A : "fluide type"	configuration où l'écoulement des matériaux est plus rapide dans le corps des masses mobilisées qu'à sa surface	"mudflow" (Sharpe, 1938)
	Type B : "layer slide"	type commun de déstabilisation de sol en masse	"mudslide" (Hutchinson, 1970)
	Type C : "protrusion of an intermediate layer"	les efforts de cisaillement sont concentrés sur une couche interface entre les matériaux mobilisés et le bed-rock	"mudslide" (Brunsden, 1973)
	Type D : "multi-slide layers"	configuration dans laquelle plusieurs couches bougent plus ou moins indépendamment les unes des autres	

Tableau 1-4. Exemple de classification des coulées de boues en fonction de leur comportement durant la phase de mouvement (d'après Takada 1968, in Brunsden 1984).

Ces différents types de coulées peuvent correspondre au fonctionnement d'une seule coulée boueuse à différents stades de son activité, exception faite peut être du "Type A" qui paraît très théorique. Le "Type B" pourrait se situer au début du mouvement, là où les conditions sont encore relativement homogènes pour progresser jusqu'au "Type D" qui semble plus s'apparenter au fonctionnement d'une coulée continuant d'évoluer après la phase paroxysmale.

En effet, le degré d'évolution du phénomène, ou son intensité, conduit dans certaines classifications à différentes dénominations pas toujours justifiées.

Une référence importante pour les glissements-coulées est le cas d'Aberfan. La très grande majorité des auteurs place ce phénomène dans la catégorie des "flow slides", mais ce type de phénomène complexe reste relativement difficile à classer puisque les conditions y conduisant sont difficiles à évaluer étant donné les différents processus en jeu. En outre, certains processus sont déjà sujets à différentes définitions (particulièrement les coulées boueuses). Sur les trois classifications étudiées précédemment, les différentes dénominations sont parfois croisées (cf. Tableau 1-5), d'où les problèmes de caractérisation de ces phénomènes.

	Varnes (1978)	Huchinson (1988)	Hungr et al (2001)
Coulée de boue	Earthflow (mudflow)	Mudslide	Earthflow
		Flow slide	Flow slide
Glissement-coulée	Mudslide	(slump earthflow)	(avec une déclinaison en fonction du type de matériau)
<i>(lave torrentielle)</i>	<i>(debris flow)</i>	<i>(debris flow)</i>	<i>(debris flow)</i> <i>(mudflow)</i>

Tableau 1-5. Les différentes dénominations pour les glissements-coulées et les coulées boueuses dans les classifications de Varnes (1978), Hutchinson (1988) et Hungr et al (2001).

1.1.5. Conclusion sur les classifications

Les trois principales classifications : de Varnes (1978), Hutchinson (1988), et de Hungr et al (2001), font référence aux types de matériaux mobilisés, et prennent comme point de départ un glissement rotationnel simple ce qui est déjà une simplification relativement forte par rapport aux exemples naturels.

Les vitesses, ou plutôt les degrés d'activité suivant des vitesses mesurées, sont communes aux trois classifications, à quelques nuances près. Elles n'ont qu'une valeur relative et ne sont données qu'à titre d'ordre de grandeur.

Toutes les classifications manquent de données objectives sur les processus étudiés. Des données statistiques sur des processus bien identifiés seraient souhaitables. Cependant, la difficulté est que chaque cas d'étude présente de nombreuses particularités, et que la dimension temps, très mal intégrée, joue énormément dans la compréhension de ce genre de processus. La classification de Hutchinson (1988) s'appuie en partie sur la géologie du site, mais elle manque de critères caractérisant l'état du massif et du sol.

En outre, toutes ces classifications n'explicitent pas les facteurs de prédisposition, ni les facteurs déclenchant dans leur totalité. Elles prennent surtout appui soit sur le mode de rupture, soit sur le mode de propagation, ou sur la morphologie des masses mobilisées.

Malgré les différences qui peuvent exister entre les diverses approches de classification, Hungr et al (2001) ont proposé une grille de lecture permettant de passer d'une classification à une autre (cf. Tableau 1-6). Ce tableau de correspondance est seulement indicatif.

Varnes (1978)	Hutchinson (1988)	Hungr et al. (2001)
Wet sand, silt flow	Flow slide	Sand, silt flow slide
Rapid earth flow	Flow slide (clay)	Clay flow slide
Loess flow	Flow slide (loess)	Loess flow slide
Dry sand flow	--	Dry sand flow
Earth Flow	Mudslide	Earth flow
--	Mudflow	Mud flow
Débris avalanche	Hillslope debris flow	Débris avalanche
Débris flow	Débris flow	Débris flow
--	Hyperconcentrated flow	Débris flood
Rock avalanche	Sturzstrom	Rock avalanche

Tableau 1-6. Comparaison des trois principales classifications (d'après Hungr et al, 2001).

1.2. Présentation des processus de glissements et coulées boueuses

1.2.1 Introduction

Les glissements-coulées sont des processus complexes et composites de déstabilisation de versants. Ils peuvent être repérés dans une présentation générale des mouvements de versants (Meunier, 1994). Les mouvements de versant y sont regroupés en deux grands types en fonction des vitesses de progression : les mouvements rapides (vitesses > 1,5 m/mois) et les mouvements lents (vitesses < 1,5 m/mois). Peuvent être classés dans la première catégorie : les chutes de blocs ("*fall*"), les coulées de débris ("*flows*"), les avalanches de débris (rock avalanches)... Dans la seconde catégorie sont placés des types de mouvements tels que le fauchage ("*topple*"), les étalements latéraux ("*spread*"), ou encore les reptations ("*creep*"). En ce qui concerne les glissements, leurs vitesses sont très variables.

Ces différents types de processus de déstabilisation de versant peut être classés en fonction de deux grands pôles : l'un représenté par l'eau et l'autre par les matériaux solides (cf. Figure 1-4).

Les glissements-coulées présentent deux phases distinctes : une phase de glissement et une phase de coulée de boue.

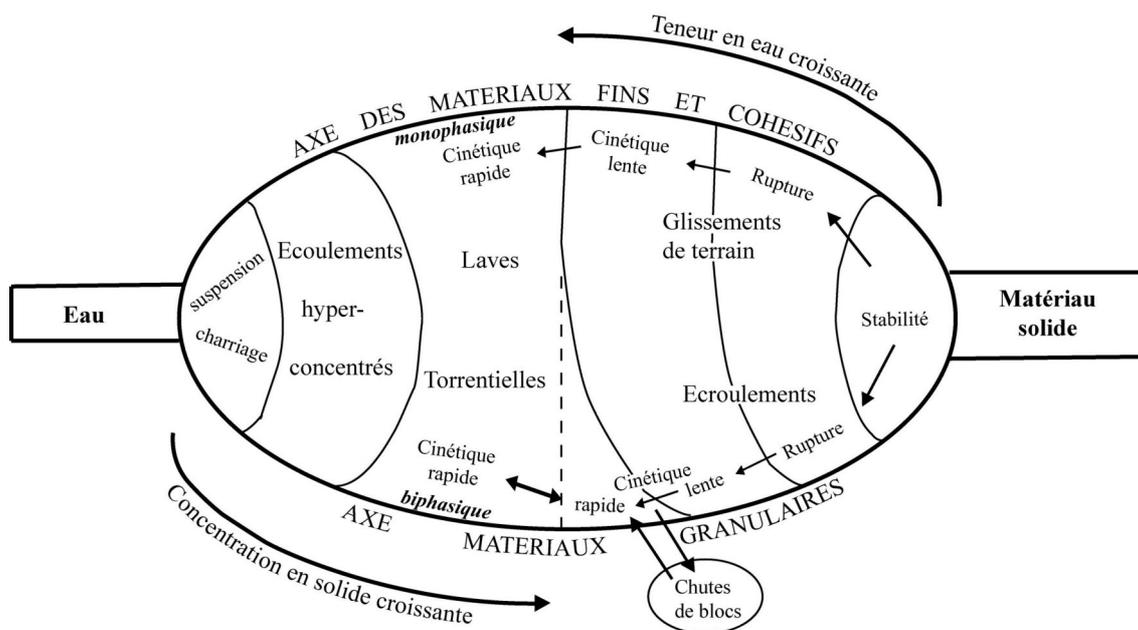


Figure 1-4. Représentation des domaines des mouvements de terrain et de l'hydraulique torrentielle (d'après Meunier, 1994).

Le glissement conduit à mobiliser un volume, plus ou moins important, de matériau au sein duquel les sollicitations mécaniques affaiblissent progressivement sa résistance. Un foisonnement du matériau se produit généralement. Parfois le matériau mobilisé s'accumule, de manière instable, en des points particuliers comme des ruptures de pente.

L'accumulation et le fait que les matériaux glissés soient déstructurés favorisent leur mobilisation par des processus rapides de déstabilisation, comme les coulées de boue. Des apports d'eau sous forme d'orages violents, pluies importantes, fontes des neiges... accompagnent souvent cette dernière phase de mobilisation et la formation d'un mélange viscoplastique : la coulée de boue. Certains auteurs qualifient cette phase d'état "solifluidal" (Cailleux et Tricart, 1950).

Cette situation est aussi très influencée par la nature des matériaux mobilisables. En effet, les faciès les plus propices à ce genre d'événements sont les argiles, les marnes et les flyschs argileux, les moraines... Ce sont des roches riches en colloïdes, ayant donc une grande aptitude à devenir plastiques.

Comme tous les glissements, cette phase peut continuer à se développer, par évolution régressive, vers l'amont et latéralement (Buma J. et van Asch T., 1996). Ce mouvement régressif est fortement conditionné par l'état du massif.

Vers l'aval, les matériaux sont mobilisés en coulées de boue. Ces matériaux peuvent être facilement imbibés d'eau en raison du foisonnement subi dans la partie amont. Par conséquent, ils peuvent être remobilisés dans une nouvelle coulée. Mais ils sont également susceptibles d'évoluer plus lentement, avec formation d'une couche de faible résistance en profondeur.

1.2.2. Glissements de terrain

Le terme de glissement est relativement général ("slope instability"), mais il désigne aussi un processus de mouvement de versant ("landslide" ou "slide").

Les glissements de terrains sont des mouvements de versant affectant toutes sortes de matériaux : sols et roches. Les matériaux mobilisés sont à l'état solide. Leur mode de propagation les distingue nettement des phénomènes torrentiels.

Les mouvements sont initiés à partir d'une surface de rupture (de type rotationnelle ou translationnelle) créée sous l'action de contraintes tangentielles excédant la résistance au cisaillement des matériaux. L'action de l'eau a une grande influence dans leur déclenchement.

Une fois la déstabilisation déclenchée, les masses mobilisées se propagent en aval, ce qui donne un modelé de versant caractéristique (cf. Figure 1-5).

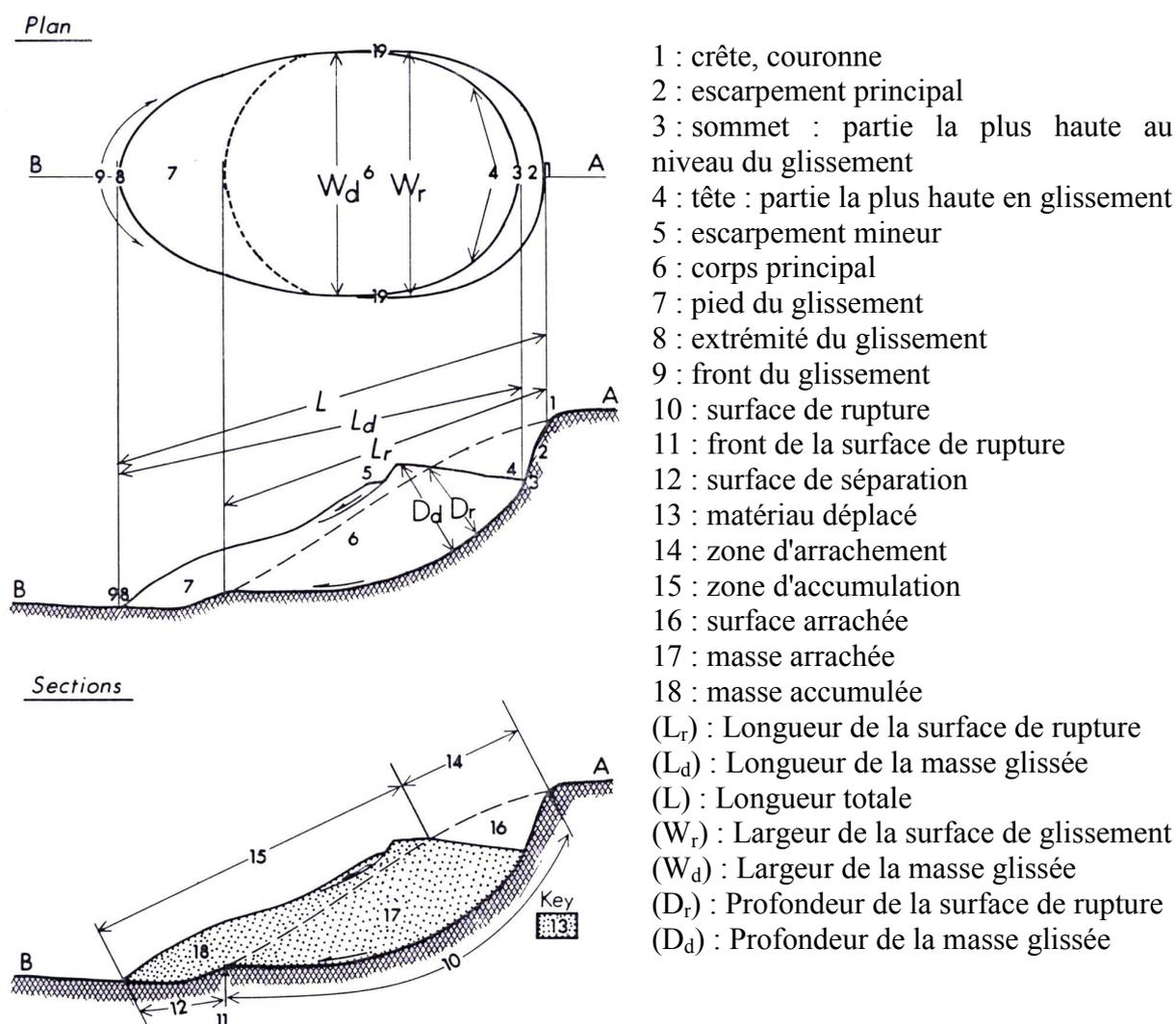


Figure 1-5. Nomenclature descriptive, couramment admise, d'un glissement terrain - légende complète en Annexe 1-2 (d'après IAEG, 1990).

La propagation des matériaux conduit généralement à une perturbation des écoulements souterrains sur le versant affecté, créant ainsi des surpressions qui peuvent favoriser une déstabilisation plus profonde.

1.2.3. Glissements dans les argiles sensibles

Les argiles sensibles ("quick clays") sont des argiles glaciaires, que l'on rencontre aux hautes latitudes, au front des anciens inlandsis quaternaires de l'Europe septentrionale et de l'Amérique du Nord.

D'un point de vue granulométrique, ces matériaux sont des silts argileux plutôt que des argiles. Leur forte porosité et leur forte teneur en eau naturelle, w , très proche de leur teneur en eau de liquidité, w_L , en font des matériaux très sensibles aux sollicitations mécaniques, plus spécialement dynamiques.

La déstabilisation de ces argiles s'apparente à un processus de liquéfaction, avec une mobilisation rapide des matériaux en condition non-drainée. Le mouvement s'initie sur une faible pente, et évolue par régression et extension latérale (cf. Figure 1-6).

Une fois le mouvement initié, ces argiles ont donc un comportement liquide, et une mobilité très importante.



Figure 1-6. Exemple de déstabilisation dans les argiles sensibles à Breckenridge au Canada (Zabura et Mencl, 1969).

1.2.4. Écoulements hyper-concentrés et laves torrentielles

Ces écoulements représentent l'activité torrentielle type en montagne. Les écoulements hyper-concentrés sont des écoulements liquides où la charge solide est particulièrement importante. Les laves sont des écoulements situés à la frontière du domaine fluide et du domaine plastique (Corominas et al, 1996). Elles sont composées d'un mélange de matériaux fins et granulaires (cf. Figure 1-7), avec une quantité variable d'eau (teneur en eau variant de 45% à 9%, Laugier 2002). Leur déclenchement est relativement soudain, ce qui confère à ce genre de processus un caractère violent et spectaculaire.

La vitesse de propagation est extrêmement rapide, puisqu'elle peut atteindre 10 m.s^{-1} . Elle est fonction de la taille et de la concentration des matériaux mobilisés. Les écoulements s'effectuent par bouffées successives qui correspondent à des variations de débit : l'écoulement est dit pulsé (Sauret, 1987).

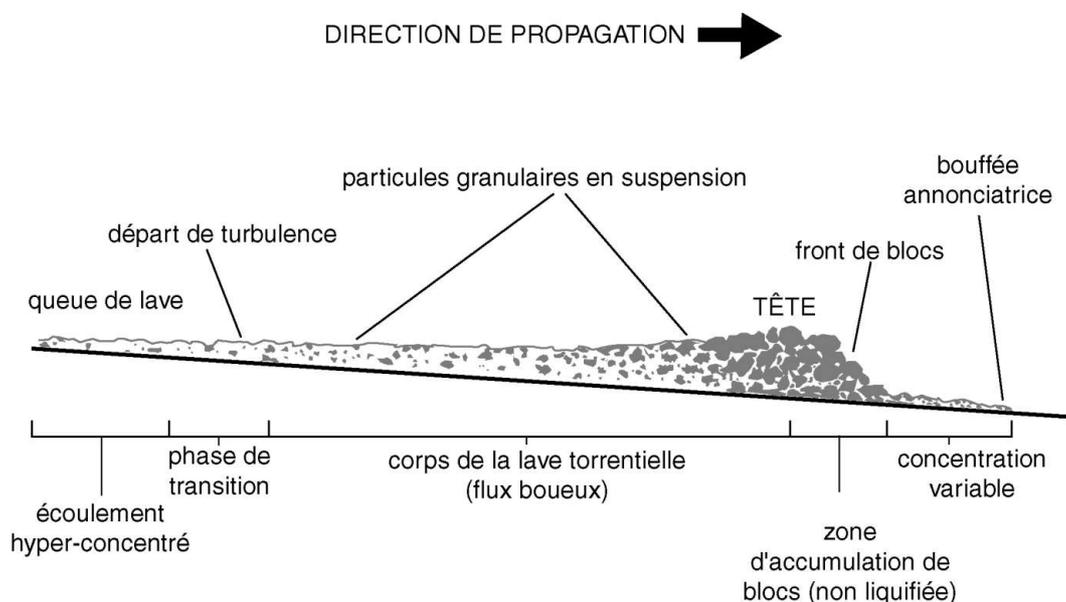


Figure 1-7. Schéma d'une lave torrentielle (d'après Pierson 1986, in Hungr 2001).

Les volumes mis en jeu sont importants et peuvent aller jusqu'à plusieurs milliers de mètres cubes.

Les matériaux mobilisés proviennent de zones sources, de pentes fortes et dénudées où les formations superficielles sont facilement mobilisables, ou de zones du lit torrentiel où les dépôts, en transit, se sont accumulés. Cojean et Bonnet-Staub (1998) ont recensé douze processus de génération d'une lave, généralement directement liés à la présence d'eau.

Ces matériaux sont ensuite pris en charge dans le lit du torrent et chenalisés, généralement jusqu'au cône de déjection. Sauret (1987) emploie même l'expression de coulée de débris canalisée.

Le dépôt résulte d'une diminution de la pente ou d'un élargissement de la section d'écoulement.

1.2.5. Solifluxion, coulées boueuses et glissements-coulées

D'une manière générale, la solifluxion et les coulées de boue désignent tous les mouvements de sols ou formations superficielles, en relation directe avec le franchissement des limites de liquidité (Andersson 1906, et Avenard 1990).

Les coulées ont lieu dans des formations argileuses, ou a granulométrie très fine, (argilite normalement consolidée à surconsolidée, marnes, schiste argileux, flysch argileux...) fissurées et saturées à plasticité moyenne (cf. Figure 1-8).

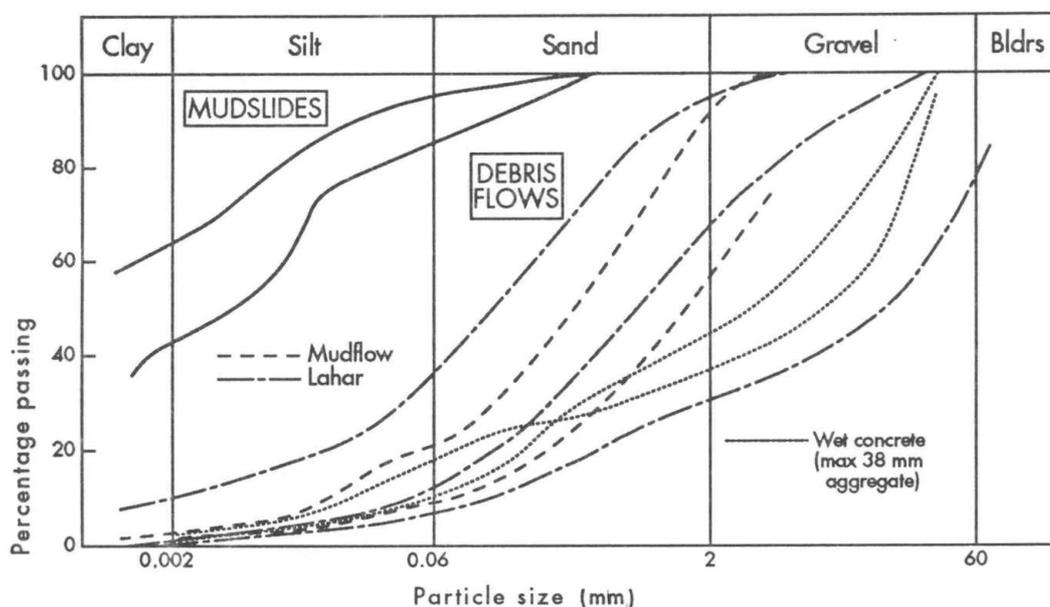


Figure 1-8. Courbes granulométriques des matériaux impliqués dans les coulées de boue (Hutchinson, 1988).

Etant donné le caractère très particulier des formations argileuses (présence d'argiles gonflantes, échanges ioniques avec l'eau interstitielle, forte sensibilité des caractéristiques mécaniques aux conditions hydriques, ...), les processus d'altération mécanique et chimique prennent une importance considérable dans les processus de déclenchement des coulées boueuses. Les conditions climatiques, les apports d'eau superficiels et les nappes souterraines jouent un rôle important.

Sur le terrain, et d'un point de vue morphologique, les mouvements de solifluxion, ou d'anciennes coulées encore actives peuvent se repérer de plusieurs manières : traces de mouvements, présence de bourrelets, présence de petites marches d'escaliers, présence de végétations hygrophiles (comme les prêles), mais aussi grâce à la courbure des troncs des

arbres présents (arbres en tuyaux de pipe, du fait de mouvements de reptation des sols superficiels, mais aussi parfois du rôle du manteau neigeux, forêts "soûles", du fait de mouvements plus profonds).

Une coulée active présente, comme un glissement, une morphologie particulière qui peut se décomposer en trois grandes parties (Hutchinson 1970, Brunsten 1984, Brunsten et Isben 1996) :

- une zone source : zone en forme de cuvette ;
- une zone de transition ("track") : chenal, limité par des levées latérales, assez long ou lobé, et alimenté par la zone source où transite les matériaux mobilisés ;
- une zone d'accumulation ou lobe : zone de faible pente où les matériaux ont tendance à s'accumuler.

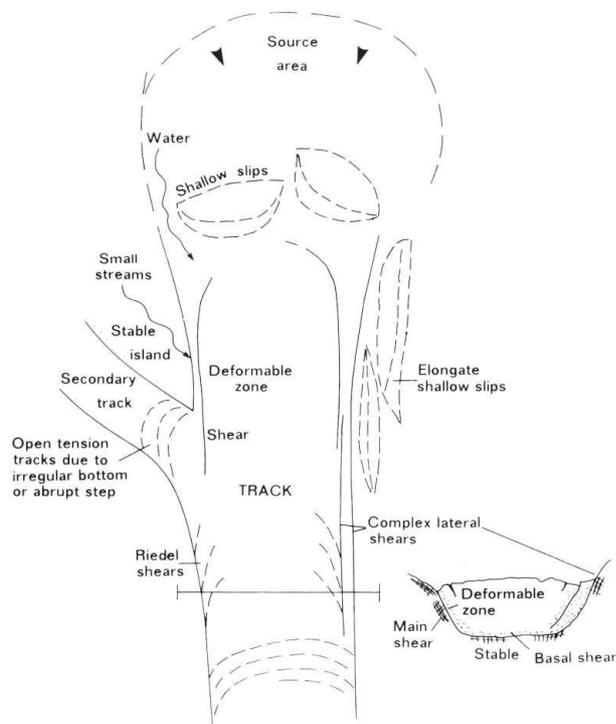
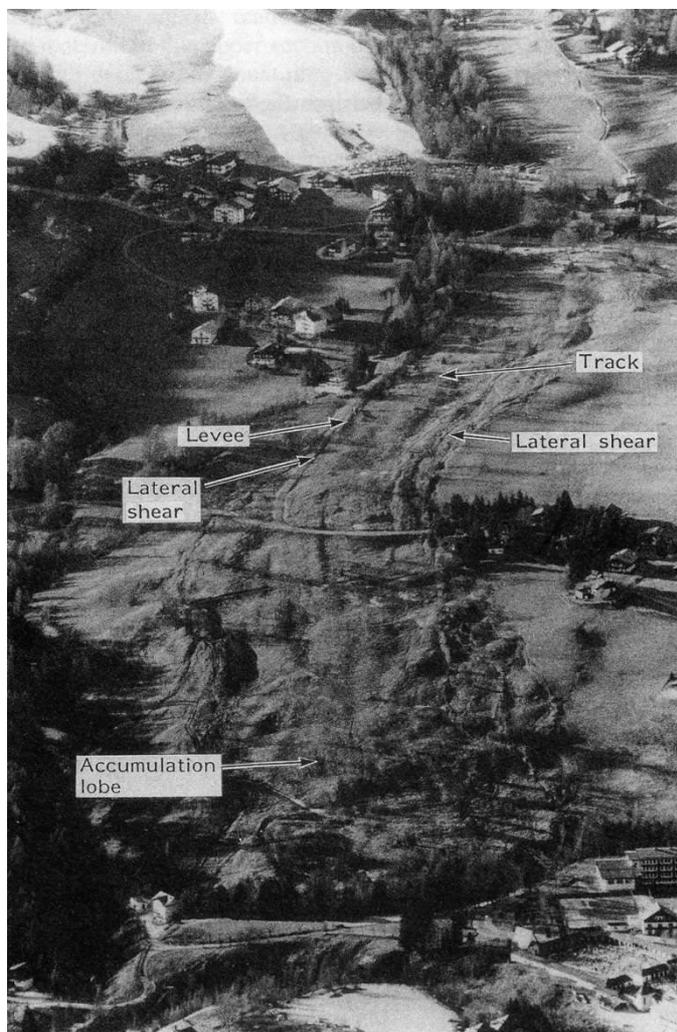


Figure 1-9. Morphologie d'une coulée de boue (d'après Brunsten et Isben 1996 –à gauche, et Brunsten 1984 –à droite).

Photographie de la coulée de Cortina d'Ampezzo (Italie)

Dans certains cas, des glissements antérieurs peuvent déterminer la position d'une nouvelle coulée en raison des modifications occasionnées sur les écoulements souterrains.

Cette situation est, parfois, encore plus marquée, puisque les matériaux du glissements, en cours de progression, deviennent à l'aval des matériaux sources pour la génération d'une coulée de boue. Pour ce type d'événement, on parle de glissement-coulée (cf. Figure 1-10).

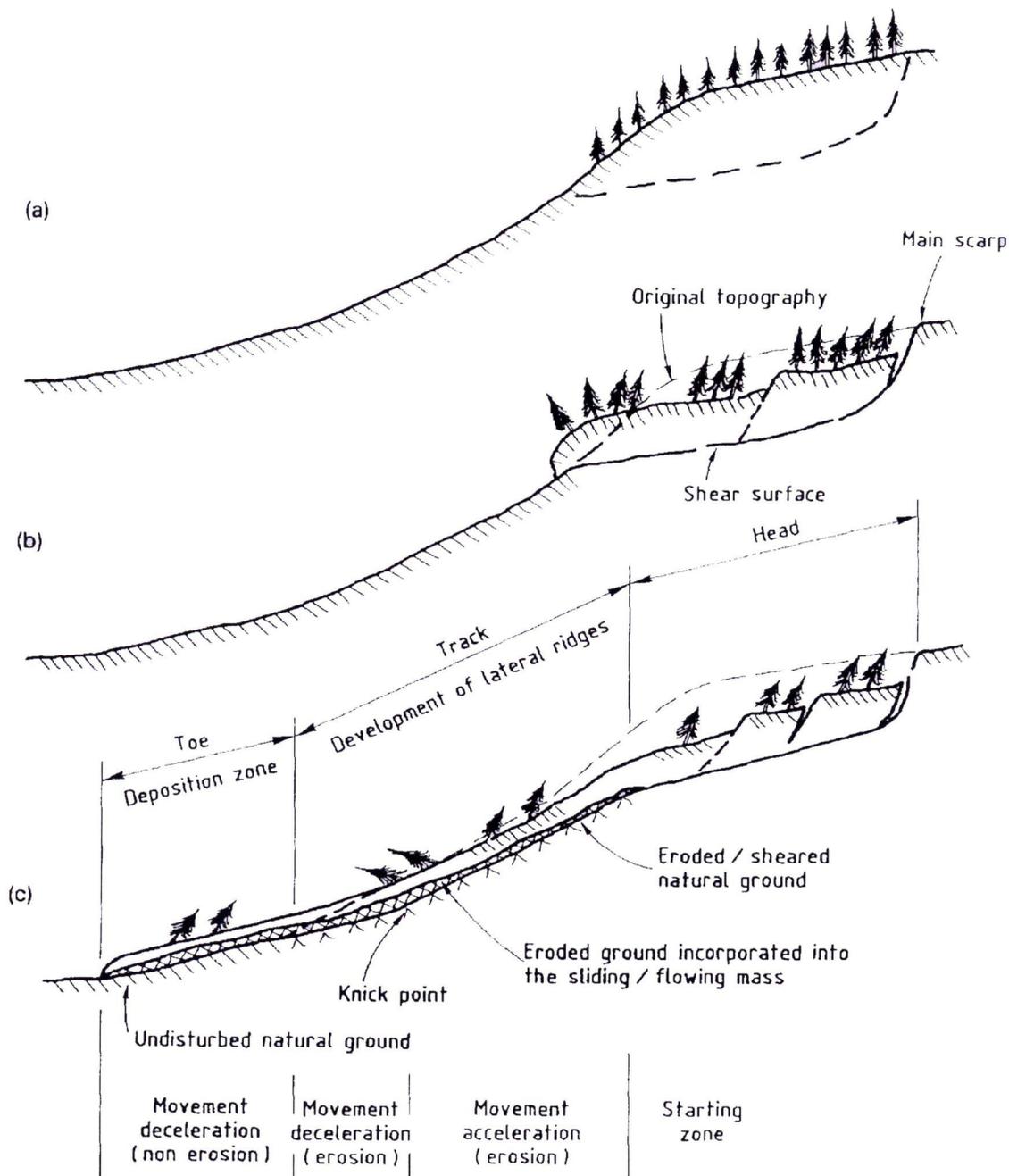


Figure 1-10. Morphologie d'un glissement-coulée (d'après Corominas, 1995).

Les glissements-coulées sont en général des événements rapides et de forte intensité, avec une "fluidisation" des matériaux glissés au niveau de la coulée. Ces matériaux présentent une faible cohésion initiale, et évoluent rapidement en une masse sans cohésion (Hutchinson, 1986).

Comme pour les situations de coulées, les glissements par leur activité modifient fortement les conditions hydrogéologiques du site, et bouleversent l'état des matériaux. Ceci avec un passage des matériaux dans un état proche des caractéristiques résiduelles, alors que la pente se raidit avec leur progression.

Différents auteurs ont montré qu'une coulée boueuse ou un glissement-coulée (en phase de propagation) se déplaçaient comme un corps mort ou "bouchon" (appelé "plug" par les anglo-saxons), c'est à dire que les efforts de cisaillement se concentrent sur les bordures de la coulée (cf. Figure 1-11). Le profil vertical de vitesses de déplacement est quasi constant, et la coulée est limitée à sa base par un plan de cisaillement pour les cas simples. Dans bien des cas, il ne s'agit pas d'un plan de cisaillement bien individualisé, mais d'une succession de plusieurs plans (cf. Figure 1-11).

Sur le terrain, la coulée évolue entre des surfaces de cisaillement striées dans le sens de progression du corps de la coulée. Il peut apparaître aussi des fentes de tractions, se développant sous formes de "crevasses" en bordure la coulée, conformes au modèle de Riedel (Hutchinson 1970 et Brunsten 1984, cf. Figure 1-9).

Afin de mieux appréhender le comportement de la coulée, Craig (1981) a proposé d'utiliser le modèle de Bingham :

$$\sigma = k + \eta_b \dot{\epsilon} \quad \text{Équation 1-1}$$

avec $\dot{\epsilon}$ taux de déformation, η_b viscosité de Bingham.

Cette formulation, conduit à exprimer la vitesse de la coulée, en tout point r , de la façon suivante :

$$\varpi = \frac{1}{\eta_b} \left[\frac{R^2 - r^2}{4} \left(\frac{\gamma(\theta - \sin \theta)}{\theta} \right) - (R - r)k \right] \quad \text{Équation 1-2}$$

$$\text{avec } k = \frac{R_0 \gamma (\theta - \sin \theta) \sin \beta}{2\theta}$$

où ϖ = vitesse pour tout rayon $r < R$, R = rayon de la zone d'écoulement, β = pente de la zone d'écoulement, R_0 = rayon du "rigid plug", γ = poids volumique du matériaux, θ = angle sous-tendu par r .

Une coulée, après son déclenchement, peut aussi continuer à évoluer lentement, par fluage ou par des phénomènes de solifluxion localisés, suivant les apports d'eau qu'elle reçoit, soit par infiltration directe, soit par le versant.

Les coulées boueuses se comportent donc, d'un point de vue rhéologique, comme un fluide à seuil, c'est à dire un fluide qui a besoin d'une sollicitation en cisaillement minimum pour s'écouler (Coussot et Piau, 1993).

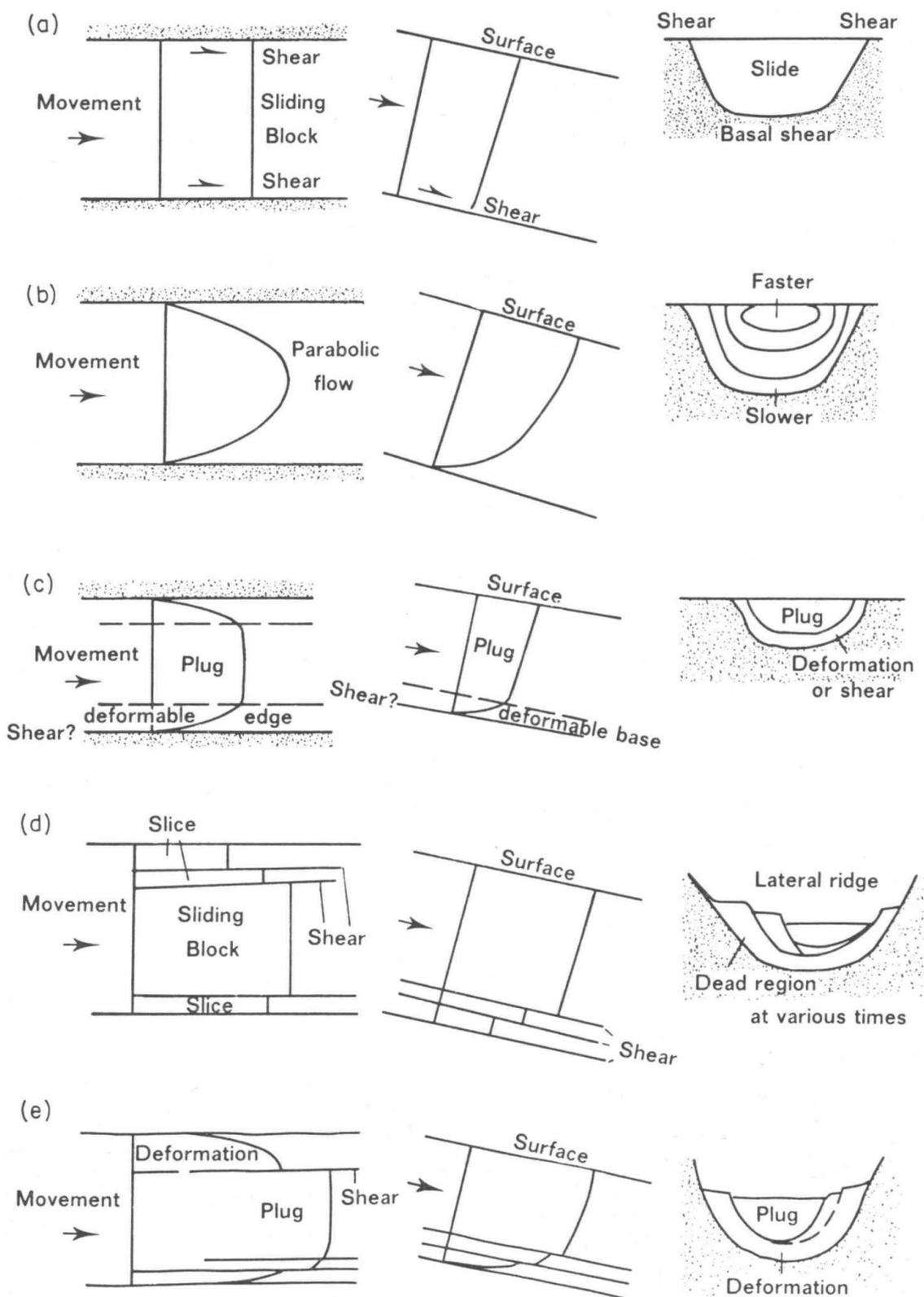


Figure 1-11. Différents profils d'écoulement de coulée boueuse (d'après Brunsten 1984).

a et b : coulée de boue théorique ; c : coulée avec corps rigide ; d : coulée avec différents blocs en mouvement ; e : coulée à corps rigides multiples (cas complexe).

1.3. Principaux facteurs déclenchants des glissements-coulées

Se surimposant aux facteurs de prédisposition, viennent les facteurs déclenchants qui sont les facteurs qui vont faire basculer, ou non, la situation d'un équilibre précaire hérité des facteurs de prédisposition.

1.3.1. Le rôle primordial de l'eau

L'eau joue un rôle très important dans le déclenchement des glissements de terrains. Les glissements-coulées sont d'autant plus concernés que la phase de propagation aval a lieu sous forme de coulée boueuse au cours de laquelle la teneur en eau des matériaux est proche de la teneur en eau de liquidité.

Plusieurs auteurs ont montré que, dans une majorité de situations, les facteurs à l'origine de déstabilisations de versants sont d'ordre hydrauliques : 50% des cas pour Gervreau (1991), 50% pour Desvarreux (1988, in Gervreau 1991) et 60% pour Durville et Lacube (1989).

1.3.1.1. Effets des précipitations

L'augmentation d'humidité en surface, due aux précipitations, n'entraîne pas nécessairement un écoulement vertical immédiat : tant que les forces de capillarité sont supérieures aux forces de gravité, l'eau est retenue. Lorsque la teneur en eau dépasse une valeur limite correspondant à la capacité de rétention spécifique, l'eau se propage vers le bas et humidifie une zone plus profonde du sol. Si la pluie se poursuit suffisamment longtemps, l'humidification sera de plus en plus importante, et entraînera une infiltration "efficace", c'est à dire une arrivée d'eau dans la nappe phréatique (cf. Figure 1-12). Le temps pour arriver jusqu'à la nappe dépend de la perméabilité des terrains traversés.

Outre la pluviométrie au moment du déclenchement de l'événement, l'influence de la pluviométrie antécédente est déterminante, surtout en cas de grosses pluies dans les 12 à 24 heures précédant le déclenchement (Dai et Lee, 2001).

Cette influence est aussi liée aux saisons et à des conditions climatiques particulières (cf. Figure 1-13).

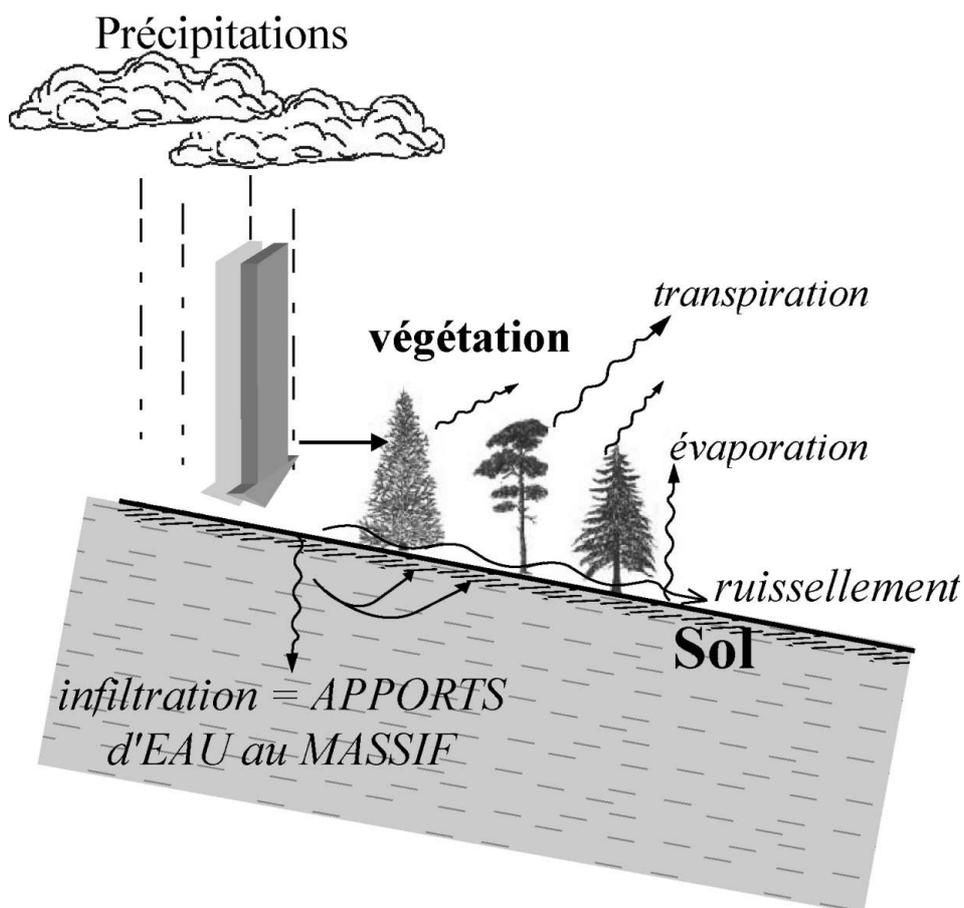


Figure 1-12. Effets principaux des précipitations

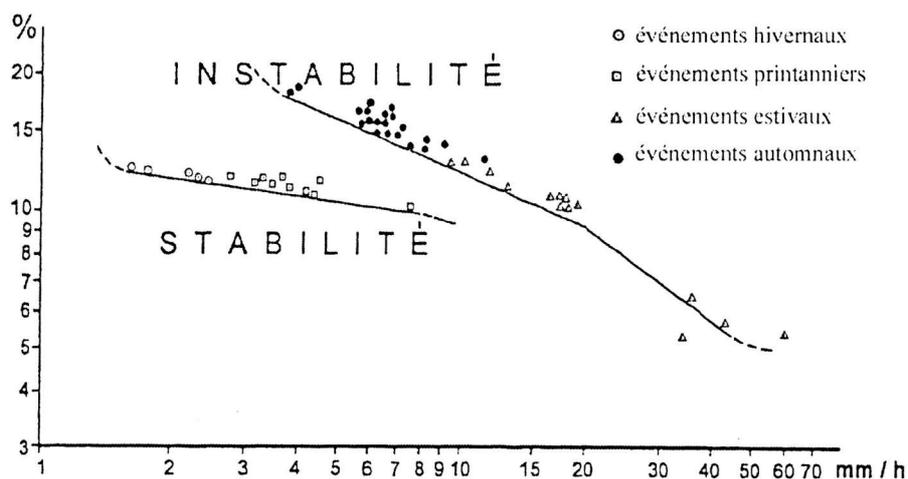


Figure 1-13. Relations entre le déclenchement de glissements de terrain dans les formations superficielles et les paramètres hydrologiques : intensité horaire de l'événement pluviométrique et hauteur de pluie cumulée de l'événement en pourcentage du module pluviométrique annuel (d'après Govi et al, 1985).

(Les lignes montrent les valeurs seuils au-dessus desquelles se déclenchent les glissements de terrain dans le bassin versant occidental du Pô.)

L'eau apportée à la surface du sol remplace progressivement l'air qui se trouve dans les interstices du sol, et engendre :

- une augmentation du poids volumique du sol situé au-dessus de la nappe ;
- une diminution des forces de capillarité qui se développent à l'interface entre la phase air et la phase eau, d'où une baisse de la succion qui joue un rôle cohésif sur le sol ;
- et enfin une montée brutale de la nappe.

Afin de pouvoir quantifier l'influence des précipitations, il est nécessaire de calculer l'Evapo-Transpiration Potentielle (ETP), ainsi que quelques autres paramètres couramment évalués en climatologie, hydrologie et hydrogéologie (cf. Chapitre 3 et Annexe 3-7).

1.3.1.2. Influence de la présence d'une nappe

Un critère simple pour évaluer l'état de stabilité d'une pente est le facteur de sécurité (noté F ou Fs). Dans le cas d'une pente semi-infinie, l'analyse des forces motrices et des forces résistantes conduit à une expression simple de F.

La formulation des forces résistantes, pour un sol saturé, peut s'exprimer suivant le critère de Coulomb :

$$S = C' + C_r + (\sigma - u_w) \tan \varphi' \quad \text{Équation 1-3}$$

avec C' cohésion effective du sol (en Pa), Cr cohésion racinaire (s'il y a lieu, en Pa), φ' angle de frottement interne effectif du sol (en degrés), σ contrainte normale sur la surface potentielle de rupture (en Pa), et u_w la pression interstitielle (en Pa).

A partir de l'équation 1-3, en introduisant $C = C' + C_r$, le facteur de sécurité est défini par l'expression suivante (cf. Figure 1-14) :

$$F = \frac{C + [(1 - m - n) \cdot \gamma + (m + n) \cdot \gamma_{sat} - m \cdot \gamma_w] \cdot \tan \varphi \cdot z \cdot \cos^2 \beta}{[(1 - m - n) \cdot \gamma + (m + n) \cdot \gamma_{sat}] \cdot z \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad \text{Équation 1-4}$$

avec γ : poids volumique du sol (en $N \cdot m^{-3}$),
 γ_{sat} : est le poids volumique du sol saturé (en $N \cdot m^{-3}$),
 γ_w : poids volumique de l'eau (en $N \cdot m^{-3}$),
 z : la profondeur de la surface de rupture (en m),
 m : le paramètre donnant la position de la surface piézométrique,
 n : le paramètre donnant la position du front d'infiltration,
 φ : angle de frottement interne du matériau (en degrés),
 β : est l'angle de la pente topographique et celui de la surface de rupture avec l'horizontale (en degrés).

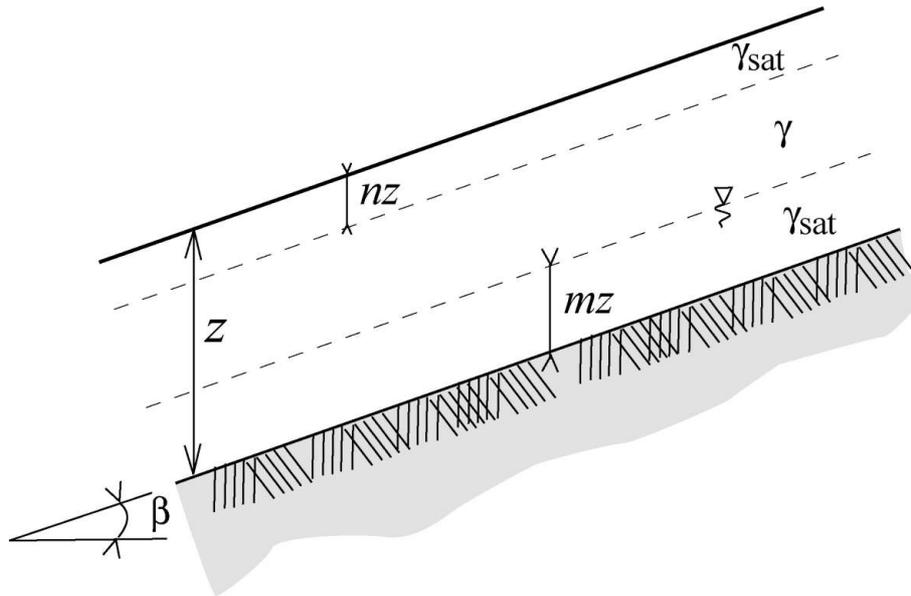


Figure 1-14. Représentation d'une pente semi-infinie avec les paramètres décrivant l'influence d'un front d'infiltration et la nappe.

Cette expression du facteur de sécurité permet donc d'évaluer la stabilité d'une pente. Lorsque la pente est stable $F > 1$, et dans le cas où $F \leq 1$ alors la pente est dite instable et une rupture est probable.

En définissant un poids volumique équivalent (γ_{eq}) :

$$\gamma_{eq} = (1 - m - n) \cdot \gamma + (m + n) \cdot \gamma_{sat} \quad \text{Équation 1-5,}$$

nous obtenons donc l'expression suivante pour le facteur de sécurité :

$$F = \frac{C}{\gamma_{eq} \cdot z \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} + \left(1 - \frac{m \cdot \gamma_w}{\gamma_{eq}} \right) \times \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \quad \text{Équation 1-6.}$$

En dérivant cette expression par rapport à m (niveau piézométrique), nous obtenons :

$$\frac{\partial F}{\partial m} = \frac{-(\gamma_{sat} - \gamma)}{\gamma_{eq}^2} \cdot \frac{C}{z \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} - \gamma_w \cdot \frac{n \cdot \gamma_{sat} + (1 - n) \cdot \gamma}{\gamma_{eq}^2} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} < 0 \quad \text{Équation 1-7.}$$

Or $(\gamma_{sat} - \gamma)$ est toujours positif, par conséquent $\left(\frac{\partial F}{\partial m} \right)$ est toujours négatif quelque soit la valeur de m . Par conséquent, cette expression met en évidence le rôle particulièrement déstabilisant d'une augmentation du niveau piézométrique.

Le coefficient de sécurité peut être adapté au cas particulier d'une coulée de boue, et afin de tenir compte de l'aspect fini de la pente, F devient :

$$F = \frac{b \cdot (\cos^2 \beta - r_u) + K_L \cdot Z \cdot (1 - r_u) \cdot \tan \varphi}{b \cdot \sin \beta \cdot \cos \beta} \quad \text{Équation 1-8}$$

(Hutchinson et Bhandari, 1971)

où b = largeur du glissement, K_L = coefficient relatif à la pression latérale au glissement ($1 - \sin \varphi'$), r_u = pression de pore ($\frac{u_w}{\gamma' \times m}$).

Notons que la chimie des eaux des nappes de versants peut aussi avoir un rôle sur les caractéristiques de certaines argiles, et modifier leur comportement.

1.3.1.3. Effet de la descente d'un front d'infiltration

Les effets de la descente d'un front d'infiltration peuvent s'étendre à partir de l'expression générale du facteur de sécurité (Équation 1-4). En dérivant cette expression par rapport à n , nous pouvons mettre en évidence le rôle du front d'infiltration sur le coefficient de sécurité :

$$\frac{\partial F}{\partial n} = -\frac{\gamma_{sat} - \gamma}{\gamma_{eq}^2} \cdot \left(\frac{C}{z \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} - m \cdot \gamma_w \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \right) \quad \text{Équation 1-9}$$

Nous pouvons constater plus particulièrement que :

si $m = 0$ et $C = 0$, alors $\frac{\partial F}{\partial n} = 0$;

si $m = 0$ et $C \neq 0$, alors $\frac{\partial F}{\partial n} < 0$;

si $m \neq 0$ et $C = 0$, alors $\frac{\partial F}{\partial n} > 0$;

dans les autres cas $\frac{\partial F}{\partial n} < 0$, si et seulement si $\left(\frac{C}{z \cdot \cos \beta \cdot \sin \beta} - m \cdot \gamma_w \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} \right) > 0$, ce qui

traduit que l'influence du front d'infiltration diminue avec la montée de la nappe.

La présence et la descente d'un front d'infiltration apparaît donc, sauf cas particulier, comme un facteur déstabilisant.

Ceci confirme, de manière analytique, le rôle prépondérant de l'eau dans la stabilité des versants.

1.3.1.4. Rôle de végétation et de l'ensoleillement

Le rôle de la végétation et de l'ensoleillement sont liés, et leur pouvoir d'évapotranspiration représente un gain potentiel dans la stabilité. Cependant, cet aspect ne prend pas en compte le fait que ces deux facteurs présentent d'autres aspects relativement néfastes pour la stabilité des versants.

La végétation, d'une part, par la présence de ces racines favorise le retrait d'eau du massif (cf. Figure 1-15), mais ces mêmes racines contribuent nettement à la fracturation du massif et à son altération. La présence de végétation peut aussi contribuer à limiter le ruissellement et la génération de laves torrentielles. Toutefois dans le cas de glissements et de coulées boueuses, son influence est plus limitée.

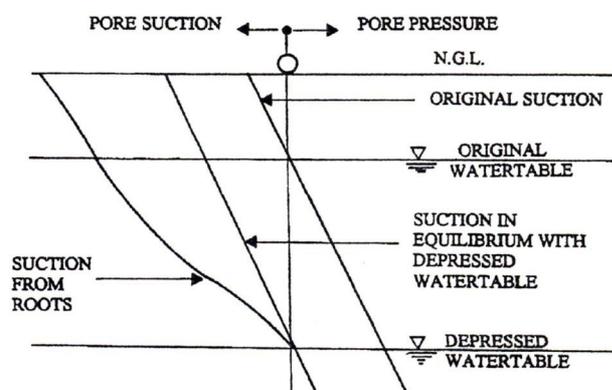


Figure 1-15. Influence de la végétation sur la succion (d'après Cherubini et Giasi, 1997).

D'autre part, l'ensoleillement joue un double rôle en favorisant le développement de la végétation et de l'évaporation de l'eau. Mais il contribue aussi à l'altération du massif en amplifiant les effets de la thermoclastie.

1.3.2. Les autres facteurs déclenchants

1.3.2.1. L'affaiblissement progressif des caractéristiques mécaniques

Toute formation située en surface ou sub-surface est soumise à de nombreuses sollicitations qui contribuent à l'affaiblissement de ces caractéristiques mécaniques. Le fluage, fonction du temps, est un processus très important, responsable d'une dégradation progressive des paramètres de résistance des matériaux.

La mobilisation des matériaux dans des glissements et coulées boueuses est d'autant plus facilitée que les matériaux présentent des caractéristiques proches des caractéristiques résiduelles.

1.3.2.2. Les séismes

L'influence des séismes a été démontré dans de nombreux cas de glissements de terrains, plus principalement lorsque des processus de liquéfaction sont en cause. Ceci a été également vérifié dans le cas de certains glissements-coulées comme pour le cas du Vadoncello en Italie (Cotecchia et Del Prete 1984 et 1986, et Song 1996).

1.3.2.3. Les facteurs anthropiques

Outre les facteurs d'origine naturelle, certains aménagements ou actions anthropiques peuvent aussi engendrer des conditions défavorables à la stabilité de certains versants. Dans certains cas, les différentes infrastructures concentrent le ruissellement sur des zones plus restreintes, d'autres fois, elles modifient l'aspect des pentes (allant même jusqu'à créer parfois des contre pentes), ou contribuent à alimenter des zones sensibles par des rejets ou des fuites du réseaux d'eau...

De plus, la déforestation peut augmenter les transports de masse de particules fines. Les possibilités d'interactions des activités humaines sur la stabilité des pentes sont nombreuses, et souvent sous-estimées.

1.4. Conclusions

Les processus de glissements-coulées peuvent être définis comme un mode complexe de déstabilisation de versant associant deux ensembles de caractéristiques cinématiques et rhéologiques différentes qui peuvent être considérées séparément, comme deux processus complets de mouvement de versant.

Les glissements-coulées sont donc des processus faisant appel à une phase de glissement (comportement élastoplastique) qui va évoluer, en aval, de manière relativement rapide en coulée boueuse (comportement viscoplastique).

Pour ces deux phases, l'eau joue un rôle majeur comme on a pu l'établir en considérant le cas théorique du glissement plan indéfini.

Chapitre 2 : Contexte géologique, géomorphologique et géotechnique des glissements-coulées de la région de Barcelonnette

2.1. Données générales sur la région d'étude

Dans les Alpes du Sud, la vallée de l'Ubaye, ancienne vallée glaciaire globalement orientée Est – Ouest, se situe à 70 kilomètres au Nord – Est de Digne-les-Bains (département des Alpes-de-Haute-Provence). Barcelonnette, sous-préfecture, est la principale commune de la Vallée et de la zone d'étude (cf. Figure 2-1).

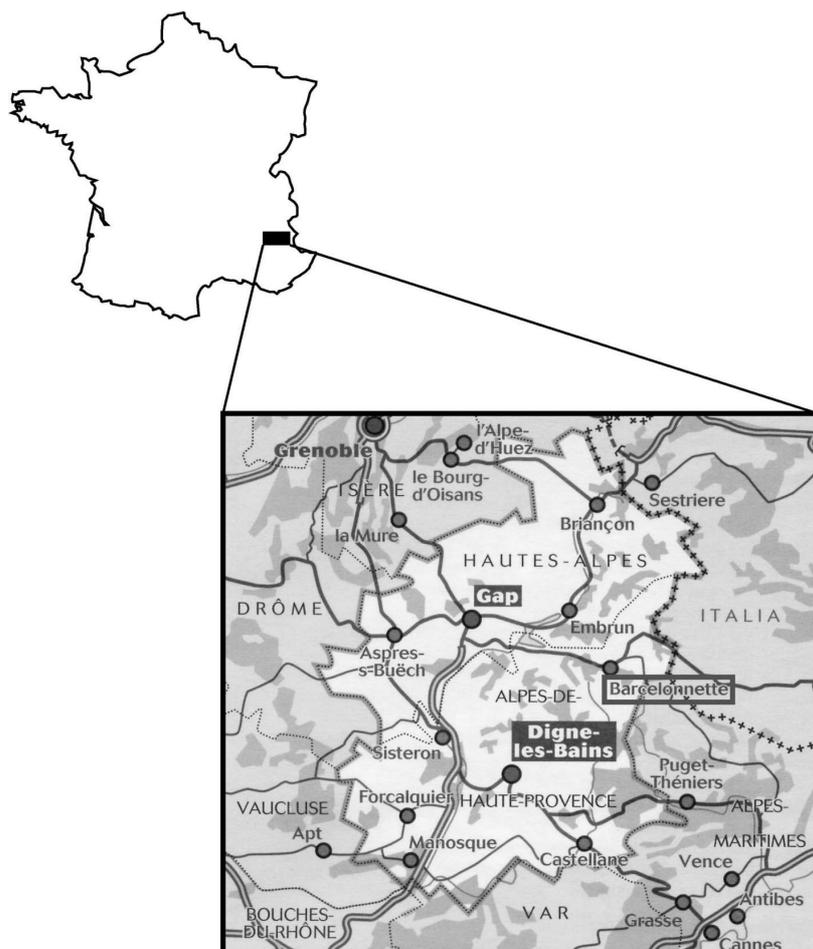


Figure 2-1. Localisation de la zone d'étude (d'après Michelin, carte 334, 2002).

La région présente un climat de type méditerranéen, avec une légère influence continentale par les conditions géomorphologiques de la région. Le manteau neigeux est relativement important (supérieur à 2 m) à partir de 2000 – 2500 m d'altitude.

Les données climatiques, température et pluviométrie en particulier, sont fournies par la station de Barcelonnette située à 1140 m d'altitude (station Météo-France du Verger). Les précipitations, enregistrées dans la vallée donnent un module pluviométrique annuel moyen de 739,8 mm (moyenne de 1961 à 2000), les précipitations étant bien réparties sur l'année avec un maximum en automne (cf. Figure 2-2).

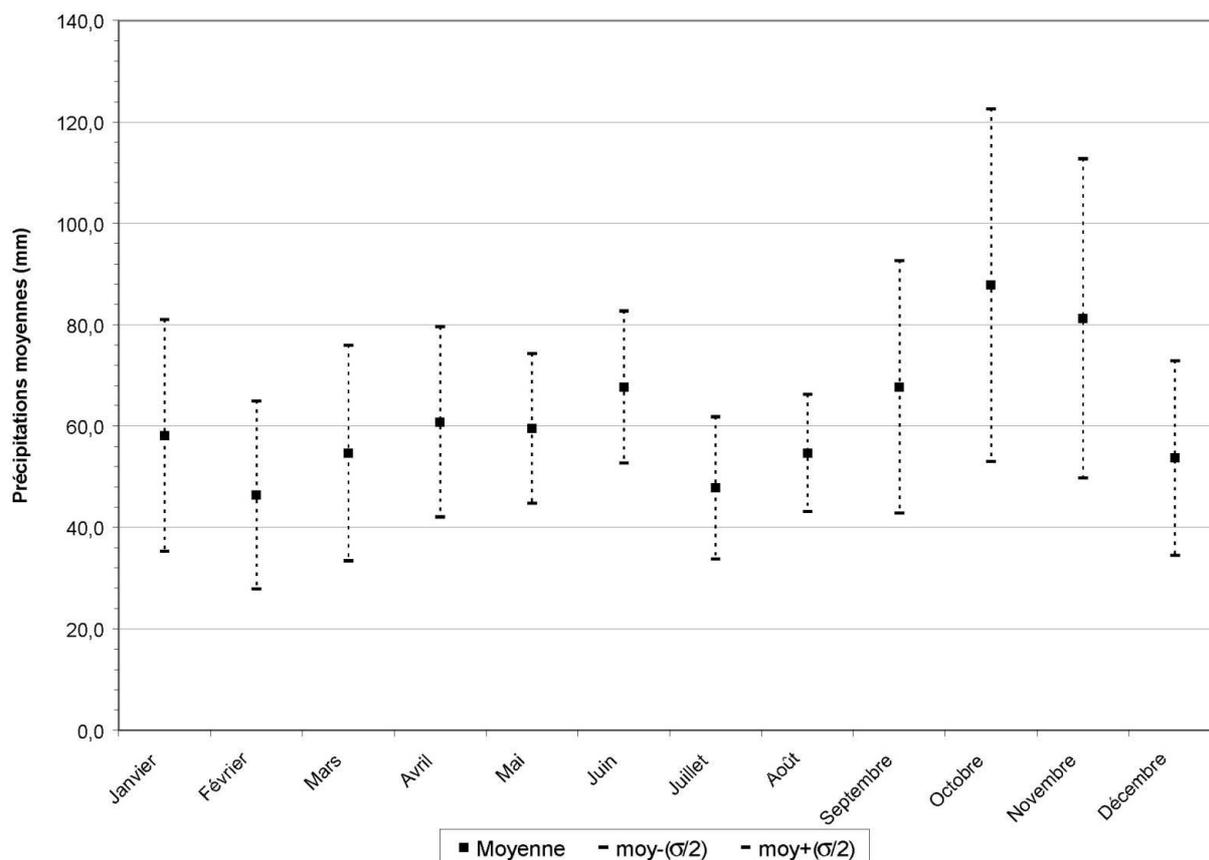


Figure 2-2. Précipitations moyennes mensuelles, de 1961 à 2000, enregistrées à la station du Verger (à 1140 m d'altitude) -Données R.T.M., d'après Météo-France (valeurs moyennes, valeurs +/- 2 écarts-types).

Néanmoins, sur les crêtes, des modules annuels de 1000 à 1200 mm seraient plus réalistes. Le Service O.N.F.-R.T.M.* de Digne a fait installer depuis peu un pluviomètre automatique sur le site du glissement de la Valette (à 1450 m d'altitude) ainsi qu'un limnigraphe au niveau du pertuis du piège à matériaux construit dans le lit du torrent dans sa partie inférieure.

Le régime de l'Ubaye, cours d'eau principal drainant cette vallée, est de type nivo-pluvial (cf. Figure 2-3).

* Restauration des Terrains en Montagne dépendant de l'Office National des Forêts

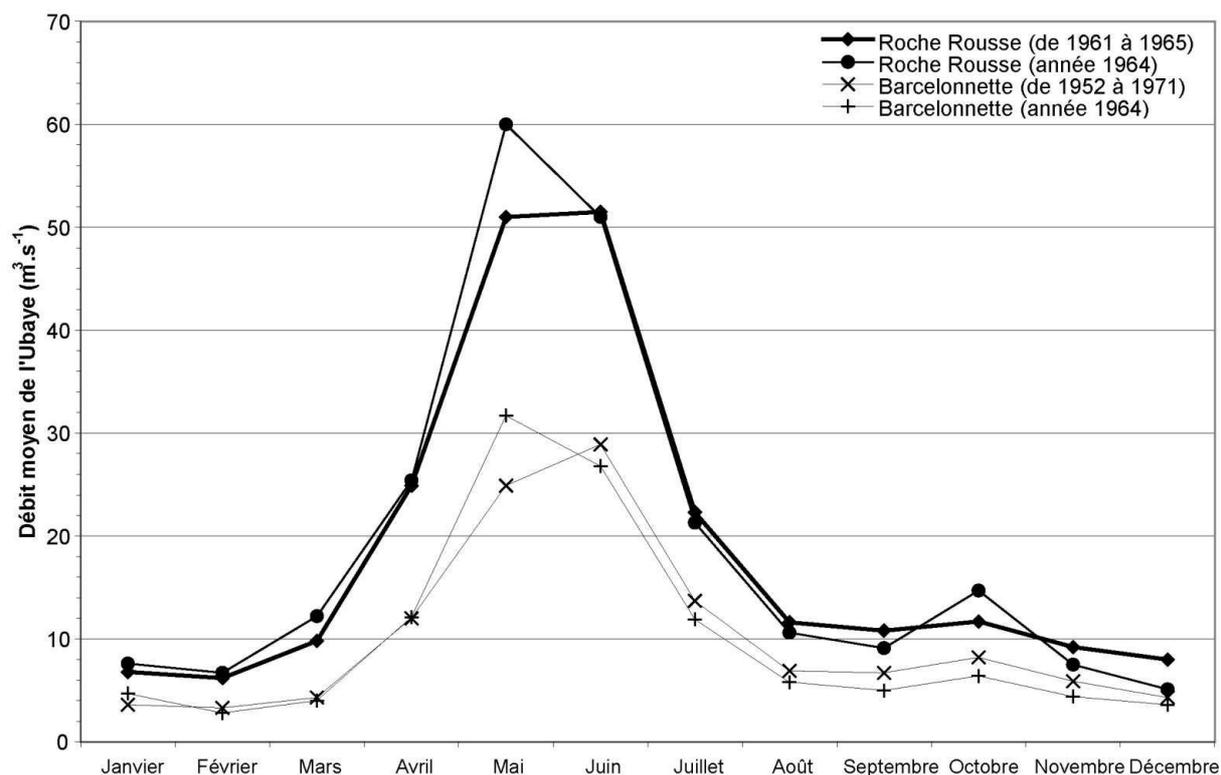


Figure 2-3. Débit moyen de l'Ubaye (Barcelonnette : altitude de 1135 m et surface de bassin versant de 549 km² ; Roche Rousse : altitude de 790 m et surface de bassin versant = 946 km²), d'après Légier (1977).

Une forte érosion torrentielle est présente au niveau du bassin de Barcelonnette, ainsi qu'une érosion généralisée dans les "Terres Noires", ou marnes du Callovo-Oxfordien, créant ainsi un modelé, avec de nombreuses ravines, qualifié de relief en "badlands".

2.2. Cadre structural de la fenêtre de Barcelonnette et de la zone d'étude

2.2.1. La fenêtre de Barcelonnette dans le contexte géologique régional

Le bassin de Barcelonnette fait partie de l'unité des Alpes Dauphinoises, zone interne comprenant les nappes du Briançonnais, de l'Embrunais, du Queyras et de l'Argentera-Mercantour moyen et supérieur. Le substratum est constitué par la couverture secondaire, décollée au niveau du Trias et visible dans la fenêtre tectonique de Barcelonnette (cf. Figure 2-4).

La région de Barcelonnette est ainsi caractérisée par la présence des Terres Noires du Jurassique (Callovo-Oxfordien) en fond de vallée et jusqu'à mi-hauteur des versants. Ces

terrains, qui peuvent être qualifiés d'autochtones, sont recouverts par les nappes de l'Embrunais-Ubaye.



Figure 2-4. Schéma structural de l'Embrunais-Ubaye (d'après Kerckhove, 1969).

1- Massifs cristallins externes ; 2- Zone externe (autochtone et parautochtone, Trias à Priabonien) ; 3- Zone subbriançonnaise ; 4- Zone briançonnaise A- Permo-Carbonifère et mésozoïque, B- Flysch nummulitique de la bordure occidentale ; 5- Ecailles basales de la Nappe du Flysch à Helminthoïdes du Parpaillon ; 6- Nappe de l'Autapie et olistostromes associés ; 7- Nappe du Parpaillon A- Complexe schisteux de base, B- Flysch à Helminthoïdes et Grès de l'Embrunais.

Dans la région considérée, ces nappes sont principalement représentées par la nappe de l'Autapie surmontée par la nappe du Parpaillon. Les contacts, irréguliers et complexes, sont jalonnés d'écailles tectoniques. Les flyschs crétacés constituant ces nappes sont connus sous la dénomination de Flyschs à Helminthoïdes.

L'histoire géologique et la tectonogénèse de l'Embrunais-Ubaye sont complexes et comportent plusieurs phases (cf. Figure 2-5).

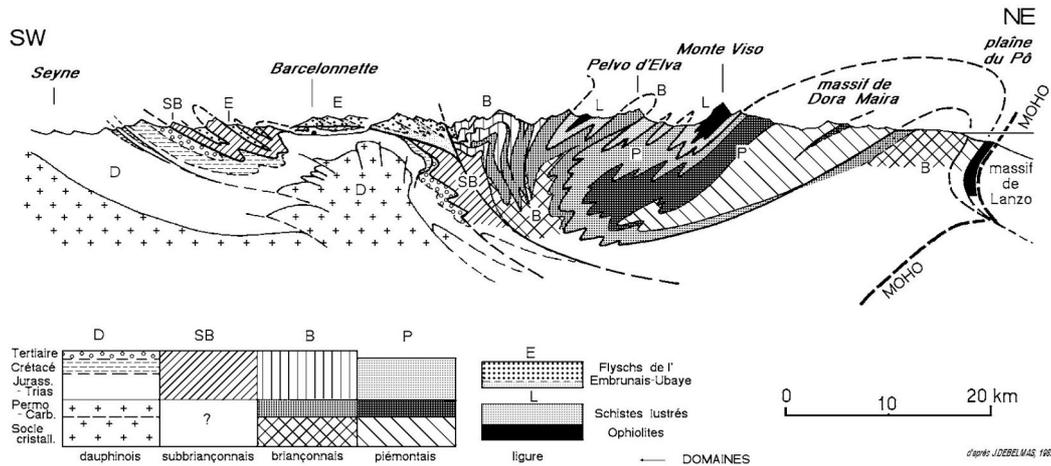


Figure 2-5. Coupe structurale des Alpes du sud, à la latitude de Barcelonnette (d'après, Debelmas 1983 in Evin 1997).

La première phase affecte l'Argentera et consiste en un soulèvement commençant au Crétacé supérieur. Cette phase, au niveau de la zone d'étude, engendre des déformations sur l'Autochtone suivant des axes structuraux Est – Ouest.

Puis, les zones internes briançonnaise et subbriançonnaise se seraient soulevées à l'Eocène et auraient permis le départ des nappes de l'Autapie et du Parpaillon.

La mise en place de la nappe de l'Autapie a lieu en domaine marin et de manière précoce à la fin du Priabonien dans le domaine "pennique externe". Lors de sa mise en place, la nappe de l'Autapie a charrié la nappe du Pelat (calcaire planctonique subbriançonnais). Cette première phase de mise en place entraîne un comblement du domaine par l'avancée des boues éocènes et des blocs de flyschs néocrétacés. Immédiatement après ce comblement, le bassin se soulève et crée une vaste zone anticlinale appelée "dôme de Barcelonnette".

Au Sannoisien (début de l'Oligocène), le "dôme de Barcelonnette" subit une forte érosion mettant à nu les Terres Noires et parfois le Dogger. Puis, sur cette surface d'érosion, des mouvements gravitaires apparaissent et charrient des matériaux de l'Autapie et du Subbriançonnais sur l'Autochtone.

A la fin de l'Oligocène, surviennent des mouvements de plissements internes d'axes N140 à 160° E entraînant une forte perturbation de la base du contact. Ces perturbations ont été rapidement nivelées par l'érosion.

Le début du Miocène est marqué par la mise en place de la nappe du Parpaillon qui glisse sur la surface d'érosion. Au Miocène supérieur, les phases de soulèvement des massifs cristallins externes entraînent des déformations à vaste rayon de courbure. Puis un faisceau de failles (normales, à regard Est) et de flexures structurent l'Autochtone et les nappes de l'Embrunais-Ubaye au début du Pliocène (cf. Figure 2-6).

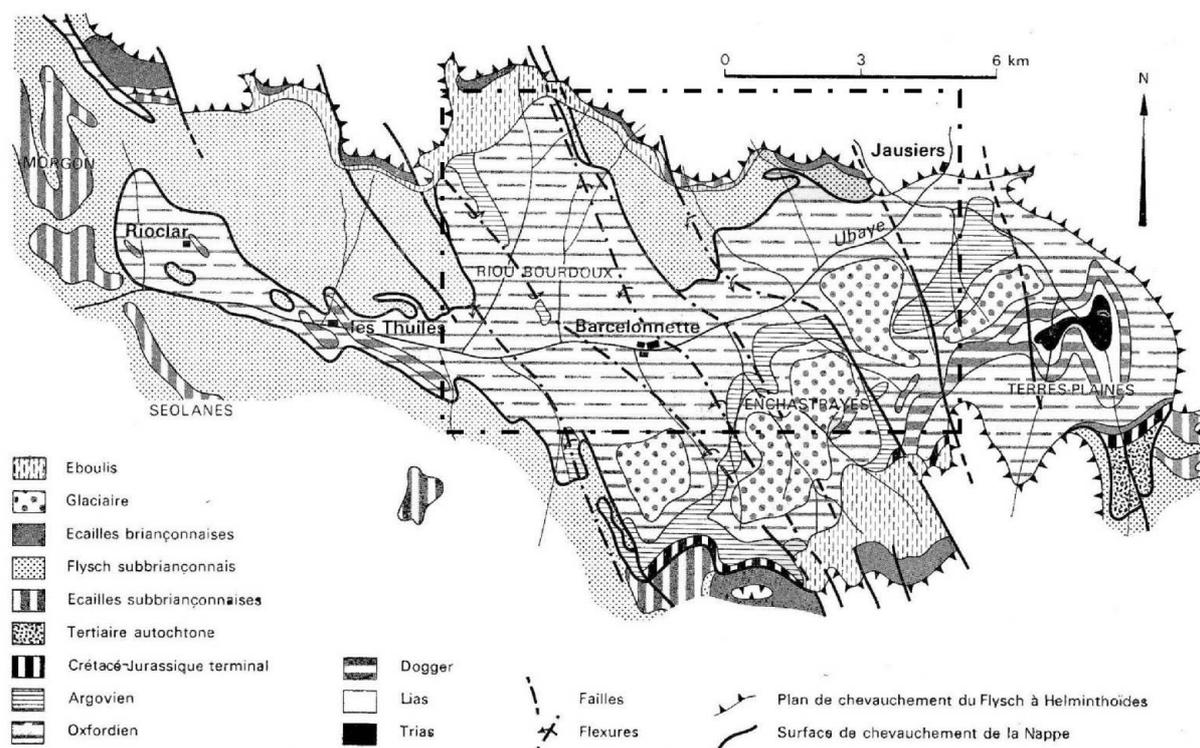


Figure 2-6a. Cartographie de la fenêtre de Barcelonnette (d'après Plan, 1968).

2.2.2. Contexte géologique et structural de la zone d'étude

La zone d'étude s'étend de St Pons (légèrement à l'Ouest de Barcelonnette) jusqu'aux Davids (à l'Est de Barcelonnette, un peu avant Jausiers) –cf. Figure 2-6b et Annexe 2-1. Le contexte géologique a été particulièrement étudié aux abords des glissements-coulées analysés (cf. Chapitre 4).

Les principales formations sont au nombre de trois : les Terres Noires (Callovo-Oxfordien), le Flysch dissocié de la nappe de l'Autapie et le Flysch à Helminthoïdes de la nappe du Parpaillon (cf. Figure 2-7).

2.2.2.1. L'Autochtone : les Terres Noires du Callovo-Oxfordien

Le Jurassique, autochtone, affleurant à la faveur de la fenêtre, est essentiellement représenté par les Terres Noires, marnes callovo-oxfordiennes. Cette unité est importante avec une épaisseur d'environ 300 mètres. Il est cependant possible d'observer aussi quelques affleurements d'Argovien. Ils sont présents sous forme de marnes noires alternant avec des bancs de 20 à 30 centimètres de calcaire argileux détritique à patine ocre-rouge (cf. Annexe 2-2).

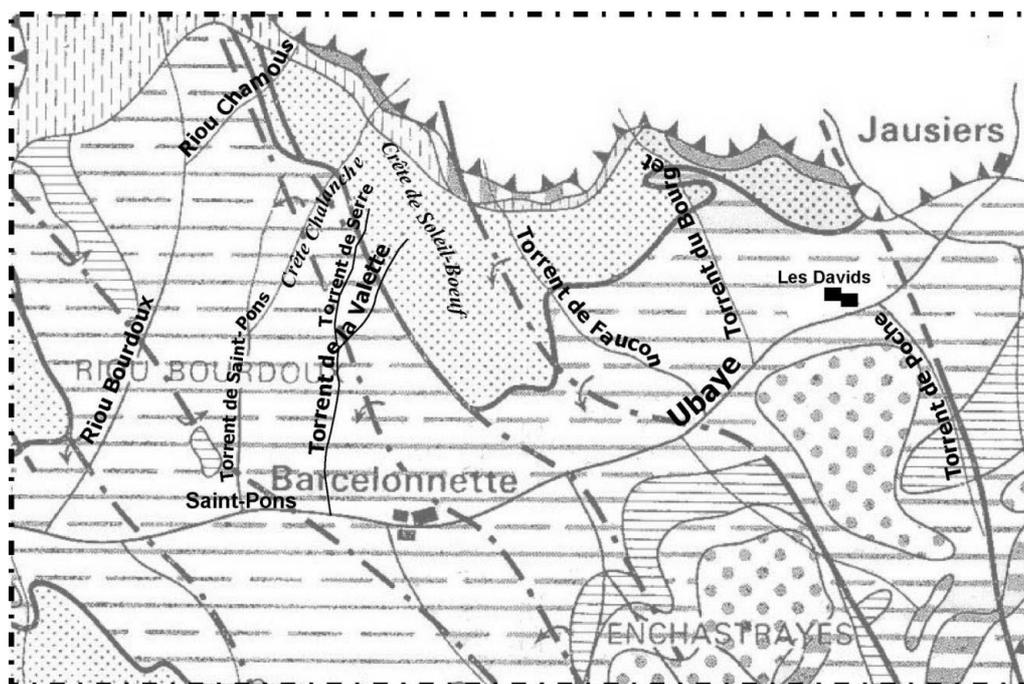


Figure 2-6b. Cartographie de la zone d'étude (d'après Plan, 1968) – extrait de la Figure 2-6a.

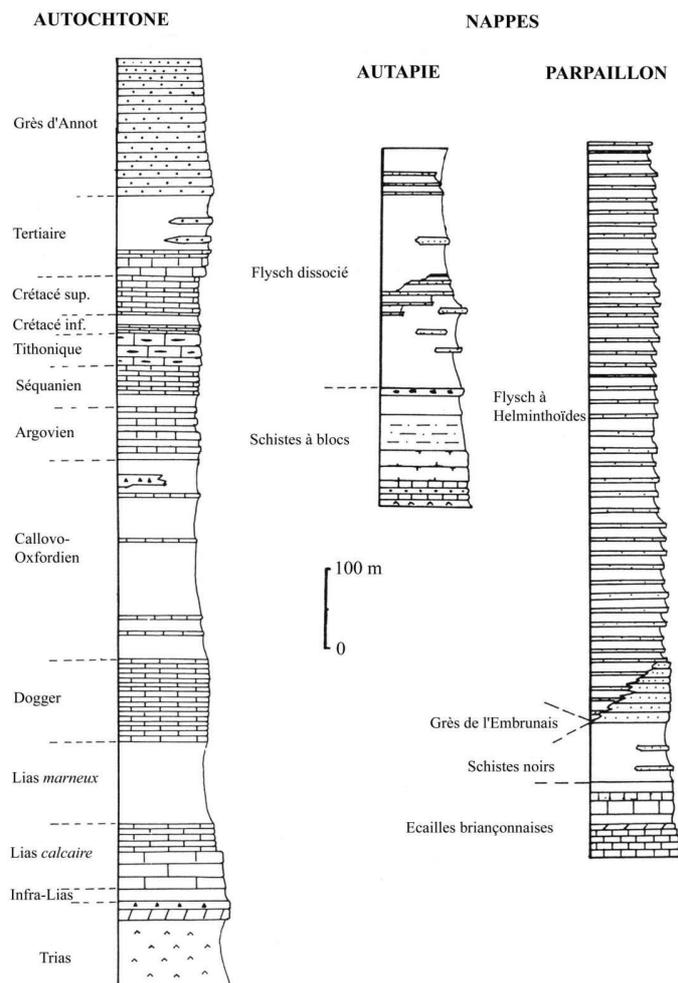


Figure 2-7. Colonnes stratigraphiques des unités présentes dans la fenêtre de Barcelonnette (d'après Légier 1977, modifié).

Les Terres Noires sont des marnes schisteuses fortement affectées par la tectonique régionale, présentant de nombreux plis à différentes échelles et une schistosité fortement pénétrative. Il s'agit d'une structure en anticlinorium de direction Nord-Ouest / Sud-Est et déversée vers le Sud-Ouest, structure acquise postérieurement à la mise en place des nappes subbriançonnaises et de l'Autapie, mais antérieurement à la mise en place de la nappe du Parpaillon.

Ces Terres Noires présentent deux faciès, l'un représenté par des marnes à débit en plaquettes et l'autre par un ensemble argilo-calcaire généralement en haut de la série avec de nombreux filonnets recristallisés de calcite.

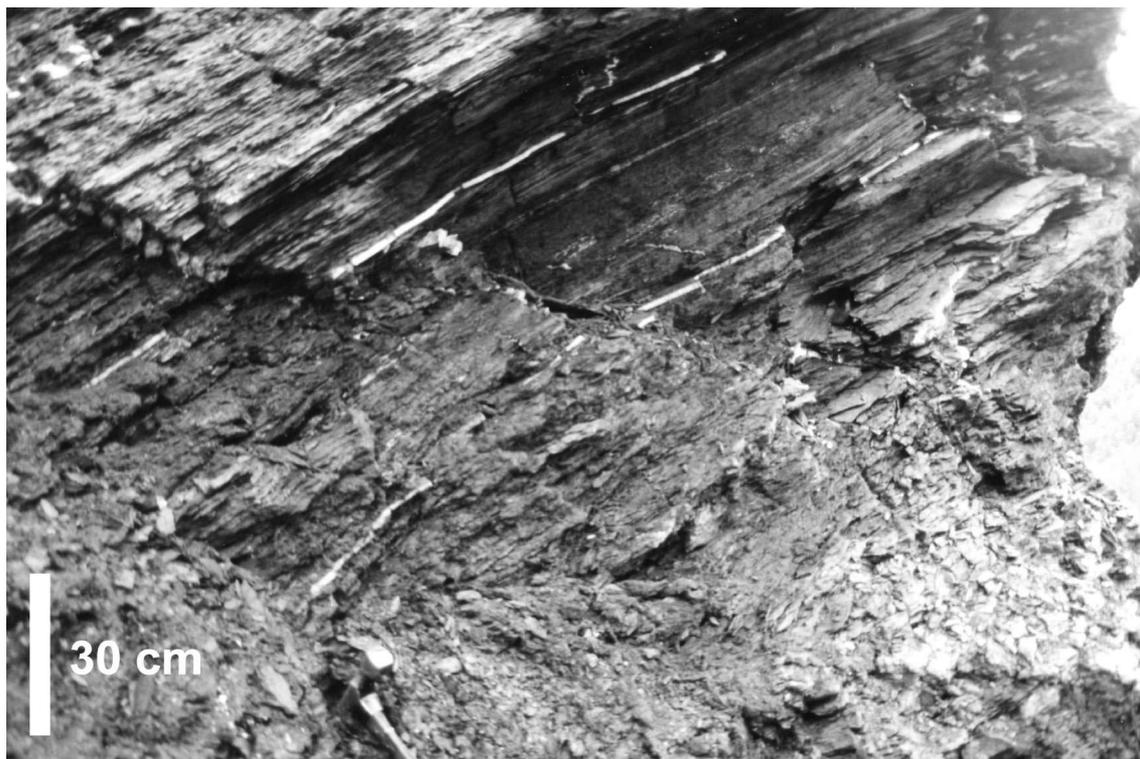


Figure 2-8. Affleurement de Terres Noires présentant une schistosité pénétrative et de nombreux filonnets de calcite (ravine côté rive gauche du torrent de la Valette, 1250 m).

En raison de l'origine détritique de la formation, les minéraux présents sont très divers (calcite, quartz, minéraux argileux : illite, chlorite, kaolinite, interstratifiés illite/smectite et chlorite/smectite...). La schistosité est parfois tellement pénétrative que l'aspect est proche des schistes. L'analyse par diffraction X montrent que les Terres Noires, en particulier celles de Barcelonnette, ont été affectées par des conditions proches de l'anchimétamorphisme (Artru, 1972). Par ailleurs, certaines espèces minérales d'origine hydrothermale ont été rencontrées et sont des minéralisations extrêmement rares de sulfosels de plomb et de cuivre (Fourcault, 1997).

Dans la fenêtre de Barcelonnette, le taux de carbonates est évalué à 30% pour les Terres Noires inférieures et à 23% pour le membre supérieur, soit des valeurs légèrement inférieures à la moyenne régionale (Phan, 1993).

La composition des Terres Noires de Barcelonnette se singularise aussi par la faible quantité de kaolinite et d'interstratifiés, et la forte teneur en pyrite.

Cette pyrite, en s'altérant en présence de carbonates, peut donner des produits particuliers comme du gypse et des sulfates magnésiens et ferrifères plus complexes. Cette caractéristique est une donnée couramment admise dans les marnes contenant de la pyrite et soumises à l'altération. Elle conduit à la déformation de la texture de ces marnes (Wright, 2001). Sur les bassins expérimentaux de Draix, Buffalo (1989) identifie ce processus comme l'une des voies d'altération de la formation. En effet, en cristallisant, ces minéraux augmentent de volume et le processus de gonflement entraîne une déstructuration des matériaux.

Les autres processus d'altération sont classiques (cycles humectation – dessiccation, cycles gel – dégel), mais sont amplifiés par la fracturation de la roche tendre et schisteuse. Sa couleur lui confère une sensibilité accrue aux variations de températures (processus de thermoclastie). Une alternance de 50 cycles gel/dégel suffit à désagréger totalement un cube de 6 cm d'arête (Descroix 1985, in Buffalo 1989).

Il faut rajouter que, bien souvent, les marnes présentent en superficie une couche caractéristique d'altération se démarquant par une couleur crème (cf. Figure 2-9).



Figure 2-9. Ravines de Terres Noires laissant apparaître un horizon de teinte crème d'altération.

Le sol pédologique se développe ainsi à partir de ces altérites présentes sur 1 à 3 m d'épaisseur en sommet des parties en ravinement.

L'emprise de la végétation sur ces terrains est relativement limitée. Cependant, sur la fenêtre de Barcelonnette, les Terres Noires ont en partie été stabilisées par la plantation de pins noirs au début du 20^{ème} siècle, par les services O.N.F.-R.T.M.

En effet, en l'absence de végétation, et lors de fortes pluies, les matériaux atteignent facilement la limite de liquidité sur quelques millimètres d'épaisseur. Des processus de micro-coulées de boue ou des phénomènes de solifluxion se réalisent alors.

Le rôle stabilisateur de la végétation, sur ces terrains, a été démontré sur l'exemple du bassin du Riou Bourdoux (à l'Ouest de Barcelonnette) et sur les bassins expérimentaux de Draix.

Buffalo (1989) a noté que la végétation demeure continue sur des pentes inférieures à 30° et disparaît complètement sur des pentes supérieures à 45°.

2.2.2.2. Les nappes de l'Embrunais : Nappe de l'Autapie et Nappe du Parpaillon

Les nappes de l'Embrunais sont mises en contact discordant sur les Terres Noires à la faveur de chevauchements et constituent les bordures de la fenêtre tectonique de Barcelonnette.

Ces chevauchements et les écailles tectoniques associées sont bien visibles au niveau de la fenêtre de Barcelonnette. La géométrie des contacts est cependant complexe du fait de la présence de ces écaillages et des déformations et fracturations post-nappes.

La nappe du Pelat représente une unité subbriançonnaise en écailles tectoniques, elle-même surmontée par la nappe de l'Autapie (Flysch Dissocié). La partie supérieure du relief est formée par la nappe du Parpaillon (Flysch à Helminthoïdes) reposant en discordance structurale sur les nappes précédentes ou l'autochtone.

La nappe du Pelat n'affleure pas de manière continue dans le bassin de Barcelonnette du fait de sa position structurale. D'un point de vue lithologique, cette unité est représentée par des calcaires planctoniques. Ils affleurent sous forme de rognons à patine blanchâtre constituant souvent des petites falaises ou ressauts topographiques (cf. Figure 2-10).

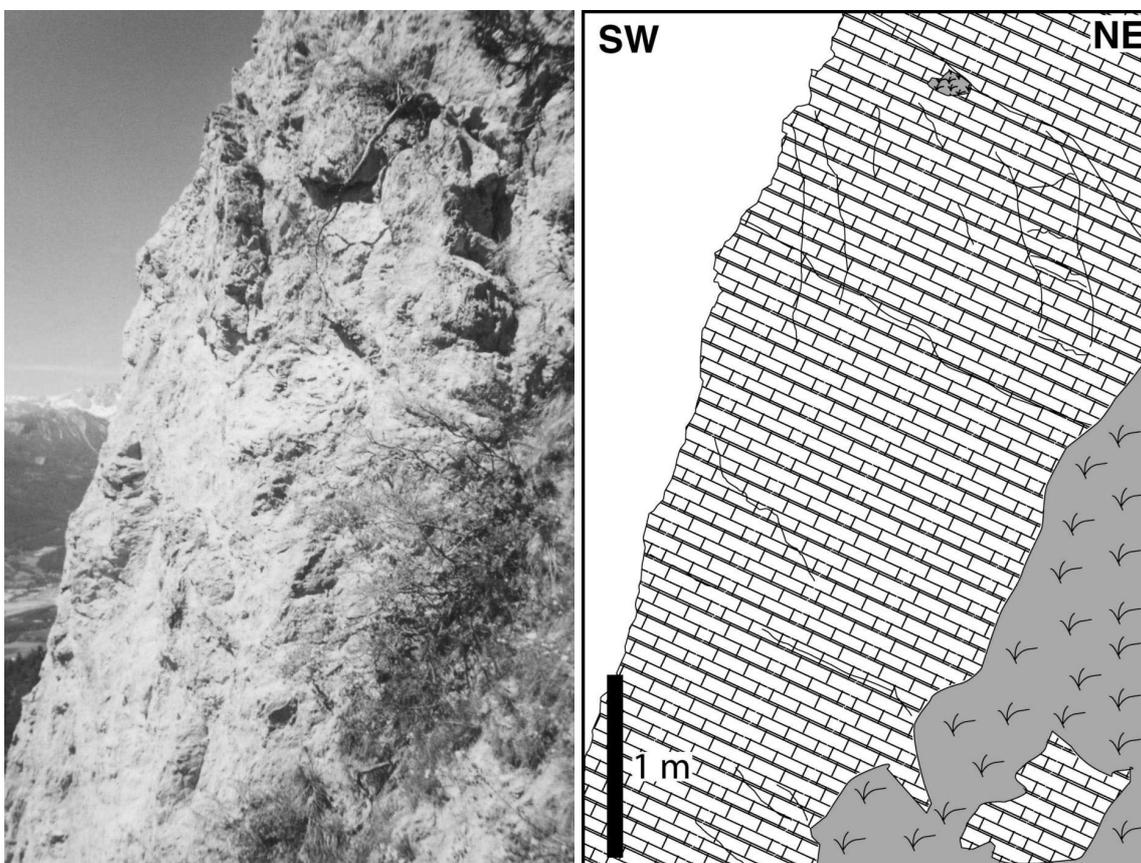


Figure 2-10. Affleurement de calcaire planctonique de la nappe du Pelat (affleurement à mi-chemin entre le torrent de Faucon et celui de la Valette à une altitude d'environ 1550 m).

Leur continuité avec les autres unités est difficile à évaluer du fait des mauvaises conditions d'affleurement.

La nappe de l'Autapie affleure à mi-pente sur les versants du bassin de Barcelonnette. Le matériau composant cette nappe, est le "faciès dissocié" du Flysch à Helminthoïdes (cf. Figure 2-11).

A l'affleurement, ce faciès ne présente pas de structure claire (structure dilacérée de Kerckhove et al, 1980).

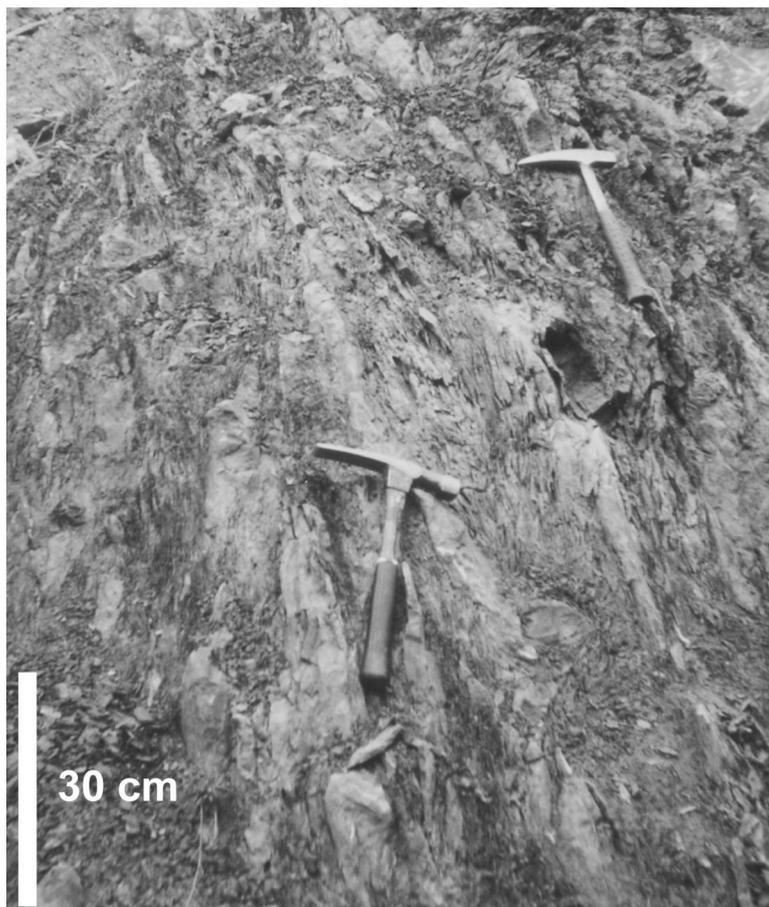


Figure 2-11. Vue d'un affleurement de Flysch dissocié (sur le versant Est de la crête de Soleil-Bœuf, 2100 m).

D'un point de vue lithologique, on observe des grès, des calcaires argileux ainsi que des schistes. Ce faciès semble s'être constitué à la faveur de glissements sous-marins (ou slumpings, d'après Kerckhove 1969, cf. Figure 2-12).

La désorganisation apparente de ce faciès permet, lorsqu'il est schisteux, de le distinguer des Terres Noires, à condition que la qualité de l'affleurement soit satisfaisante. En revanche, lorsque les affleurements sont de mauvaise qualité, la proximité lithologique des deux faciès ne permet pas une détermination aisée.

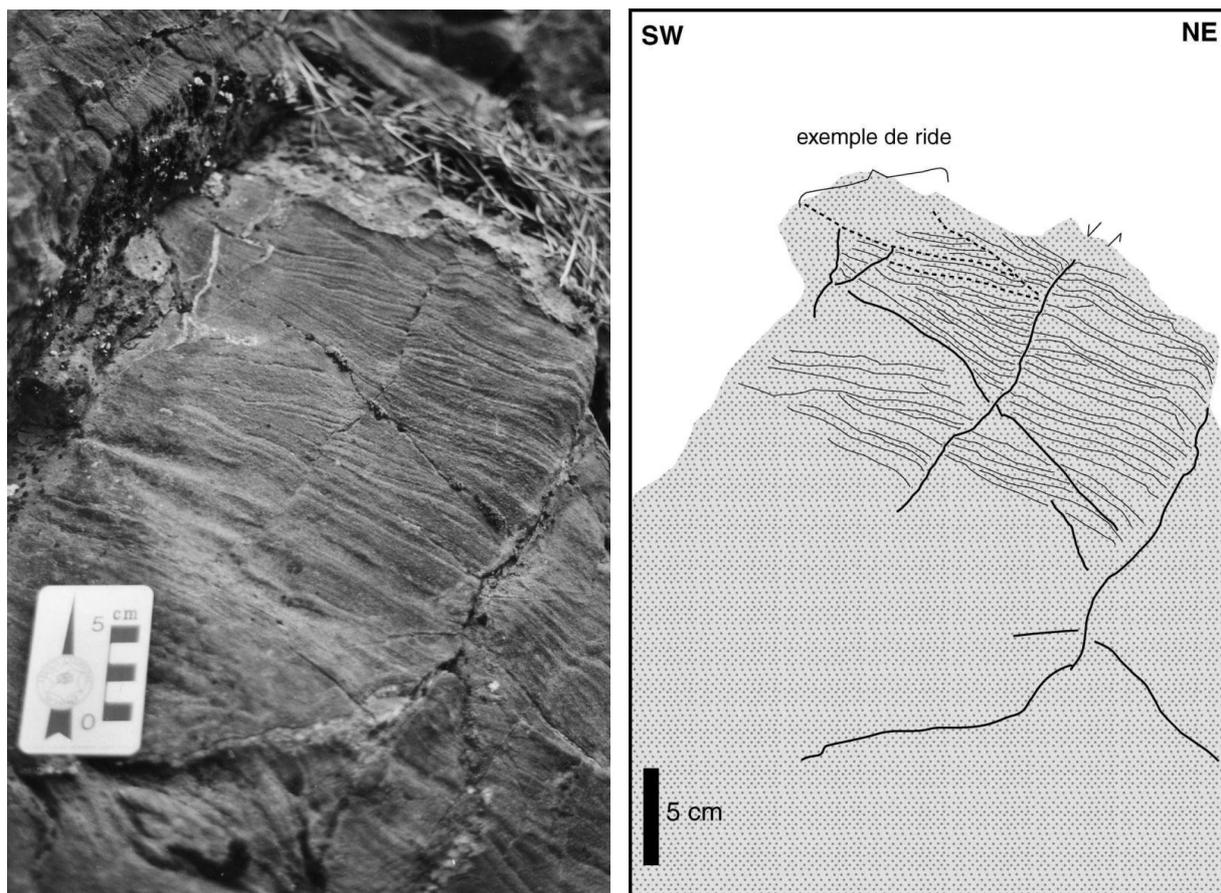


Figure 2-12. Vue de figures sédimentaires dans les flyschs en rive droite du torrent de Faucon (1620 m), au N-E de Barcelonnette.

Cette structure particulière conduit, comme pour les Terres Noires, à un comportement mécanique particulier. La forte variation lithologique à l'échelle de l'affleurement, la présence de micro-structures et la fracturation du massif rendent le matériau sensible aux processus de cryoclastie et d'hydroclastie. Ces processus induisent une perméabilité en grand, les flyschs de l'Autapie constituant alors un aquifère limité à sa base par le chevauchement et les marnes du Callovo-oxfordien.

Au-dessus, légèrement en dehors du cadre strict de l'étude, à la faveur d'un nouveau chevauchement apparaît la nappe du Parpaillon. D'un point de vue lithologique, le faciès principal est le flysch à Helminthoïdes (cf. Figure 2-13).

Cette formation est peu argileuse, donc relativement compétente et fracturée. Elle est, de ce fait, très sensible aux processus de cryoclastie d'autant plus qu'elle affleure à des altitudes où le gel est fréquent, même en été. Ces flyschs se retrouvent souvent en pied de falaise sous la forme d'un cône d'éboulis relativement important. Ils peuvent parfois évoluer dans des thalwegs ou des couloir d'avalanches, et peuvent contribuer à alimenter les dépôts torrentiels.



Figure 2-13. Vue du Flysch à Helminthoïdes de la nappe du Parpaillon avec quelques plis visibles (en amont de Jausiers en rive droite de l'Ubaye).

2.2.2.3. Eléments sur le contact anormal entre l'Autochtone et la nappe de l'Autapie

Le contact anormal, base du chevauchement de la nappe de l'Autapie sur l'Autochtone des Terres Noires, est difficile à cartographier avec précision. Nous nous sommes cependant attachés à le reconnaître le mieux possible car il joue un rôle fondamental dans l'analyse des mouvements de versant, la définition des modèles de calcul et l'identification des scénarios d'évolution régressive. Ce contact anormal est un élément structural majeur de par son extension. Mettant en contact deux unités lithologiques de comportements rhéologiques très différenciés, il joue un rôle très important du point de vue géologique, mécanique et hydrogéologique.

Nous avons observé qu'à l'approche du contact tectonique, les marnes présentent une schistosité plus fine et le flysch présente souvent un faciès de schistes noirs. La distinction entre ces deux unités est possible car, d'une manière générale, les Terres Noires présentent une stratification et un litage régulier, alors que le flysch est affecté par une schistosité pénétrative sans organisation claire à l'échelle de l'affleurement.

De plus, au niveau du contact, il apparaît des écailles de calcaire planctonique attribuées à la nappe du Pelat, ainsi que des lentilles de Trias (formations gypseuses et cargneules, cf. Figure 2-14).

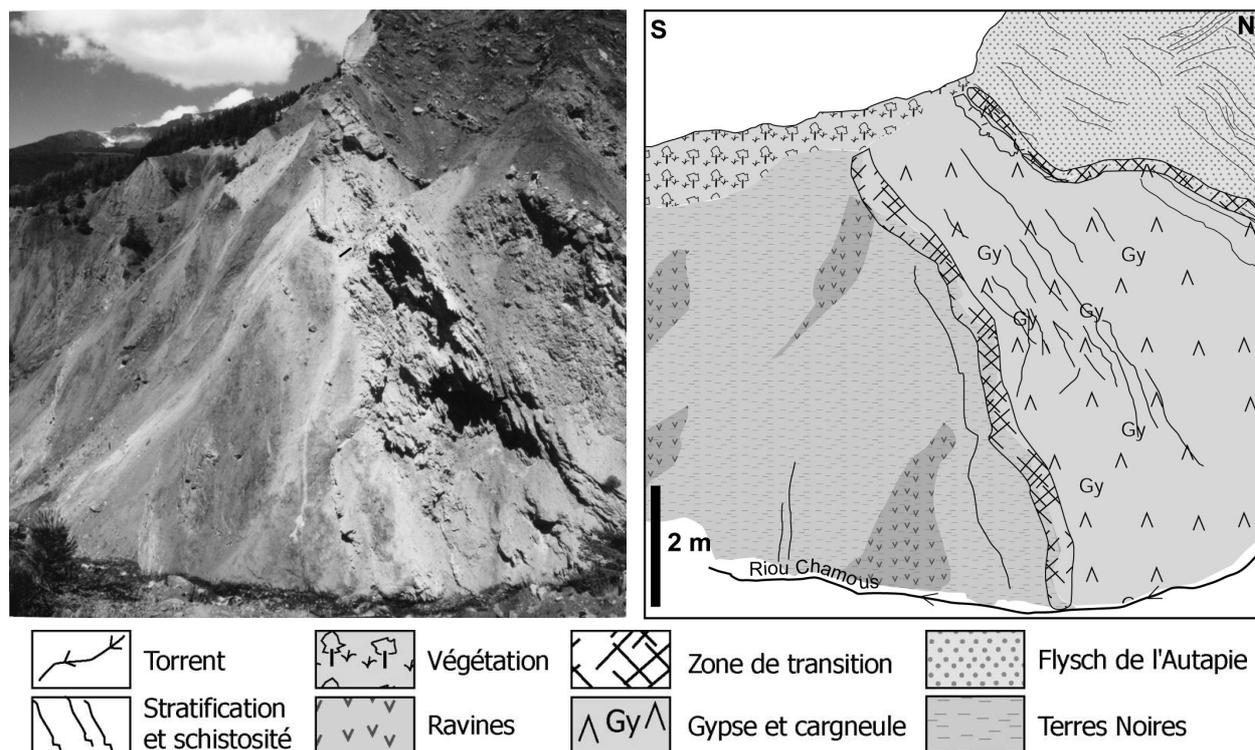


Figure 2-14. Zone de chevauchement mettant en contact les Terres Noires et le Flysch dissocié de la nappe de l'Autapie (rive droite du Riou Chamous, 1820 m).

Le contact anormal apparaît souvent horizontal avec une légère composante de pendage vers le Nord (sur l'Adroit*, soit vers l'intérieur du versant). Cependant, il est affecté localement par de nombreuses déformations post-nappes (plis et failles).

Par rapport au contact en bordure nord de la fenêtre de Barcelonnette, le contact en bordure sud se situe plus haut en altitude et relativement plus haut que les zones d'étude (notamment, glissement-coulée du torrent de Poche).

2.2.3. Cadre géomorphologique

La vallée de l'Ubaye, au niveau de la fenêtre de Barcelonnette, présente une morphologie particulière qui ne laisse aucun doute sur l'héritage glaciaire de ce modelé : les formes et formations corrélatives sont clairement identifiables. De plus, la période post-glaciaire a apporté des retouches significatives aux paysages.

L'orientation Est – Ouest de la vallée lui confère une différenciation relativement forte entre l'adret (à Barcelonnette l'Adroit, rive droite de l'Ubaye) et l'ubac (rive gauche).

Nous mettons l'accent sur les formations superficielles qui peuvent être regroupées en deux catégories : les formations de versant et les dépôts torrentiels.

* Adroit : nom local correspondant au versant rive droite de l'Ubaye situé au-dessus de Barcelonnette.

La mauvaise qualité d'affleurement du substratum doit être rapprochée de la présence de formations superficielles variées : altérites, moraines, terrains glissés.

2.2.3.1. Formations de versant et formes d'érosion

- les altérites :

Il s'agit de formations provenant de l'altération du substratum sur une tranche superficielle, pas ou peu affectée par des déplacements. Ceci est notamment le cas dans les Terres Noires avec une couche d'altération de teinte crème (cf. Figure 2-9 et Figure 2-18).

- les moraines :

C'est à la fin du Würm que le glacier qui devait occuper une bonne partie de la fenêtre de Barcelonnette s'est retiré. Le glacier devait atteindre la cote d'environ 2000 m (Légier, 1977), et a laissé des dépôts jusqu'à des altitudes relativement élevées de l'ordre de 1400 à 1600 m (cf. Figure 2-15).



Figure 2-15. Affleurement de moraine sur l'Adroit de Barcelonnette (1320 m).

Ces moraines renferment des blocs de toutes tailles et de lithologies variées qui sont emballés dans une matrice sablo-silto-argileuse (cf. Figure 2-16). L'épaisseur de ces dépôts est variable et peut aller jusqu'à 20 mètres. Ces dépôts peuvent parfois combler des thalwegs hérités de la période anté-würmienne, ce qui peut poser quelques problèmes de stabilité. De nombreuses instabilités superficielles sont relevées sur l'Adroit et affectent fréquemment des habitations jusqu'à les mettre en péril (cf. Chapitre 4).

Dans les instabilités plus importantes, les moraines sont mobilisées et mêlées au substratum dans des glissements et coulées de boue.

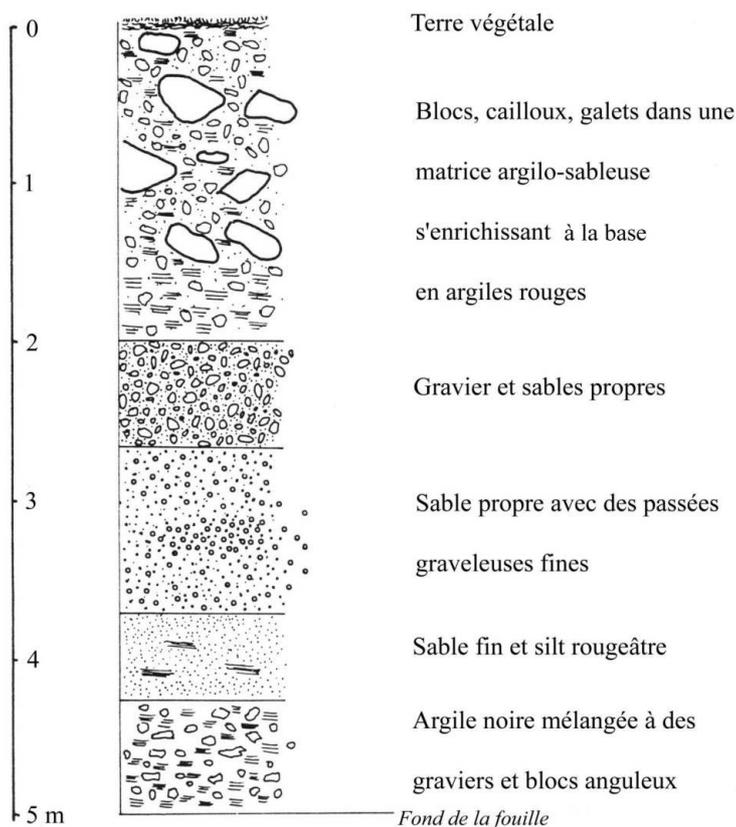


Figure 2-16. Coupe réalisée lors d'une fouille –levée en rive gauche de l'Ubaye en face du torrent de Faucon vers la cote 1500 m (d'après Légier, 1977).

- les éboulis :

Cette formation est surtout visible dans les flyschs des nappes de l'Autapie et du Parpaillon. Les éboulis résultent essentiellement de la gélifraction des roches, et affectent surtout les flyschs à composante calcaire et gréseuse en raison de leur compétence et leur grande fracturation. Ils forment des pentes pouvant aller jusqu'à 35° environ, et ne présentent pas de granoclassement.

- les colluvions ou formations de pente :

Ces formations sont engendrées par des phénomènes de solifluxion et reptation dans les Terres Noires, moraines et flyschs (Figure 2-17). Ils sont particulièrement actifs à la fonte des neiges et affectent les couches superficielles du substratum parfois mélangées avec des moraines où les écoulements d'eau hypodermiques sont abondants.



Figure 2-17. Vue de la crête de Soleil-Boeuf montrant des petits mouvements de terrain superficiels.

- les formes d'érosion actuelles :

Les formes d'érosion les plus visibles concernent les Terres Noires mais aussi parfois la nappe de l'Autapie au voisinage du chevauchement en raison d'une constitution lithologique proche. Il en résulte un modelé en "badlands" (cf. Figure 2-18).



Figure 2-18. Exemple de ravines dans les Terres Noires conduisant à un paysage de badlands (au sommet des ravines, les teintes claires correspondent à un niveau d'altération).

Sur un bassin versant de Terres Noires, les produits de l'érosion mécanique se répartissent de deux manières : une voie de transfert direct représenté essentiellement par les ravines et les torrents d'une part, et un transfert indirect par accumulation de produits d'altération remobilisés à l'occasion d'événements tels qu'une crue ou une lave torrentielle d'autre part (cf. Figure 2-19).

Les versants du bassin de Barcelonnette ont aussi été, comme d'autres versants, très affectés par des glissements, des coulées boueuses et divers processus de solifluxion péri et post-glaciaires.

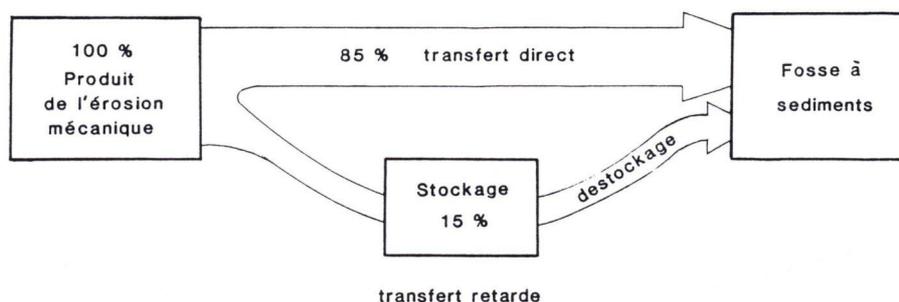


Figure 2-19. Quantification, sur des bassins versant expérimentaux, des différents processus d'érosion dans les Terres Noires (Buffalo, 1989).

2.2.3.2. Les dépôts torrentiels

L'activité torrentielle conduit à des dépôts de matériaux variés, dont des dépôts de laves torrentielles.

Ces phénomènes torrentiels sont très fréquents dans la vallée, en particulier dans le bassin versant du Riou-Bourdox. Les dépôts torrentiels sont très importants en fond de vallée, en raison de la capacité d'érosion et de transport de l'Ubaye. Les communes de Barcelonnette et de Saint-Pons sont en partie construites sur des alluvions de l'Ubaye. Une partie des habitations est même construite dans le lit majeur du torrent. La dernière crue centennale a eu lieu le 3 juin 1957, et a provoqué de nombreux dégâts et déposé des matériaux en grandes quantités.

2.2.4. Mouvements de versant

La fenêtre de Barcelonnette est affectée par de nombreux mouvements de versants, et sous la menace de l'activité torrentielle.

De nombreuses infrastructures de la vallée, pour la très grande majorité implantées dans les Terres Noires, sont affectées par des désordres allant dans certains cas jusqu'à la ruine.

Ces instabilités sont pour certaines superficielles et pour d'autres beaucoup plus profondes, et mobilisent alors des volumes de matériaux considérables.

En outre, les instabilités dans les moraines sont multiples, engendrées par les circulations d'eau au niveau de l'interface moraine – altérites, ou par la seule saturation des terrains, en particulier à la fonte des neiges.

De nombreux glissements, dormants ou actifs, sont hérités de la période post-glaciaire (fin du Würm).

La très grande majorité des torrents de la vallée ont été corrigés, et leurs bassins versants reboisés afin de limiter la fréquence et la violence des laves torrentielles et des écoulements hyper-concentrés (cf. Annexe 2-3 et Annexe 2-4).

2.3. Caractéristiques pétrophysiques et géotechniques des zones d'études : glissement-coulée de la Valette, glissement coulée de Poche et Adroit de Barcelonnette

2.3.1. Contexte général de l'échantillonnage

Ce travail s'est principalement intéressé à deux glissements-coulées de la fenêtre de Barcelonnette : le glissement-coulée de la Valette et celui de Poche. Ils font partie, tous deux, des glissements actifs relativement importants par leurs volumes dans les Alpes françaises.

Le glissement-coulée de la Valette est situé à la frontière des communes de Barcelonnette et de Saint-Pons, en rive droite de l'Ubaye. Le glissement-coulée de Poche est situé en rive gauche de l'Ubaye, plus en amont, entre Barcelonnette et Jausiers.

Le Chapitre 4 donne une description détaillée des conditions de déclenchement de ces glissements, ainsi qu'une analyse de leurs évolutions. Une rapide description en est donnée ici pour expliciter les conditions de l'échantillonnage.

Ces deux glissements-coulées se sont déclarés dans les Terres Noires et ont, en aval, provoqué une coulée de boue. Ils ont pris naissance au droit d'un ancien torrent. Ces torrents de la Valette et de Poche étaient déjà connus pour leur activité en matière de laves torrentielles.

L'environnement immédiat du site de chaque glissement est par ailleurs très marqué par des mouvements de solifluxion et des glissements post-glaciaires. Les deux glissements se situent au droit de zones appelées Sagnes (zones d'accumulation d'eau en surface avec une végétation de mousses et de prêles). Des dépôts de moraines sont également présents, et les Terres Noires sont altérées en profondeur.

Le glissement-coulée de la Valette a été divisé, sur la base des vecteurs déplacements (mesures effectuées par le service départemental O.N.F.-R.T.M. de Digne-Barcelonnette) et des comportements rhéologiques des matériaux (observés sur le terrain), en plusieurs zones. D'aval en amont, les différentes zones sont les suivantes (cf. Figure 2-20) :

- la coulée (de boue) : la lithologie dominante est les marnes des Terres Noires (Callovo-Oxfordien) remaniées ;
- les matériaux à mouvement rapide : la lithologie dominante est les marnes (des Terres Noires) et dans une moindre mesure des moraines remaniées et mêlées ;
- les matériaux déstabilisés ou en masses glissées : la lithologie concerne les marnes, les schistes, le calcaire gréseux et un peu de calcaire planctonique, les moraines et les formations de pente (unités en présence : Terres Noires, nappe du Pelat et nappe de l'Autapie).

En ce qui concerne le glissement-coulée de Poche, le découpage des zones en mouvement est plus sommaire, en raison des mesures plus restreintes et de sa taille plus réduite. Les zones suivantes ont été retenues (cf. Figure 2-21) :

- la coulée (de boue) : la lithologie concerne les marnes des Terres Noires remaniées ;
- les matériaux à mouvement rapide : la lithologie concerne les marnes et des moraines remaniées et mêlées.

Les caractéristiques pétrophysiques et géotechniques des matériaux impliqués dans ces glissements-coulées ont été analysées en fonction de ces découpages en plusieurs zones, l'échantillonnage s'y référant.

Les divers essais de caractérisation ont été effectués sur des échantillons prélevés en différents points des glissements-coulées de la Valette et de Poche, ainsi que dans les Terres Noires en place.

Les échantillons ont été prélevés suivant deux méthodes : la première uniquement à l'aide du marteau (échantillons remaniés) et l'autre sous forme de blocs, non remaniés, à l'intérieur de tranchées réalisées à l'aide d'une pelle mécanique par le service O.N.F.-R.T.M. de Digne-Barcelonnette.

Les échantillons prélevés au marteau (photo en Annexe 2-5) ont été écrêtés à 20 mm directement lors du prélèvement pour ne récupérer que la matrice. En effet, seule cette dernière a un rôle important dans le comportement mécanique des masses en glissement, les éléments de taille supérieure à 20 mm étant généralement isolés au sein de la matrice fine, sans contact entre eux. Signalons par ailleurs que les contraintes dues aux conditions de terrain ne permettent pas d'écrêter à une limite supérieure, les échantillons devant rester transportables (environ 15 kg en moyenne par échantillon). Les échantillons dits "intacts" présentaient une masse moyenne de 30 à 40 kg (photos en Annexe 2-6).

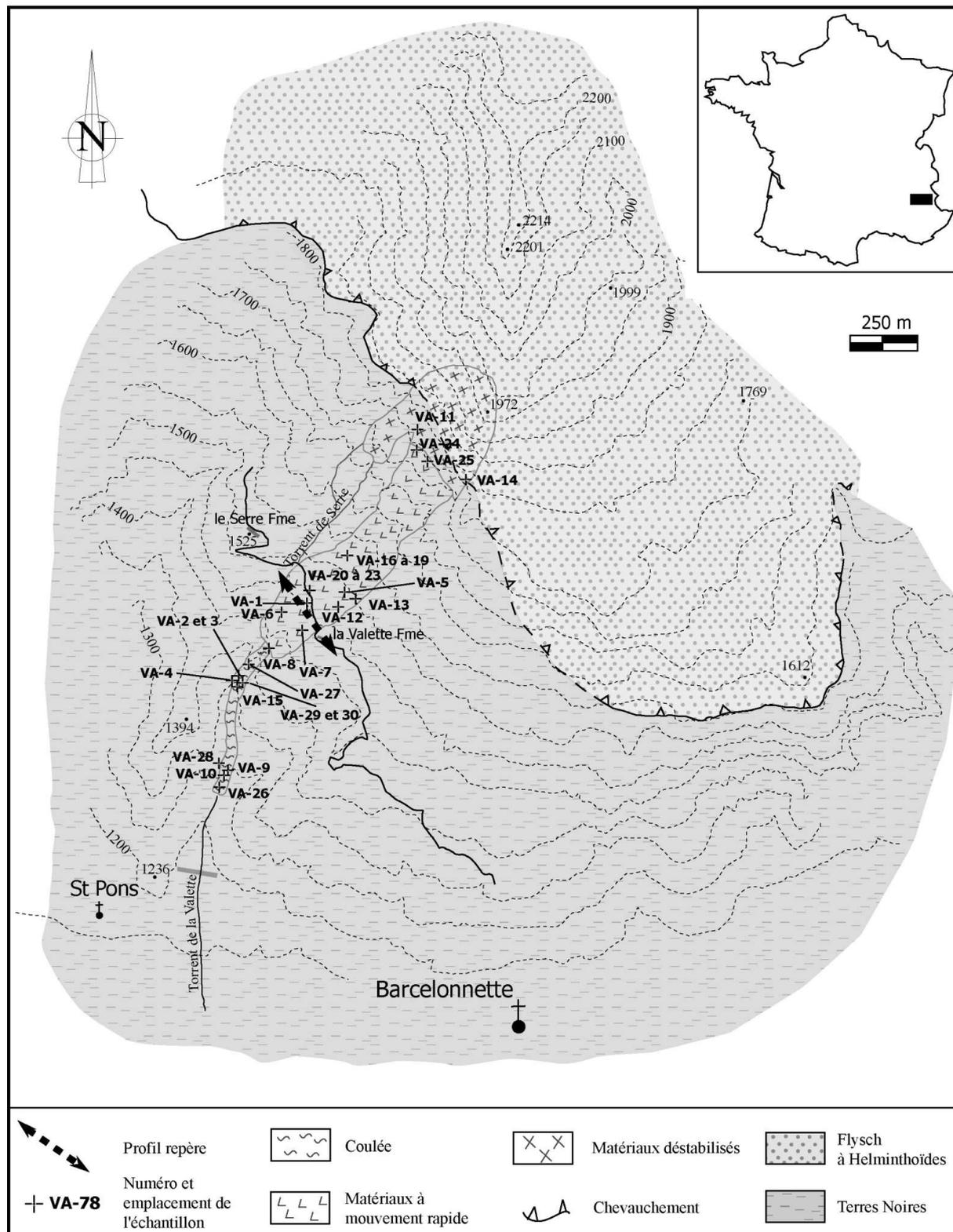


Figure 2-20. Positionnement des échantillons prélevés sur le glissement-coulée de la Valette et emplacement du profil repère pour le suivi des volumes en transit.

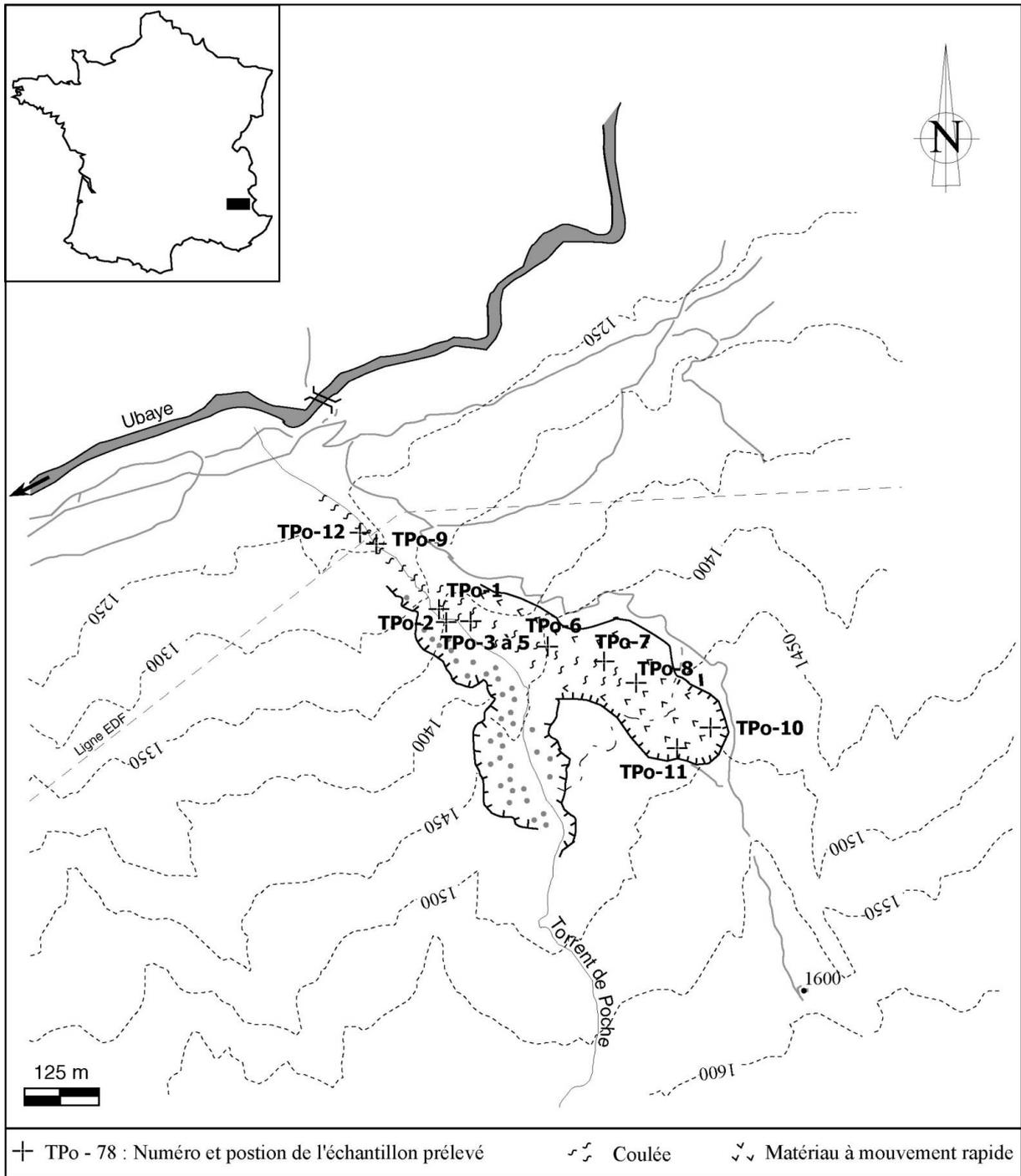


Figure 2-21. Positionnement des échantillons prélevés sur le glissement-coulée de Poche.

2.3.2. Caractéristiques pétrophysiques et géotechniques des matériaux impliqués dans les glissements

2.3.2.1. Caractéristiques granulométriques des matériaux

Le tamisage a été effectué au laboratoire sur des colonnes de tamis présentant les mailles suivantes : 10 mm ; 5 mm ; 2 mm ; 1 mm ; 0,4 mm ; 0,2 mm ; 0,1 mm ; 0,08 mm (80 μm) et 0,04 mm (40 μm). Les passants à 40 μm ont été récupérés afin de les analyser. Le tamisage a été réalisé par voie humide et à l'aide d'une base vibrante.

La norme AFNOR recommande d'utiliser un minimum de 3 kg de matériau pour une ouverture de maille maximale de 20 mm. L'ouverture maximale étant de 10 mm, nous avons réalisé les granulométries avec une masse moyenne de 2,3 kg. Les refus sont mis à l'étuve et pesés une fois qu'ils sont totalement secs.

La courbe granulométrique est construite par cumul du poids des refus depuis la fraction la plus fine (> 0,04 mm) jusqu'à la fraction la plus grossière (> 10 mm).

La fraction inférieure à 40 μm a été analysée par sédimentométrie (granulomètre RX automatique SEDIGRAPH). Cette dernière mesure consiste à évaluer le taux de sédimentation des particules mises en suspension en fonction du temps.

D'une manière générale, les matériaux présentent une répartition granulométrique complexe (cf. Figure 2-22 et Figure 2-23). Ils sont mal triés. Les courbes sont généralement bien graduées et plurimodales (le coefficient de Hazen est supérieur à 2).

Cependant des différences notables sont visibles d'une part entre les Terres Noires non mobilisées dans les glissements-coulées et les matériaux en glissement. Ces différences résident principalement dans le taux de fines : les matériaux mobilisés présentent une proportion de fines importante, au détriment de l'ensemble des autres classes granulométriques.

Les Terres Noires analysées présentent toutes des courbes granulométriques en trois parties : une première partie de 20 à 2 mm où les grains sont relativement bien répartis (quasiment 50% du matériau), une deuxième partie de 2 à 0,1 mm qui correspond à une fraction granulométrique peu représentée dans le matériau, et une troisième partie (inférieurs à 0,1 mm) qui représente aussi pratiquement la moitié du matériau avec la fraction inférieure à 0,02 mm particulièrement bien représentée.

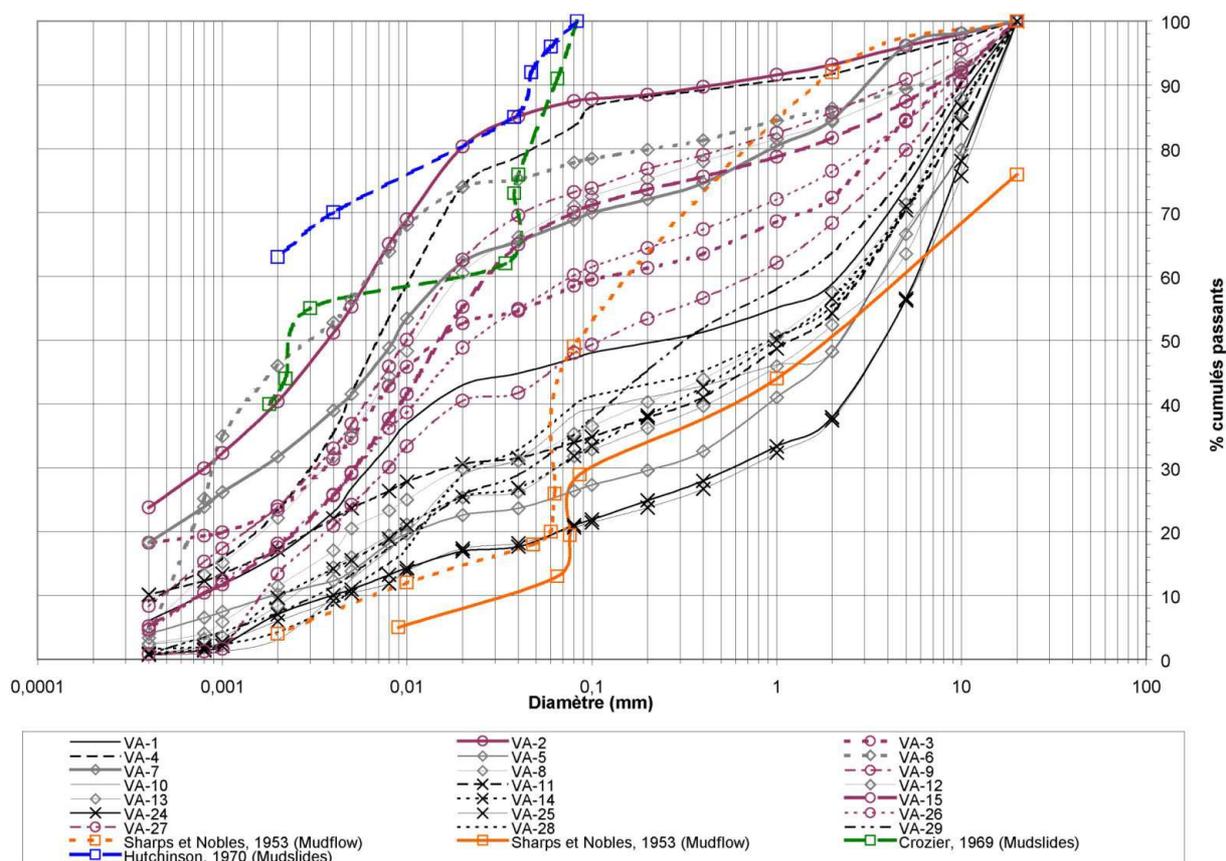


Figure 2-22. Courbes granulométriques de tous les échantillons prélevés sur le versant de la Valette, avec quelques courbes de référence de coulées de boue issues de Hutchinson, 1988.

Nota : en mauve les produits de la coulée.

Les produits de la coulée se distinguent nettement par la prédominance très accentuée des particules inférieures à 0,02 mm : entre 40 et 80% avec une moyenne autour de 55-60% (cf. Figure 2-24).

Cette tendance se confirme pour les autres produits des glissements-coulées étudiés : les matériaux dits à mouvement rapide ou fortement remaniés présentent une répartition granulométrique proche des produits de coulées, alors que les matériaux dits remaniés (c'est à dire pris dans le glissement, mais dans une partie à vitesse relativement lente) la répartition granulométrique est plus proche des terrains en place.

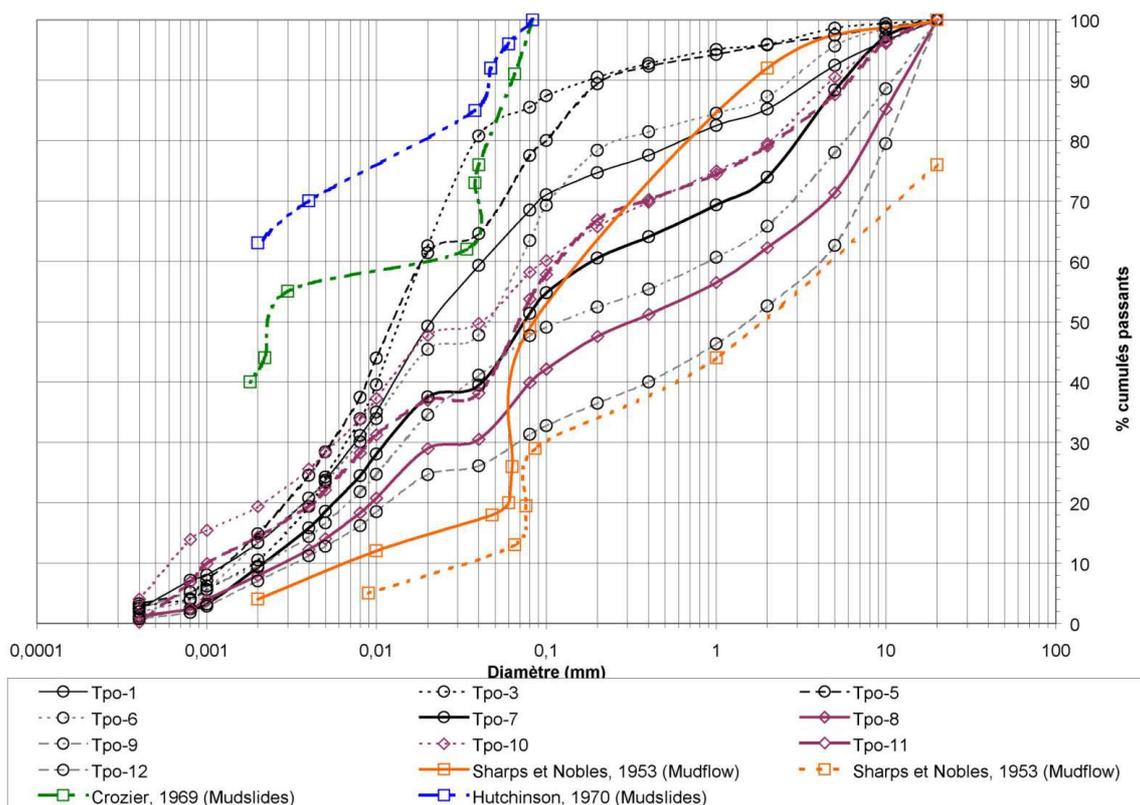


Figure 2-23. Courbes granulométriques de tous les échantillons prélevés sur le versant du torrent de Poche, avec quelques courbes de référence de coulées de boue issues de Hutchinson, 1988.

Nota : en mauve les produits de la coulée.

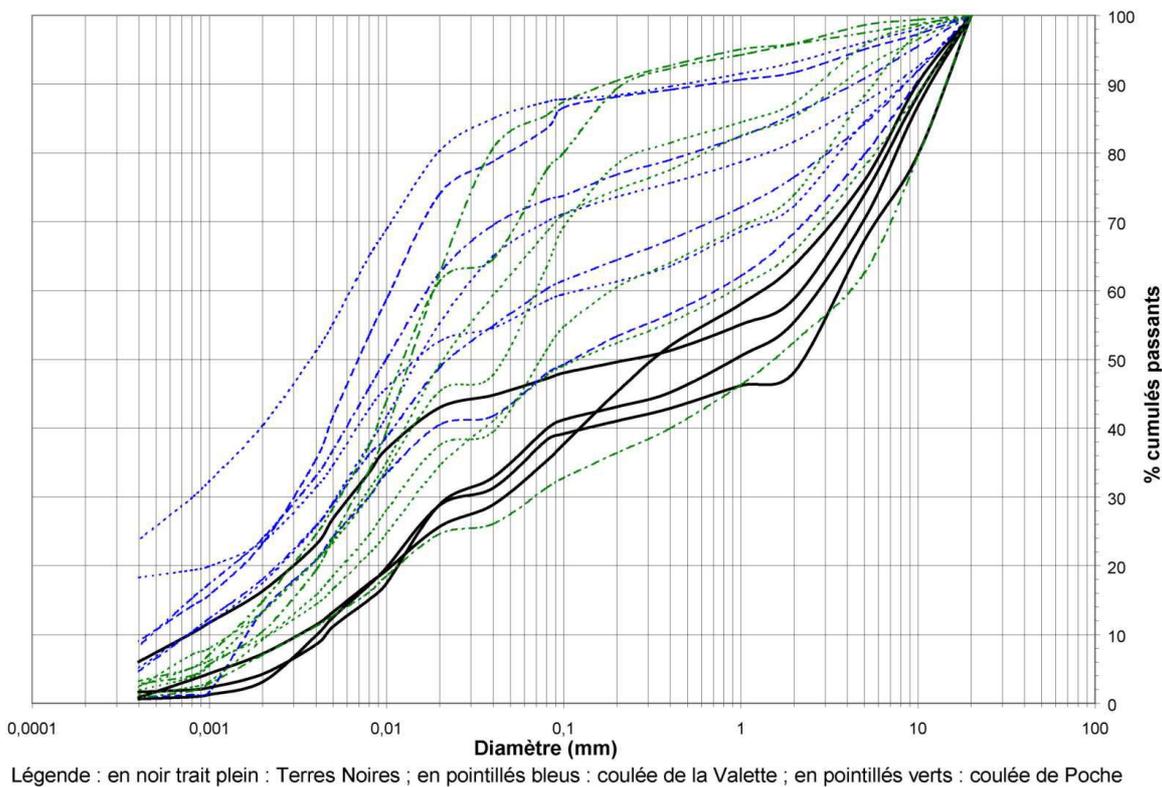


Figure 2-24. Courbes granulométriques des Terres Noires comparées aux produits de coulées.

Par ailleurs, les courbes granulométriques de référence (Figure 2-22 et Figure 2-23), sans être complètement comparables avec celles obtenues pour cette étude, présentent une caractéristique commune qui est leur caractère plurimodal, et donc la prédominance de certaines classes granulométriques pour l'ensemble des échantillons. Ceci est probablement à relier avec la modification granulométrique des matériaux lors de la propagation de la coulée.

2.3.2.2. Identification minéralogique

La diffraction X, à partir de lames de poudre et de lames d'argiles, a permis d'identifier les principaux minéraux constituant les matériaux impliqués dans les glissements, et ceux présents dans le substratum.

Il en ressort que le quartz est légèrement majoritaire, et que le deuxième constituant est la calcite, ce qui est en accord avec les analyses effectuées par Colas et Locat en 1993. La phase argileuse est constituée essentiellement d'illite, de chlorite et d'interstratifiés chlorite/smectite. Les Terres Noires de Barcelonnette ne contiennent que très peu de kaolinite contrairement à d'autres zones, du Sud-Est de la France, où affleurent les Terres Noires (Phan, 1993).

Les feldspaths sont plus abondants dans les flyschs que dans les Terres Noires et ceci se traduit aussi dans les produits mobilisés dans les glissements. En revanche, les Terres Noires contiennent de la dolomite contrairement aux flyschs. Par ailleurs, dans les Terres Noires, des oxydes mal cristallisés sont identifiables.

Les lames d'argiles des Terres Noires ont permis de reconnaître de la halite recristallisée. Pour les Terres Noires, les minéraux présents rendent compte de l'anchimétamorphisme subi par ces marnes.

2.3.2.3. Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques permettant de caractériser l'activité de la fraction fine d'un sol et son comportement en présence d'eau. Les limites de liquidité (W_L) et de plasticité (W_P) sont des teneurs pondérales en eau correspondant à un état particulier du sol défini dans la norme NF-94-051 (cf. Figure 2-25).

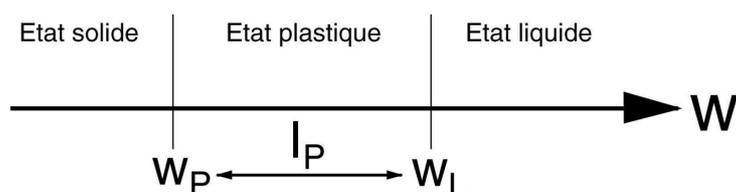


Figure 2-25. Représentation des limites d'Atterberg par rapport à l'état d'un sol (w = teneur pondérale en eau et I_p = indice de plasticité).

Grâce à ces limites, il est possible de caractériser le sol par les deux indices suivants (avec w teneur en eau pondérale du sol in situ) :

I_p : indice de plasticité (étendue de la zone d'état plastique) :

$$I_p = W_L - W_P \quad \text{Équation 2-1}$$

I_C : indice de consistance :

$$I_C = \frac{W_L - w}{I_p} \quad \text{Équation 2-2}$$

L'indice de plasticité indique l'étendue du champ de plasticité et dépend en grande partie de la présence et du type de minéraux argileux contenus dans le sol. L'indice de consistance permet de caractériser l'état du sol au moment du prélèvement (cf. Tableau 2-1).

Consistance		
$w > w_L$	$I_c < 0$	Liquide
$w_P < w < w_L$	$0 < I_c < 0,25$	Pâteuse ou très molle
	$0,25 < I_c < 0,5$	Molle
	$0,5 < I_c < 0,75$	Ferme
	$0,75 < I_c < 1$	Très ferme
$w < w_P$	$I_c > 1$	Dure

Tableau 2-1. Echelle des indice de consistances (I_c) et correspondance avec l'état in situ du matériau.

Les résultats obtenus sont résumés par la Figure 2-26 et la Figure 2-27.

Ces diagrammes sont basés sur le diagramme de Casagrande qui permet en outre de replacer les échantillons par rapport à quatre grands types : "Limons peu plastiques", "Argiles peu plastiques", "Limons très plastiques" et "Argiles très plastiques". On observe ainsi que les échantillons prélevés sont tous relativement proches, et dans le domaine des "Argiles peu plastiques". Cependant les indices de plasticité et la teneur en eau de liquidité des produits des coulées sont plus faibles. Ceci signifie que les produits des coulées seront relativement plus sensibles à une variation de la teneur en eau, lors de fortes pluies par exemple.

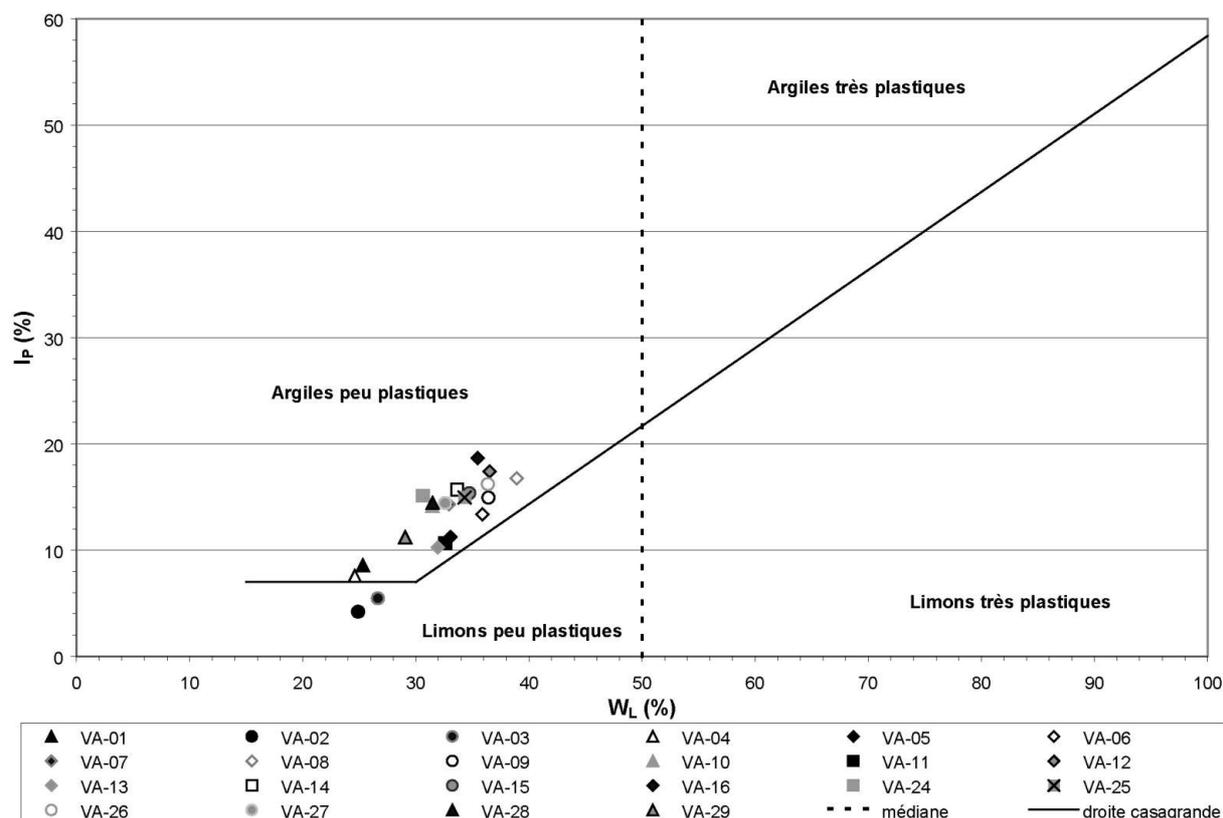


Figure 2-26. Représentation des échantillons analysés dans le diagramme de Casagrande pour le versant de la Valette (les triangles sont pour les Terres Noires, les cercles pour les matériaux de la coulée, les losanges pour les matériaux à mouvement rapide, et les carrés pour les matériaux remaniés).

Les indices de consistance se situent tous dans le domaine solide (cf. tableaux en Annexe 2). D'une manière générale les indices de consistance sont plus élevés pour les Terres Noires en place que pour les matériaux mobilisés dans les glissements. Ceci résulte directement des conditions de prélèvement des échantillons.

A partir de l'indice de plasticité et du pourcentage de particules inférieures à $2\ \mu m$, il est possible de définir l'indice de Skempton (A_c) :

$$A_c = \frac{I_p}{\% < 2\ \mu m} \tag{Équation 2-3}$$

Avec cet indice, il est possible de définir des groupes d'activité en rapport avec des compositions minéralogiques possibles (cf. Tableau 2-2).

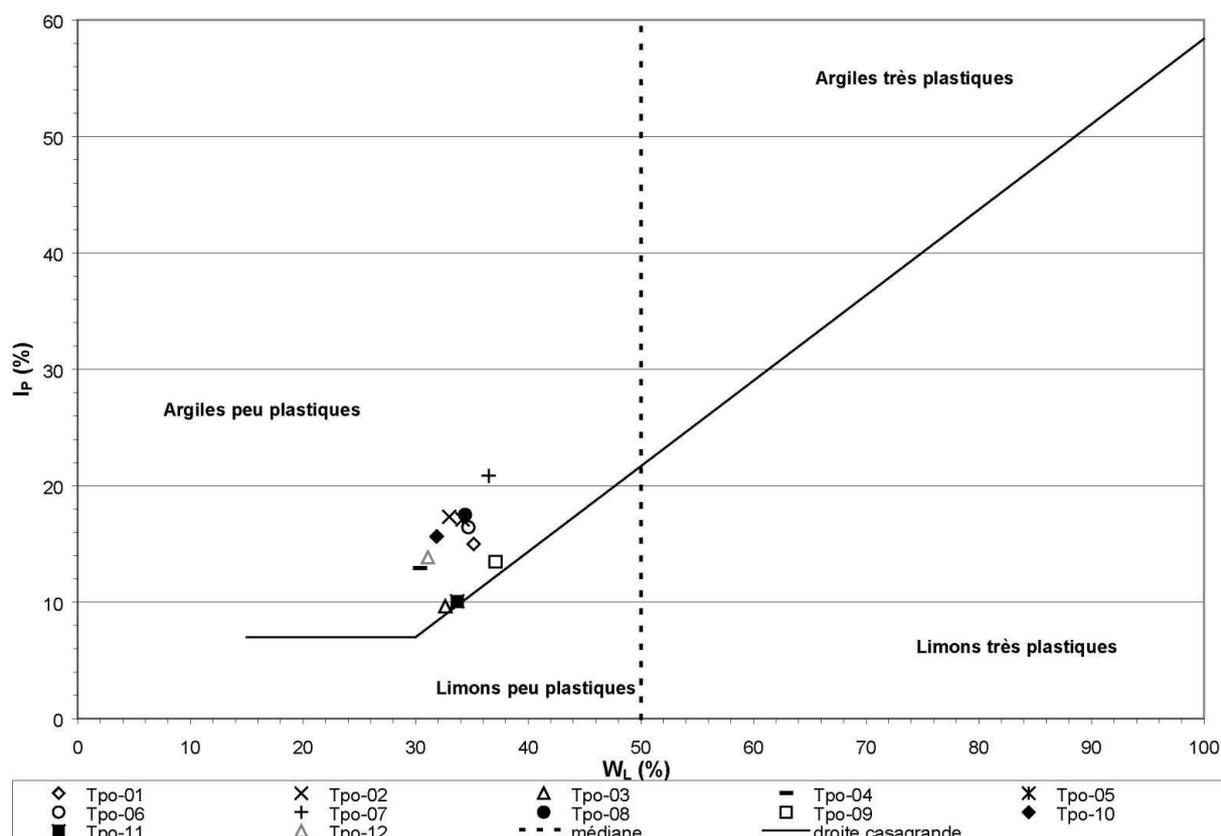


Figure 2-27. Représentation des échantillons analysés dans le diagramme de Casagrande pour le torrent de Poche (les figurés pleins représentent les matériaux remaniés et les autres les produits de la coulée).

Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
sol inactif	sol peu actif	normal	sol actif	sol très actif
$Ac < 0,5$	$0,5 < Ac < 0,75$	$0,75 < Ac < 1,25$	$1,25 < Ac < 2$	$Ac > 2$

Tableau 2-2. Classification des sols en fonction de l'indice de Skempton.

Il en résulte que les échantillons de Terres Noires (notés marnes remaniées) prélevés rentrent dans la catégories des sols actifs (cf. Tableau 2-3). En revanche, les échantillons prélevés sur les glissements-coulées ne présentent pas tous un indice d'activité élevé (cf. Tableau 2-3 et Tableau 2-4).

Nous pouvons remarquer que les échantillons, prélevés dans les matériaux mobilisés par les glissements-coulées, ne paraissent pas être tous caractérisés par une très forte activité, ni un domaine plastique franchement marqué. Ceci souligne d'autant plus le problème de l'altération de la pyrite et donc de la néoformation de sulfates. En effet, le comportement particulier des Terres Noires semble plus lié à cette évolution minéralogique, qu'à une présence de minéraux argileux de type gonflant.

	< 2 μ m (%)	Ip (%)	Ac (indice de Skempton)	Groupe
VA-1 (Marnes remaniées)	16	8,6	0,5	2
VA-4 (Marnes remaniées)	30	7,6	0,3	2
VA-10 (Marnes remaniées)	3	14,1	4,5	5
VA-28 (Marnes remaniées)	4	14,4	3,4	5
VA-29 (Marnes remaniées)	7	11,2	1,6	4
VA-2 (Coulée)	40	4,2	0,1	1
VA-3 (Coulée)	43	5,5	0,1	1
VA-9 (Coulée)	24	14,9	0,6	2
VA-15 (Coulée)	18	15,4	0,9	3
VA-26 (Coulée)	18	16,2	0,9	3
VA-27 (Coulée)	13	14,4	1,1	3
VA-5 (Matériau à mvt rapide)	10	11,2	1,1	3
VA-6 (Matériau à mvt rapide)	46	13,4	0,3	1
VA-7 (Matériau à mvt rapide)	32	14,3	0,5	2
VA-8 (Matériau à mvt rapide)	22	16,8	0,8	3
VA-12 (Matériau à mvt rapide)	11	17,4	1,5	4
VA-13 (Matériau à mvt rapide)	8	10,3	1,2	3
VA-11 (Matériau remanié)	17	10,7	0,6	2
VA-14 (Matériau remanié)	10	15,7	1,6	4
VA-24 (Matériau remanié)	7	15,1	2,1	5
VA-25 (Matériau remanié)	6	15,0	2,5	5

Tableau 2-3. Résultats des indices de Skempton pour les échantillons de la Valette.

	< 2 μ m (%)	Ip (%)	Ac (indice de Skempton)	Groupe
Tpo-1 (Coulée)	13	15,0	1,1	3
Tpo-3 (Coulée)	10	9,6	0,9	3
Tpo-5 (Coulée)	15	17,1	1,2	3
Tpo-6 (Coulée)	13	16,4	1,2	3
Tpo-7 (Coulée)	9	20,9	2,2	5
Tpo-9 (Coulée)	9	13,5	1,4	4
Tpo-12 (Coulée)	7	13,8	2,0	4
Tpo-8 (Matériaux à mvt rapide)	8	17,5	2,2	5
Tpo-10 (Matériaux à mvt rapide)	19	15,7	0,8	3
Tpo-11 (Matériaux à mvt rapide)	14	10,1	0,7	2

Tableau 2-4. Résultats des indices de Skempton pour les échantillons du torrent de Poche.

2.3.3.4. Caractérisation de la fraction argileuse

Les essais d'adsorption de bleu de méthylène sont destinés à évaluer la surface spécifique développée par le matériau, fonction de la quantité de la fraction argileuse et de la nature minéralogique de ses constituants. Cet essai a été effectué sur la fraction inférieure à 80 µm. La valeur de bleu (VB) est exprimée en grammes pour 100 g d'échantillon :

$$VB = \text{Masse de bleu adsorbée (g)} / \text{Masse de 100 g d'échantillon}$$

Les résultats obtenus pour les échantillons prélevés sur la zone d'étude sont résumés dans les tableaux suivants :

	VB (moyenne)	VB (min)	VB (max)	nombre d'échantillons
Coulée	2,9	1,3	4,0	7
Matériau à mouvement rapide	2,3	1,0	3,3	8
Matériau remanié	2,4	2,0	2,7	4
Marne	1,5	0,7	2,0	4

Tableau 2-5. Valeurs de bleu pour les échantillons de la Valette

	VB (moyenne)	VB (min)	VB (max)	nombre d'échantillons
Coulée	2,4	1,7	3,3	9
Matériaux à mouvement rapide	2,7	2,0	3,3	3

Tableau 2-6. Valeurs de bleu pour les échantillons du torrent de Poche

Les résultats peuvent également être résumés sur un graphique présentant VB en fonction du pourcentage de passant à 2 µm pour chaque échantillon (cf. Figure 2-28 et Figure 2-29). Ce mode de représentation permet de replacer les échantillons dans quelques grands domaines correspondant à quelques argiles ou associations d'argiles. Pour un domaine donné, il y a évidemment de nombreuses autres associations de minéraux argileux possibles.

Cependant, nous pouvons constater que, d'une manière générale, les matériaux de la coulée présentent une proportion de fines et des valeurs de bleu globalement plus importantes que les matériaux ayant subi un plus faible remaniement ou que les Terres Noires (cf. Figure 2-28).

Il est aussi possible de représenter la valeur de bleu (VB) en fonction de la teneur en carbonates. Le graphe de la Figure 2-30 ne permet pas de mettre en évidence une telle corrélation.

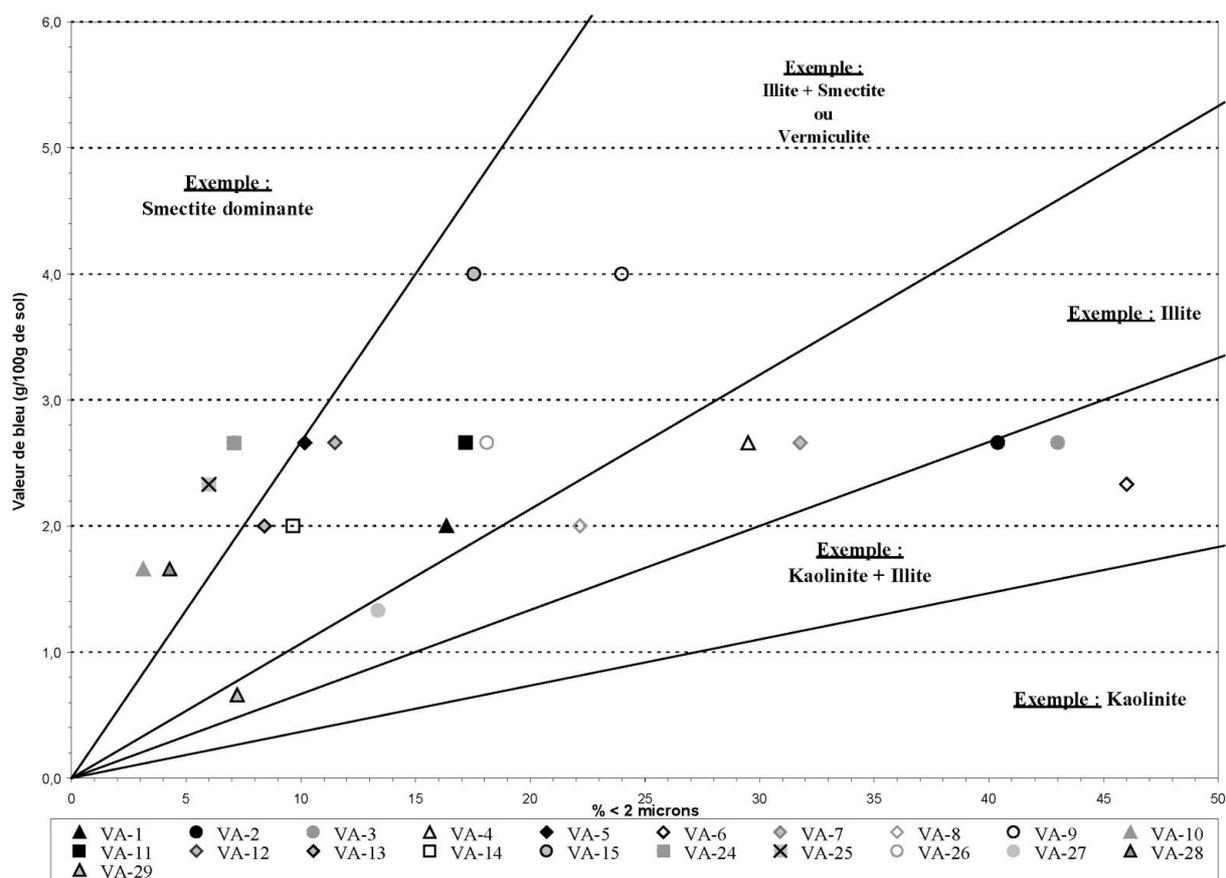


Figure 2-28. VB en fonction du pourcentage de particules inférieures à 2 µm pour les échantillons de la Valette (les triangles sont pour les Terres Noires, les cercles pour les matériaux de la coulée, les losanges pour les matériaux à mouvement rapide, et les carrés pour les matériaux remaniés).

Par ailleurs, à partir de ces valeurs de bleu et du pourcentage inférieur à 2 µm, on peut définir un indice dit de nocivité (cf. Équation 2-4, et Tableau 2-7).

Indice de nocivité (Lautrin, 1989) :
$$N = \frac{100 \times VB}{\% < 2 \mu m}$$
 Équation 2-4

Indice de nocivité (N)	Classe de sol
N < 1	sols non argileux
1 < N < 3	argiles inactives
3 < N < 5	argiles peu actives
5 < N < 8	argiles normales
8 < N < 13	argiles actives
13 < N < 18	argiles très actives
N > 18	argiles nocives

Tableau 2-7. Classes de sols en fonction de l'indice de nocivité (d'après Lautrin, 1989).

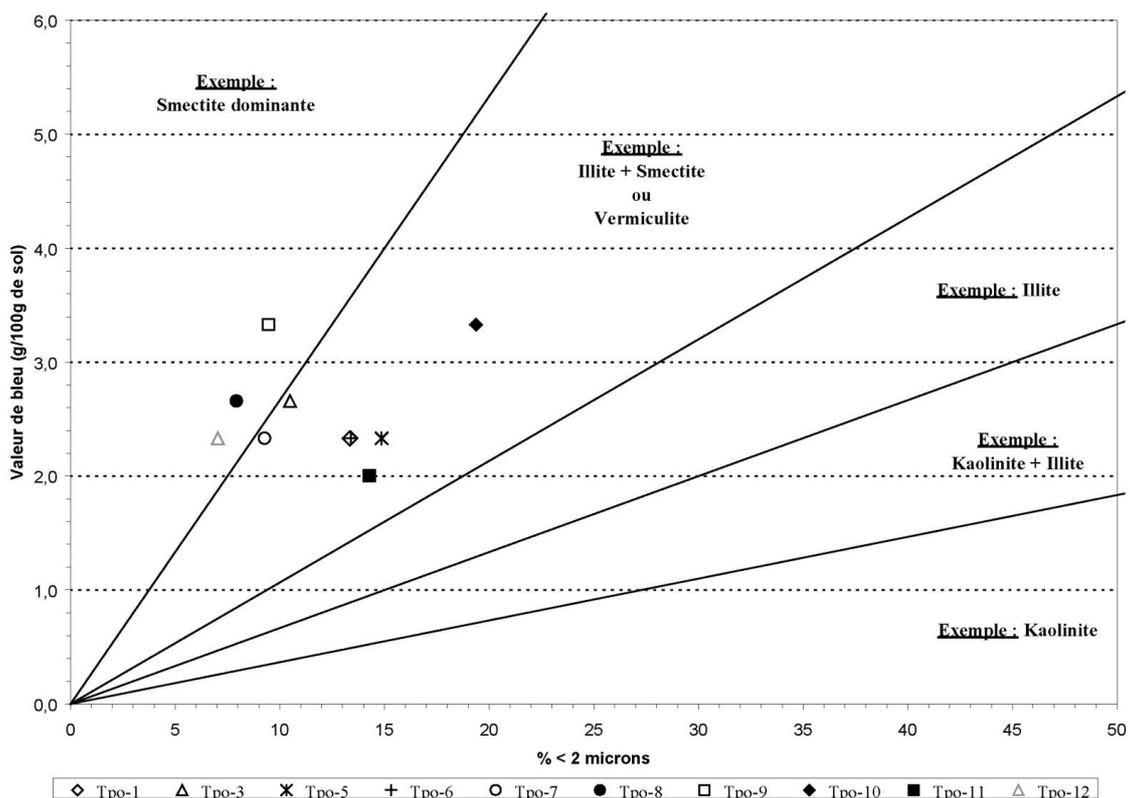


Figure 2-29. VB en fonction du pourcentage de particules inférieures à 2 μm pour les échantillons du torrent de Poche (les figurés pleins représentent les matériaux remaniés et les autres les produits de la coulée).

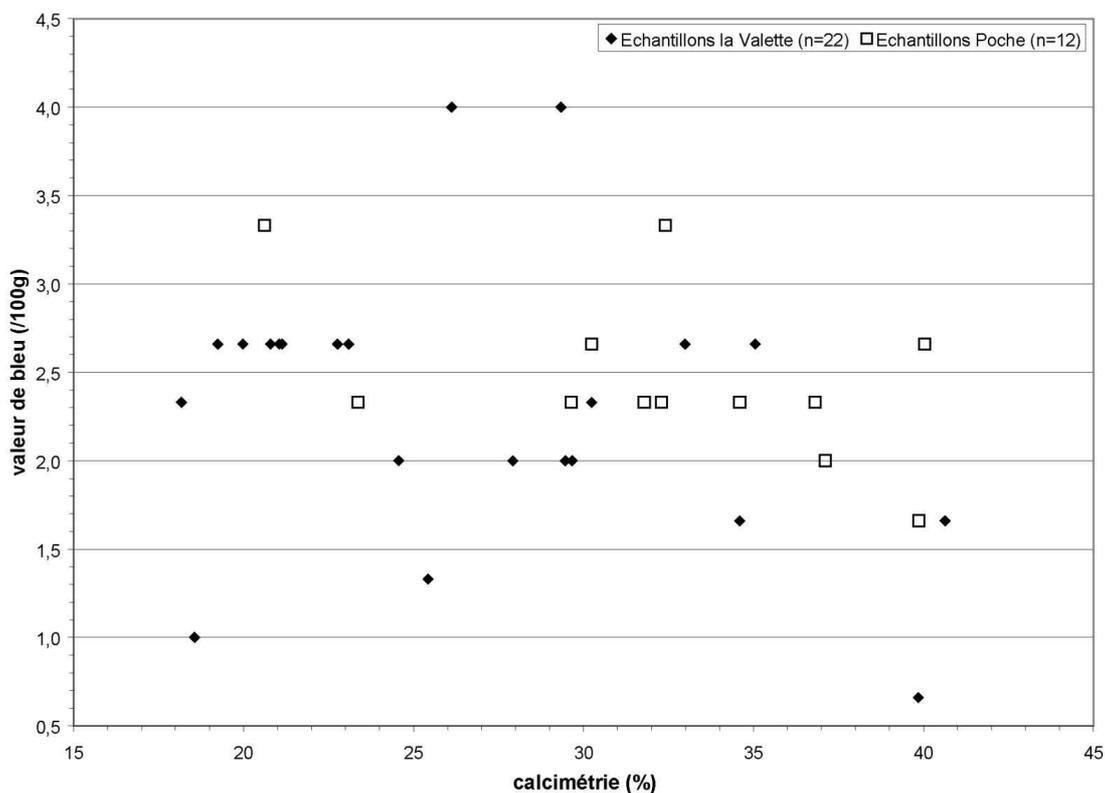


Figure 2-30. Graphe présentant la valeur de bleu par rapport à la teneur en carbonate.

Les résultats révèlent que d'une manière générale, les échantillons analysés sur les sites de Barcelonnette rentrent dans la catégorie des sols dits nocifs (cf. Tableau 2-8 et Tableau 2-9). En revanche, les valeurs de bleu ne paraissent pas complètement en accord avec la composition minéralogique (RX). Ceci est probablement dû à la présence de minéraux altérés et de sulfates recristallisés (gypses et sulfates magnésiens...) liés à l'altération de la pyrite.

	VB	< 2 μ m (%)	N (indice de nocivité)	
VA-1 (Marnes remaniées)	2,0	16	12	sols actifs
VA-10 (Marnes remaniées)	1,7	3	53	sols très nocifs
VA-28 (Marnes remaniées)	1,7	4	39	sols très nocifs
VA-29 (Marnes remaniées)	0,7	7	9	sols actifs
VA-2 (Coulée)	2,7	40	7	sols normaux
VA-3 (Coulée)	2,7	43	6	sols normaux
VA-4 (Coulée)	2,7	30	9	sols actifs
VA-9 (Coulée)	4,0	24	17	sols nocifs
VA-15 (Coulée)	4,0	18	23	sols très nocifs
VA-26 (Coulée)	2,7	18	15	sols nocifs
VA-27 (Coulée)	1,3	13	10	sols actifs
VA-5 (Matériau à mvt rapide)	2,7	10	26	sols très nocifs
VA-6 (Matériau à mvt rapide)	2,3	46	5	sols peu actifs
VA-7 (Matériau à mvt rapide)	2,7	32	8	sols normaux
VA-8 (Matériau à mvt rapide)	2,0	22	9	sols actifs
VA-12 (Matériau à mvt rapide)	2,7	11	23	sols très nocifs
VA-13 (Matériau à mvt rapide)	2,0	8	24	sols très nocifs
VA-11 (Matériau remanié)	2,7	17	15	sols nocifs
VA-14 (Matériau remanié)	2,0	10	21	sols très nocifs
VA-24 (Matériau remanié)	2,7	7	38	sols très nocifs
VA-25 (Matériau remanié)	2,3	6	39	sols très nocifs

Tableau 2-8. Indices de nocivité pour les échantillons de la Valette

	VB	< 2 μ m (%)	N (indice de nocivité)	
Tpo-1 (coulée)	2,3	13	17	sols nocifs
Tpo-3 (coulée)	2,7	10	25	sols très nocifs
Tpo-5 (coulée)	2,3	15	16	sols nocifs
Tpo-6 (coulée)	2,3	13	17	sols nocifs
Tpo-7 (coulée)	2,3	9	25	sols très nocifs
Tpo-9 (coulée)	3,3	9	35	sols très nocifs
Tpo-12 (coulée)	2,3	7	33	sols très nocifs
Tpo-8 (Matériaux à mvt rapide)	2,7	8	34	sols très nocifs
Tpo-10 (Matériaux à mvt rapide)	3,3	19	17	sols nocifs
Tpo-11 (Matériaux à mvt rapide)	2,0	14	14	sols nocifs

Tableau 2-9. Indices de nocivité pour les échantillons du torrent de Poche

Cependant, nous pouvons constater que les échantillons semblent avoir tendance à s'organiser de façon exponentielle, c'est à dire que plus les échantillons présentent un faible remaniement et sont proches des Terres Noires, plus leur indice de nocivité est élevé (cf. Figure 2-31).

Ceci tend à confirmer le caractère très sensible des Terres Noires, et leur aptitude à générer des glissements et des coulées de boue dans la région de Barcelonnette.

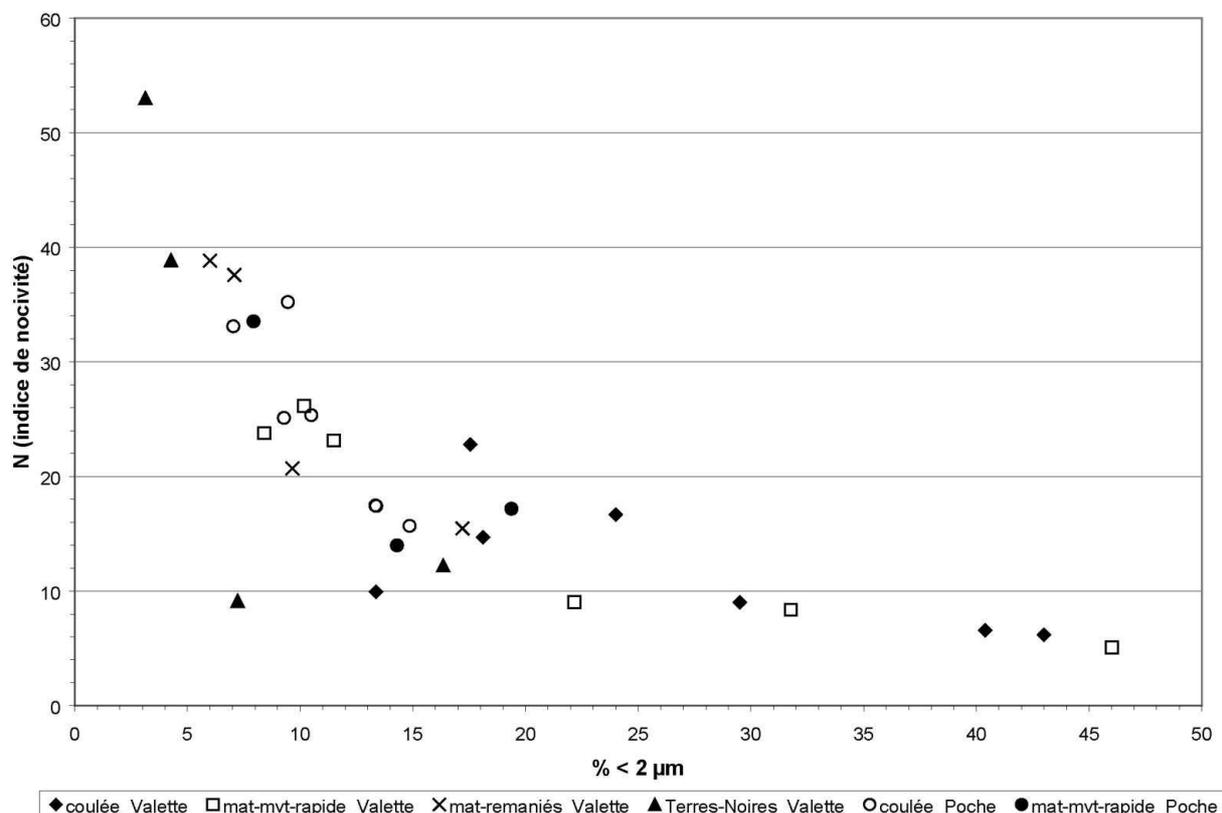


Figure 2-31. Echantillons de l'étude dans le repère Indice de nocivité - %<2 μm.

2.3.3.5. Teneur en carbonates

La teneur en carbonates des matériaux analysés a été faite sur la fraction totale (soit toute la fraction prélevée, inférieure à 20 mm). Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

	calcimétrie (%)	nombre d'échantillons
coulée	27	7
Matériau à mvt rapide	24	7
Matériau remanié	21	6
Marnes en place	36	6

Tableau 2-10. Calcimétrie moyenne sur les échantillons prélevés à la Valette.

En ce qui concerne les échantillons prélevés au niveau du torrent de Poche, deux catégories sont retenues : les matériaux de coulée avec une teneur moyenne en carbonates de 32 % (sur 9 échantillons) et les matériaux à mouvement rapide avec une teneur moyenne en carbonates de 33 % (sur 3 échantillons).

Ces résultats nous montrent que les Terres Noires ont un taux de carbonates conforme à l'appellation de marnes. Il ressort par ailleurs, pour le glissement-coulée de la Valette, que les matériaux mobilisés sont moins riches en carbonates.

Ceci est dû au fait que ces matériaux sont exposés de façon importante à l'altération, ainsi qu'aux processus de dissolution. En outre, il faut remarquer que, plus les matériaux prélevés dans le glissement-coulée sont proches du chevauchement, plus la teneur en carbonates diminue. En effet, les flyschs de la nappe de l'Autapie sont très peu calcaires (à l'approche du chevauchement) et contribuent dans ces zones à l'alimentation des matériaux du glissement-coulée.

2.3.3.6. Teneur en matière organique

La matière organique a été dosée sur la fraction granulométrique 0-2 mm (après broyage). Les dosages ont été effectués par méthode chimique à l'aide d'une solution de dichromate de potassium additionnée d'acide sulfurique.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

	matière organique (%)	nombre d'échantillons
coulée	1,0	7
Matériau à mvt rapide	1,3	7
Matériau remanié	1,4	6
Marnes en place	1,9	6

Tableau 2-11. Teneur moyenne en matière organique sur les échantillons prélevés à la Valette.

En ce qui concerne les échantillons prélevés au niveau du torrent de Poche, pour les deux catégories retenues : les matériaux de coulée présentent une teneur moyenne en matière organique de 2,0% (sur 9 échantillons) et les matériaux à mouvement rapide présentent une teneur moyenne en matière organique de 2,6% (sur 3 échantillons).

Ces résultats semblent souligner le fait que plus le matériau est soumis à un mouvement de type coulée ou très rapide, plus la quantité de matières organiques qu'il contient est faible par rapport aux matériaux en place.

2.3.3.7. Caractéristiques mécaniques

Les essais de caractérisation mécanique ont été effectués dans le but de déterminer les valeurs de cohésion (C) et d'angle de frottement interne (ϕ) des échantillons. Ces essais ont été réalisés avec une boîte de cisaillement rectiligne de forme carrée.

Deux types d'échantillons ont été utilisés :

- des échantillons remaniés, de fraction granulométrique 0-2 mm, en condition saturée et drainée ;
- des échantillons dits "intacts" c'est à dire sur blocs non remaniés et découpés ensuite au laboratoire pour être mis dans la boîte en condition drainée.

	Cohésion (en kPa)	Angle de frottement (en °)	nombre d'échantillons
Coulée	25	30	6
Coulée, "intact"	36	33	4
Matériau à mvt rapide	27	31	6
Matériau à mvt rapide, "intact"	65	34,5	4
Matériau remanié	30	32	4
Marnes en place	38	31	5
Marne RB	H = 310 V = 556	H = 45 V = 44	2

Tableau 2-12. Valeurs moyennes pour le versant de la Valette et les marnes prélevées dans le Riou Bourdoux –RB. Ici, les marnes prélevées dans le Riou Bourdoux l'ont été sans aucun remaniement sur des blocs (H = stratification horizontale ; V = stratification verticale).

En ce qui concerne les échantillons prélevés au niveau du torrent de Poche, on obtient, pour les deux catégories retenues, les résultats suivants :

	Cohésion (en kPa)	Angle de frottement (en °)	nombre d'échantillons
Coulée	27	32	9
Matériau à mvt rapide	32	29	3

Tableau 2-13. Valeurs moyennes pour le versant du torrent de Poche.

Il ressort que les valeurs de cohésion, pour les échantillons remaniés, sont proportionnelles au taux de remaniement des matériaux. Ceci est quasiment vérifié aussi pour les angles de frottement, bien que les valeurs soient relativement proches. Les matériaux dits "intacts" présentent des valeurs de cohésion plus fortes en raison de leur mode de mise en place dans la boîte de cisaillement. En effet, pour les échantillons remaniés seule la "matrice" (passant à 2 mm) est cisillée.

En ce qui concerne les échantillons provenant du bassin du Riou Bourdoux, les valeurs obtenues sont beaucoup plus élevées, en raison du fait qu'il s'agit ici de Terres Noires

relativement peu altérées et non remaniées par des mouvements superficiels de type glissement de terrain.

Par ailleurs, les résultats des angles de frottement sont relativement proches entre eux, mais demeurent aussi élevés pour des matériaux remaniés. De même, la valeur moyenne pour les Terres Noires du Riou Bourdoux est un peu élevée.

Pour les échantillons intacts, les courbes efforts-déplacements révèlent un état de faible surconsolidation.

Ces valeurs sont relativement comparables à des valeurs tirées de la bibliographie. En particulier, il est possible de les comparer aux résultats obtenus par Maquaire et al (2003) sur divers sites de la région de Barcelonnette dont le glissement-coulée de Super-Sauze (cf. Tableau 2-14).

	Φ' (°)	C' (kPa)	nombre d'échantillons
"Terme supérieur" des marnes du Callovo-oxfordien de la région de Barcelonnette	30-33	15-22	7
"Terme inférieur" des marnes du Callovo-oxfordien de la région de Barcelonnette	34-39	8-17	9
Sauze	29-32	16-37	10
Valette	21-24	31-40	9
Poche	28-37	8-22	7

(par cisaillement direct ; Φ' : angle de frottement effectif ; C' : cohésion effective)

Tableau 2-14. Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques obtenues par Maquaire et al (2003), pour la région de Barcelonnette.

2.4. Conclusions

Le contexte géologique de la région de Barcelonnette est relativement complexe. Cependant, plusieurs points sont à prendre en compte tant sur le plan géologique local, que sur le plan géotechnique par rapport aux instabilités affectant la zone d'étude.

D'un point de vue lithologique, deux grands domaines sont présents :

- les marnes, appelées Terres Noires, autochtone visible à la faveur de la fenêtre tectonique de Barcelonnette ;
- les flyschs de la nappe de l'Autapie aussi appelés localement Flysch dissocié.

Ces deux unités, ont un comportement mécanique et hydrologique très différent. En revanche, leur proximité de faciès à l'approche du chevauchement, avec une schistosité très pénétrative, rend les limites d'extension de chaque formation localement difficiles à préciser.

Les Terres Noires présentent des caractéristiques particulières face aux diverses sollicitations. Leur altération est fortement poussée, et la présence de pyrite leur confère un comportement

mécanique aussi néfaste que celui d'une argile gonflante. Le contraste de cohésion entre Terres Noires intactes et remaniées (donc altérées) traduit un comportement mécanique favorable aux coulées de boue, ce qui se vérifie sur la zone étudiée.

Le Flysch dissocié est affecté par de nombreuses fractures et plissements. Sa structure particulière, "dilacérée", le rend très prédisposé aux glissements.

Le contact entre ces deux formations principales s'effectue par une discordance tectonique, elle-même affectée de nombreux accidents post-nappes, et jalonnée d'écaillés de calcaire et de gypse ou cargneules.

Les formations superficielles, moraines, altérites et formations de pente, sont elles-mêmes l'objet de nombreuses instabilités de versant.

Ces données géologiques et géotechniques jouent un rôle majeur sur le développement des mouvements de versant.

De plus, le contexte hydrogéologique particulier favorise le déclenchement des instabilités : glissements, coulées boueuses et laves torrentielles.

Chapitre 3 : L'eau : le contexte hydrologique et hydrogéologique d'un versant instable

3.1. Apports de l'analyse hydrogéologique sur la compréhension des processus de déstabilisation de versants

La stabilité des pentes, comme nous avons pu le voir dans le Chapitre 1, est fortement influencée par la présence de l'eau sous diverses formes. Pour mieux appréhender le rôle que peut jouer l'eau, il faut commencer par connaître sa position dans le massif et le versant, ses modes de circulations, ses points d'entrées et de sorties du système. Ces données peuvent être en partie obtenues grâce aux moyens classiques de l'hydrogéologie.

3.1.1. Outils d'analyses pour la connaissance des aquifères

3.1.1.1. L'inventaire des sources et l'analyse de leur contexte géologique

L'inventaire des sources sur le versant à étudier doit déborder le cadre strict du glissement étudié. Cet inventaire doit être réalisé à l'époque des hautes eaux et à l'étiage, afin de classer les sources en deux grandes catégories. A savoir, les sources dites pérennes et les sources plus superficielles qui se tarissent ou qui présentent de fortes variations de débits.

Cet inventaire peut aussi, en cas de mauvaise qualité des affleurements géologiques, donner des indices sur la lithologie du substratum. A ce stade, nous améliorons notre connaissance des exutoires possibles pour la ou les nappes qui sont susceptibles d'affecter la stabilité de la zone étudiée.

Sur le terrain, cette étape consiste à positionner sur une carte les différents exutoires rencontrés, et à les intégrer dans le contexte géologique local. Deux grands types de difficultés peuvent être rencontrés à ce niveau : la différenciation des véritables exutoires et des résurgences d'écoulements en formations de pente qui sont des exutoires décalés. En outre, de manière plus particulière aux zones en glissement, le positionnement des points pour leur suivi peut poser quelques difficultés. En effet, les déplacements des masses impliquées dans les glissements modifient continuellement la topographie, et parfois masquent certaines sources, même pérennes.

En outre, certains exutoires sont captés et protégés, ce qui complique un peu leur inventaire. Parfois, certains systèmes d'irrigation ou de rejet des eaux (trop plein ou eaux usées réalimentant le massif) rendent aussi plus difficile cet inventaire indispensable.

3.1.1.2. Analyse du fonctionnement hydrogéologique

Dans une deuxième étape, le fonctionnement hydrogéologique du versant étudié doit être précisé. La prise en compte des données climatiques et l'analyse des eaux des sources apportent des informations essentielles.

- Climatologie et bilan hydrique (hydrologique et hydrogéologique)

Les données climatiques doivent être analysées par référence à l'emplacement de la station de mesure comparé au site d'étude. En effet, en montagne, les précipitations et les températures sont très influencées par l'altitude et l'orientation du versant. Il n'est pas rare que des orages aient lieu sur les crêtes, sans que le fond de la vallée ne soit pas affecté.

Mais une fois que ces éléments ont été pris en compte, il est nécessaire de les exploiter en y intégrant les résultats des inventaires des sources et des torrents, afin de réaliser le bilan hydrique du versant, et éventuellement de pouvoir comparer les bassins versants géographique et hydrogéologique.

Ce bilan peut être quantifié, en partie, en évaluant les différentes évolutions possibles des précipitations grâce notamment aux formules de Thornthwaite ou de Turc. En effet, ces formules empiriques permettent d'estimer la part des précipitations consommées par l'évapotranspiration, et la part qui s'infiltrerait réellement dans le massif. Ceci permet donc de mieux cerner la réaction des versants face aux conditions climatiques, et d'estimer les périodes et situations critiques pour la stabilité des versants.

- Les mesures de conductivité électrique, température, débit, traçage et pH (sur le terrain)

Ces méthodes sont relativement faciles à mettre en œuvre sur le terrain, et requièrent un matériel relativement limité.

Les mesures de débit et de température sont les mesures les plus simples à effectuer, et donnent déjà une information sur la provenance des eaux. En effet, le débit permet de différencier les sources dépendantes des eaux de surfaces, par rapport aux sources de déversement des nappes. Cependant, les mesures de débits sont à analyser avec beaucoup de précautions lorsqu'elles sont chiffrées, car les conditions de mesures peuvent nettement influencer sur les résultats. Les mesures sont parfois compliquées par le caractère diffus de l'émergence, par la faiblesse des quantités mesurables, et par l'irrégularité (à l'échelle de temps de la prise de mesure) des volumes sortants.

A une température de référence de 25°C, les mesures de conductivité électrique, généralement exprimée en micro-siemens par centimètre ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) permettent d'avoir une valeur globale de la minéralisation de l'eau considérée. C'est une mesure indirecte de la concentration des ions en solution.

Plus la valeur de cette conductivité est élevée, plus la minéralisation de l'eau est importante et donc son origine profonde, étant peu influencée par les eaux de pluies. Cette méthode de prospection étant relativement simple à mettre en œuvre, il est possible d'envisager des campagnes de mesures systématiques.

Comme pour les mesures de débit et de température, ces mesures doivent être faites en hautes eaux et à l'étiage, afin de pouvoir caractériser le comportement de chaque source.

Ces mesures, réalisées avec un pas de temps relativement court, permettent de caractériser, de façon fine et en corrélation avec les conditions hydroclimatiques, les réactions des nappes d'aquifères faces à des événements remarquables (cf. Figure 3-1).

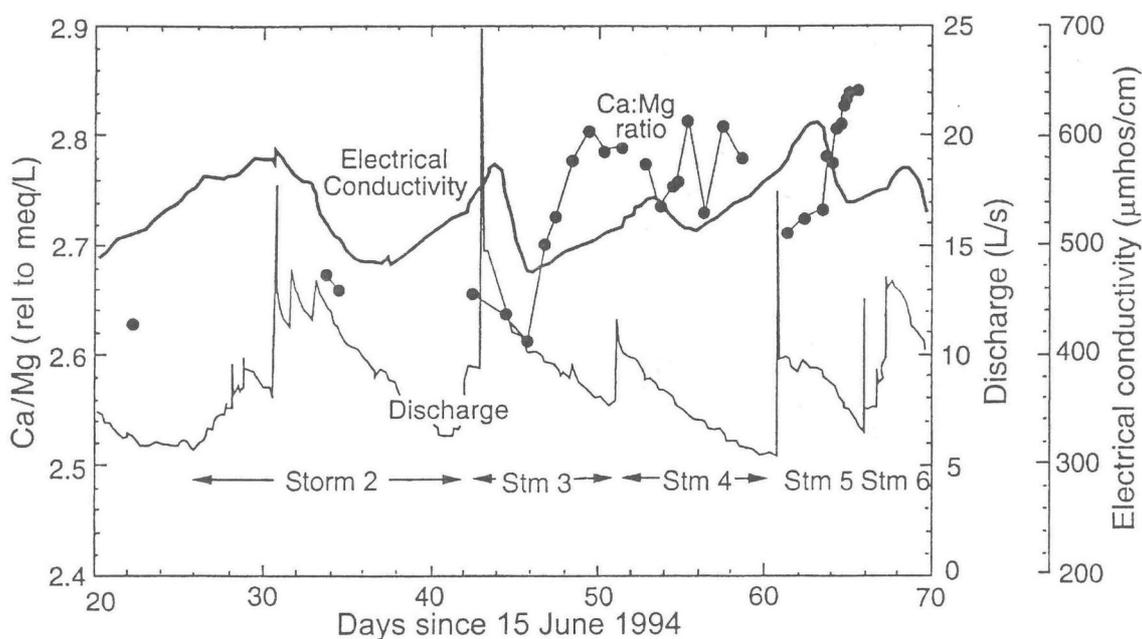


Figure 3-1. Corrélation entre la conductivité d'une source, son débit, et le ratio Ca/Mg d'une part et des épisodes orageux d'autre part (Desmarais et Rojstaczer, 2002).

L'exemple traduit bien le phénomène de dilution qui se produit à la suite de pluies importantes ou d'orages. Par ailleurs, la baisse de la conductivité est corrélée avec une augmentation du débit. Les pluies provoquent une dilution des concentrations, mais les eaux de ruissellement restent généralement plus concentrées que la pluie, si le milieu est fortement minéralisé.

Le traçage est une autre méthode, complémentaire, permettant de mieux connaître le mode d'alimentation de l'aquifère. Il consiste à introduire un traceur (chimique ou radioactif à vie courte) dans le massif, et à suivre son déplacement dans l'aquifère suivant une (ou des) trajectoire(s) définie(s) entre un point d'origine et un ou plusieurs points de détection (les

exutoires du versant). Le temps mis pour parcourir ce trajet est appelé temps de transit. Il est différent du temps de réponse visible par la modification du débit, car il ne traduit pas un effet de pression, mais le temps nécessaire pour transiter dans l'aquifère.

Cette méthode se base sur la variation de la concentration du traceur détecté au niveau des exutoires surveillés, en fonction du temps écoulé depuis son introduction (cf. Figure 3-2).

Elle est très utilisée en hydrogéologie pour définir les périmètres de protection des ressources en eau potable (par exemple).

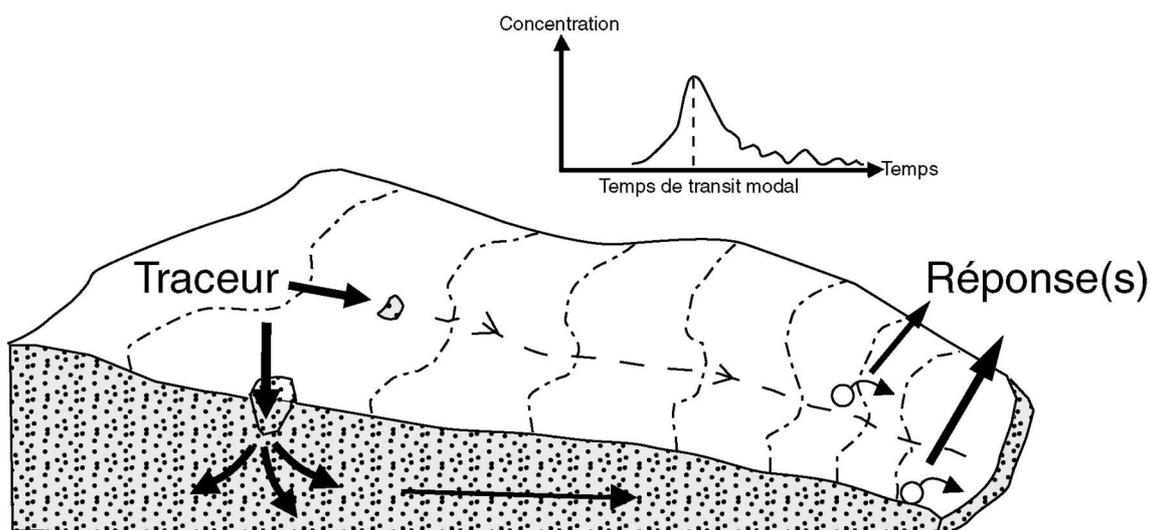


Figure 3-2. Schéma de principe d'un essai de traçage.

La mesure du pH nécessite un matériel de terrain un peu moins courant mais relativement fiable. Cette mesure s'effectue en même temps que celle de la conductivité et de la température. La valeur du pH permet de compléter celle de la conductivité. Elle permet de savoir si l'eau est, du point de vue de sa minéralisation, en équilibre avec le milieu. On obtient ainsi une indication sur les temps de transit et sur les réactions chimiques pouvant intervenir dans l'aquifère. En outre, cette mesure est indispensable pour la mise en œuvre de certains essais de laboratoire.

Ces différentes étapes sont des caractérisations indirectes, qui permettent de comprendre en partie le fonctionnement de la nappe et ses relations avec l'aquifère.

Elles sont souvent complétées par des moyens d'investigation plus lourds à mettre en œuvre (in situ et en laboratoire), mais indispensables pour comprendre le fonctionnement du versant étudié.

3.1.1.3. Autres moyens d'investigations possibles : piézométrie et pompages d'essais, les prélèvements d'échantillons ...

Il existe de nombreux moyens permettant de compléter les techniques de prospection déjà évoquées, mais ils nécessitent tous des ressources relativement plus importantes.

Ces moyens sont aussi utilisés en hydrogéologie "classique", et sont de deux ordres : les essais in situ et les analyses complémentaires en laboratoire.

Les essais in situ consistent en des mesures sur des forages et suivis piézométriques. Par ailleurs, des pompages d'essais permettent d'obtenir les caractéristiques du ou des aquifères (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement...).

Cette phase est nécessaire pour une modélisation hydrogéologique, et peut être utile pour une modélisation géomécanique, qui peut nécessiter une connaissance précise de la répartition des pressions hydrauliques établies dans le versant. La mesure directe des pressions, au travers de la piézométrie, peut être également complétée par des simulations hydrogéologiques afin de bien cerner tous les paramètres mécaniques agissant sur le comportement du versant.

Par ailleurs, les analyses faites en laboratoire sur des échantillons d'eau prélevée sur le terrain (à l'exutoire ou en forage) permettent d'établir les caractéristiques chimiques des sources. Ces caractéristiques chimiques nous renseignent ensuite sur l'altitude d'infiltration (méthode isotopique), le parcours et la durée (analyses des ions présents, ...) de l'eau dans le massif. En outre, ces données contiennent aussi des informations sur les processus possibles d'altération chimique du massif par les circulations d'eau et par les mélanges entre deux faciès d'eaux ayant des parcours différents.

3.1.2. Mise en évidence de caractères hydrochimiques particuliers liés à des caractéristiques d'évolution du glissement

L'évolution des glissements est en grande partie liée à l'eau. Il est donc légitime de penser que les sources et les exutoires présents sur les glissements pourront nous informer sur les différentes origines des écoulements souterrains. Ainsi, il est possible de mieux maîtriser la présence de l'eau sur ces derniers, et de ralentir l'évolution des instabilités.

Les mesures de conductivité et de modification ionique sont de bons moyens de connaître le trajet de l'eau dans le sous-sol. L'eau peut avoir son exutoire en dehors de la zone en glissement et n'agir que par variations de pression, d'où l'intérêt de cerner son parcours. Sur le versant du Hohberg en Suisse (Tullen, 2002), les sources proches du contact anormal, où se trouvent des roches triasiques, présentent des conductivités élevées par rapport au reste du versant. Cette particularité s'accompagne d'une forte concentration en sulfates. Ceci traduit une origine profonde et évoluée (ou complexe) de ces eaux en équilibre avec le massif.

Cette constatation a permis de démontrer (Tullen, 2002) l'existence d'une alimentation profonde du massif, qui doit être prise en compte dans la gestion de la stabilisation du versant. D'autres sites ont aussi révélé, après analyse, des liens entre roches triasiques et teneur en sulfates sur la zone en glissement (cf. Figure 3-3).

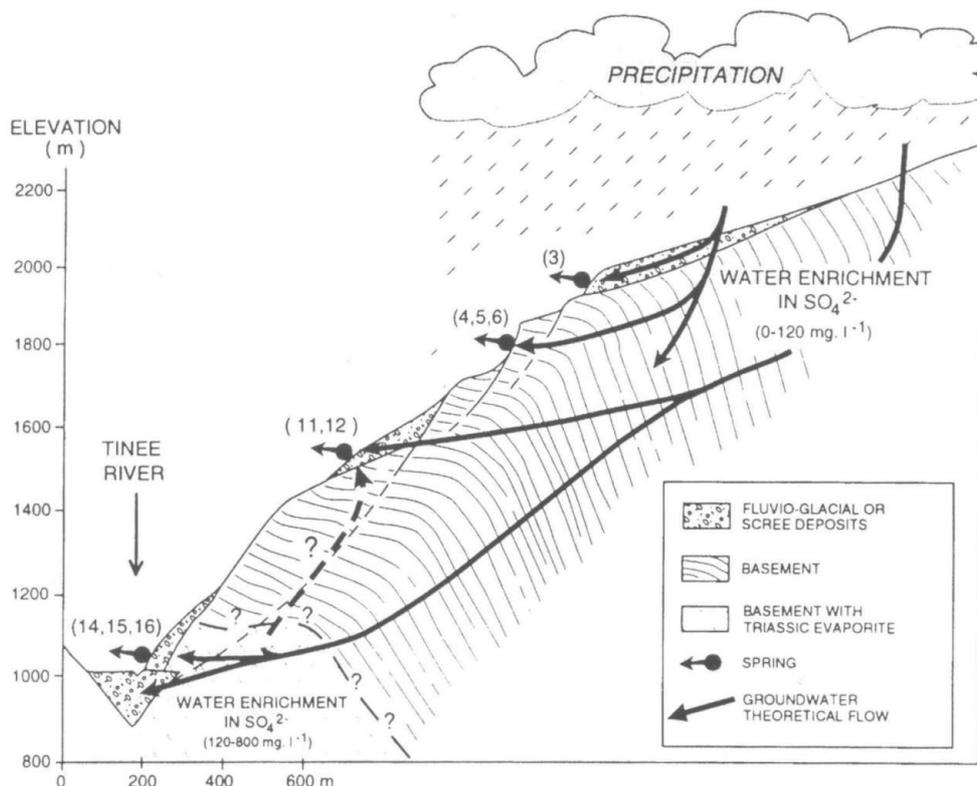


Figure 3-3. Coupe schématique du glissement de La Clapière – Alpes Maritimes (Guglielmi et al, 2000).

Les analyses des concentrations de divers ions, comme Ca²⁺, Mg²⁺, Fe²⁺, Na⁺, Cl⁻, NO₃⁻ ..., permettent aussi de caractériser le fonctionnement des écoulements à travers le versant (Guglielmi et al 1998). En effet, en connaissant les formations présentes sur le versant, il est possible de retracer l'historique du trajet des eaux au niveau de chaque exutoire. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'il y a sur le versant des formations particulièrement solubles, comme le gypse ou les carbonates.

Par ailleurs, les analyses isotopiques permettent également de connaître, de manière plus approfondie, les altitudes d'infiltration et les parcours possibles de l'eau au sein du versant déstabilisé. Ainsi à La Clapière, les analyses sur les isotopes de l'oxygène ont permis de mieux cerner les altitudes d'infiltration en fonction des périodes de l'année (Compagnon, 1996).

En utilisant la recherche sur des isotopes autres que l'oxygène, comme le strontium pour les milieux évaporitiques (Tullen, 2002), il est possible de quantifier les mélanges entre les différentes composantes au niveau d'un seul exutoire. Ceci peut conduire aussi à la

détermination du temps de transit entre les zones d'infiltration et les zones de résurgence considérées, et donc de cerner les zones d'infiltration les plus critiques.

Toutes ces données peuvent également permettre de définir des faciès de sources jouant des rôles bien déterminés dans l'évolution du versant. A la Clapière (Alpes-Maritimes) et à Séchilienne (Isère), il a été établi que certaines caractéristiques cinématiques du glissement étaient reliées à des faciès d'eau bien particuliers, et donc à des voies d'alimentation bien précises (Compagnon et al 1997 et Guglielmi et al. 2002).

Les analyses ioniques et isotopiques permettent donc une appréciation des fonctions de transfert, et un meilleur calibrage des modèles hydrogéologiques (Tullen, 2002). Par conséquent, elles constituent une première étape vers les modélisations hydromécaniques et géomécaniques.

3.2. Le glissement-coulée du torrent de Poche

3.2.1. Vue d'ensemble du bassin versant du torrent de Poche : torrents et sources

Le torrent de Poche est un affluent rive gauche de l'Ubaye, situé entre Jausiers et Barcelonnette, au niveau du hameau des Davids (Figure 3-4).

A l'Ouest, se situent le Riou des Ribes et le Ravin des Argiles, et à l'Est le torrent de la Frache. Le torrent prend sa source aux alentours de la cote 2300 m, juste en bordure de la fenêtre de Barcelonnette, et en-dessous de la Croix de l'Alpe (point coté dans les flyschs à 2591 m). Son lit est donc situé entièrement dans les Terres Noires. De plus, son cours inférieur, juste avant l'Ubaye, est fortement perturbé par les matériaux du glissement-coulée.

Les diverses archives, du service O.N.F.-R.T.M., datant de la fin du 19^{ème} et début du 20^{ème} siècle, font état de la forte activité du torrent de Poche et du petit Riou qui le rejoint avant l'Ubaye et qui prend sa source dans l'actuelle tête du glissement.

3.2.1.1. Les torrents et leur aménagement

L'activité du torrent de Poche, d'après les archives, a conduit les services O.N.F.-R.T.M. de l'époque à corriger le cours inférieur du torrent, afin de limiter son activité qui influait nettement sur le cours de l'Ubaye.

Cette activité demeure visible et active dans le cours supérieur du torrent, en amont du glissement (cf. Chapitre 4).

Les torrents voisins sont eux aussi très actifs, érodant les Terres Noires et alluvionnant dans l'Ubaye.

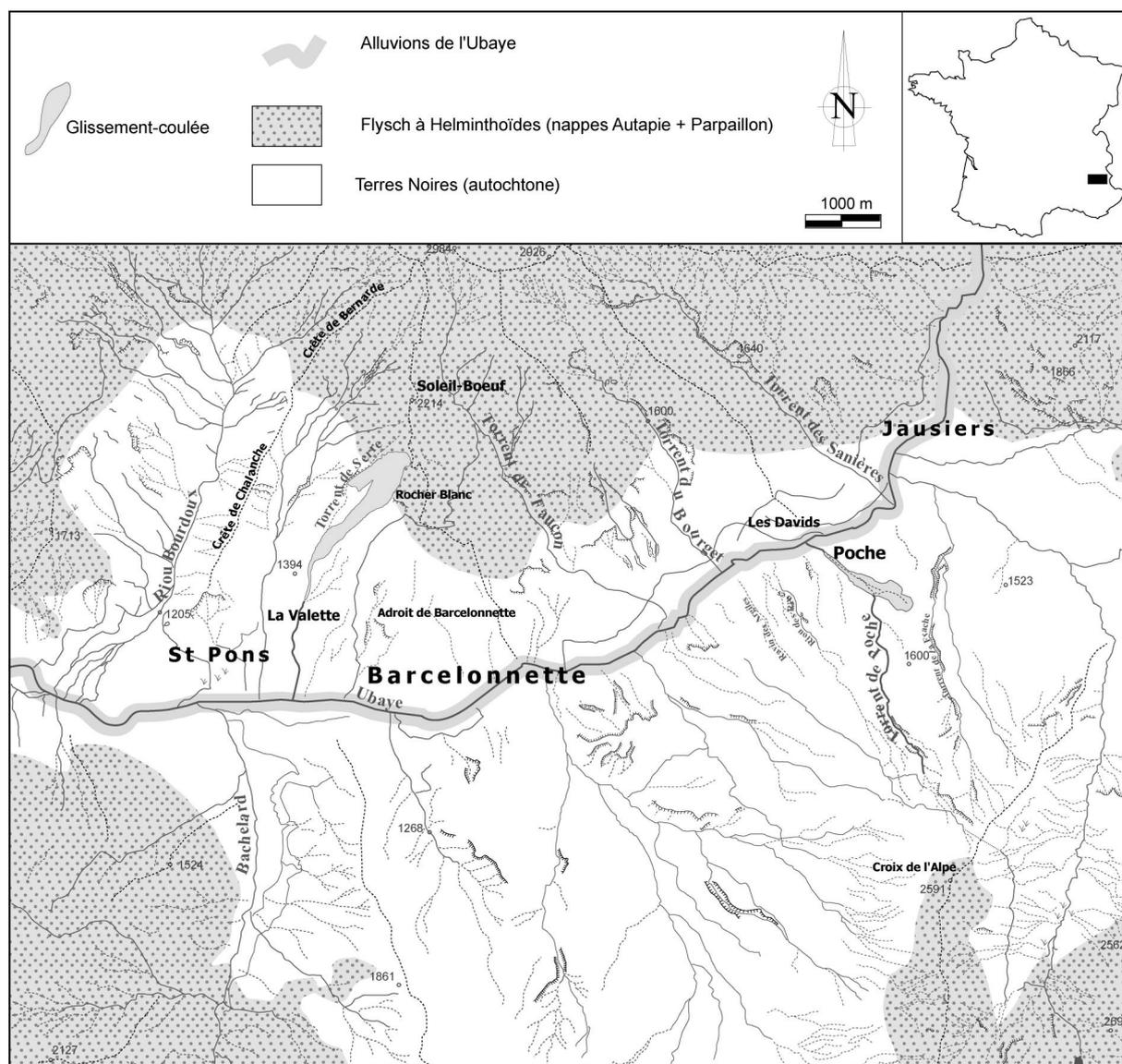


Figure 3-4. Réseau hydrographique de la fenêtre de l'Ubaye (version agrandie en Annexe 3-4).

3.2.1.2. Inventaire des circulations d'eau sur le site

Une prospection à caractère hydrogéologique a été réalisée à quatre reprises sur le glissement-coulée : deux en mai 2001, une en octobre 2001 et une autre en octobre 2002.

Le corps du glissement a fait l'objet d'un suivi des conductivités, températures et débits. Les pentes aux alentours et en amont du glissement ont été aussi prospectées. Le glissement étant situé dans les Terres Noires, les sources sont présentes en nombre limité et certains points sont uniquement des résurgences d'eaux de ruissellement infiltrées plus en amont (cf. Figure 3-5).

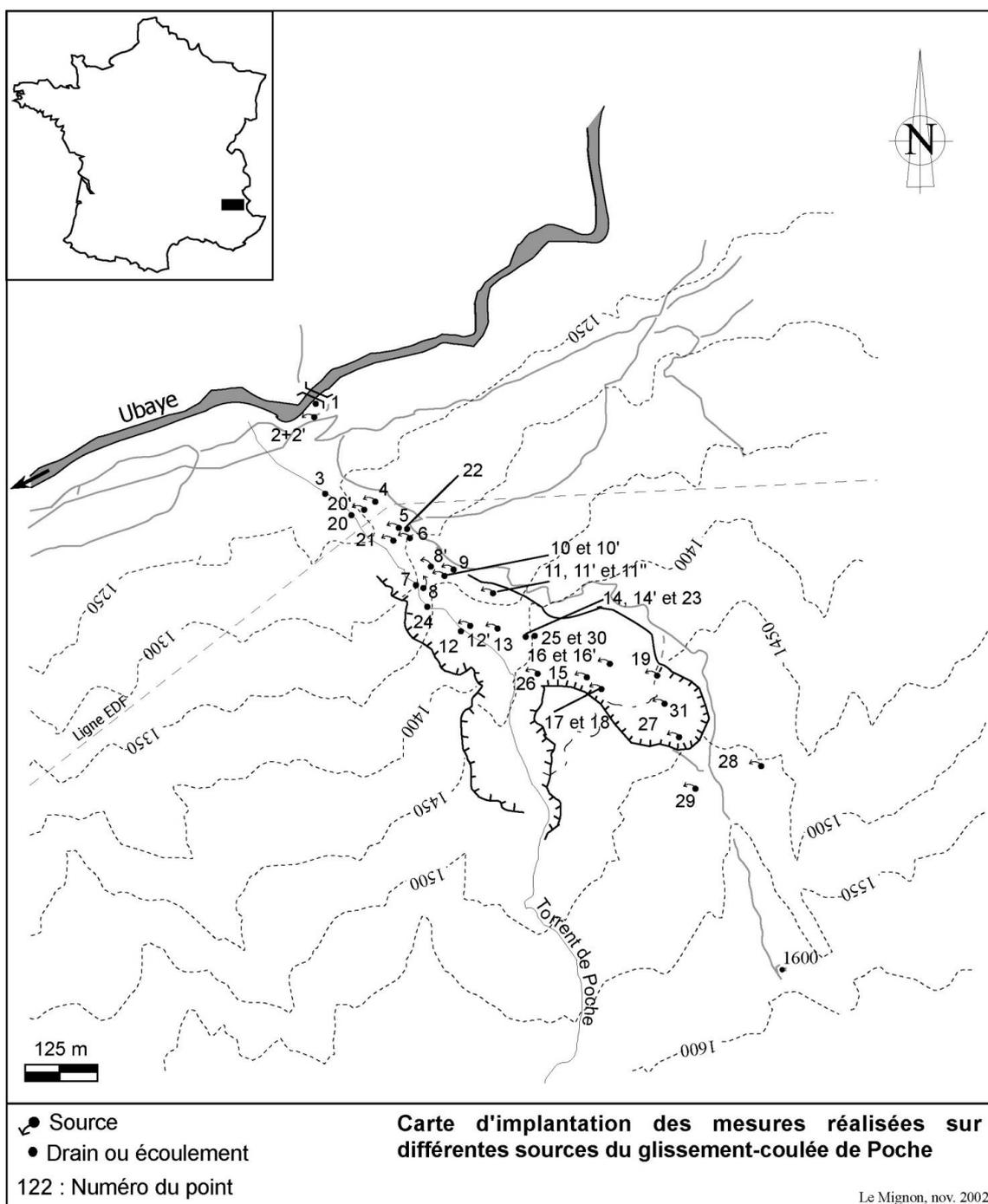


Figure 3-5. Carte des différentes sources mesurées sur le site du glissement-coulée de Poche.

3.2.1.3. Contexte lithologique, et structural – configuration hydrogéologique du site

L'eau est très présente sur tout le glissement, y compris en bordure, sous la forme de résurgences, ou de zones humides ou sagnes. D'après le service R.T.M. de Barcelonnette, il existe par ailleurs des problèmes d'étanchéité ou de surverse de réservoirs en amont du glissement, entraînant des apports supplémentaires d'eau qui accélèrent encore les mouvements des terrains.

En outre, l'ensemble des torrents sur le versant prennent leur source sur les hauteurs au niveau du raidissement des pentes, au contact du chevauchement. Cette situation correspond aussi à une zone où les Terres Noires deviennent riches en petits bancs de calcaire.

Quelques sources sont aussi observables vers les cotes 1500 – 1600 m, et certaines peuvent présenter des forts débits, suffisants pour générer des phénomènes de suffosion et d'entraînement de fines argileuses.

3.2.2. Résultats des analyses

Les analyses de conductivités, températures et débits ont été réalisées sur une journée, à chaque passage, afin de s'affranchir de l'éventuelle influence de la pluie qui interviendrait pendant le relevé du secteur.

Les mesures de conductivités d'août 2000 et mai 2001 ont été réalisées avec l'appareil du Laboratoire EDYTEM de l'Université de Chambéry, à une température de référence 20°C, et ramenées arithmétiquement à la température de référence de 25°C (cf. Annexe 3-2 et Annexe 3-3). Les mesures, d'octobre 2001 à octobre 2002, ont été réalisées avec l'appareil du CGI, à la température de référence de 25°C.

A chaque mission, un dosage a été effectué en un seul point sur l'eau du torrent et du glissement en aval, juste avant la confluence avec l'Ubaye. Il a concerné certains cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ et Fe^{2+} , et anions SO_4^{2-} et HCO_3^- . Les résultats sont présentés sur des cartes présentes en Annexe 3.

Les sources identifiées sur le site sont, pour la majorité, très influencées par la pluviométrie et présentent de faibles débits. Ceci est attesté par le fait que nombre de sources identifiées en mai 2001 n'ont pas été retrouvées à l'étiage en octobre 2001 et octobre 2002.

Cependant, il ressort quelques caractéristiques permettant de classer les sources en trois catégories :

- les sources faiblement à moyennement minéralisées, qui sont principalement en dehors du glissement, et qui ont des conductivités proches de celles du torrent de Poche ;
- les sources présentant des conductivités élevées, mais restant très sensibles au contexte météorologique ;
- les sources du glissement fortement minéralisées et moins sensibles à la pluviométrie, qui ont donc un parcours relativement important au sein du massif.

3.2.3. Relation minéralisation – eau infiltrée dans le glissement

Comme les résultats des mesures le laissent transparaître (cf. Annexe 3-9), il existe bien une différence notable entre les eaux présentes sur le corps du glissement et celles qui sont présentes dans le voisinage, ou même les eaux drainées par le torrent de Poche. Ce contraste est encore plus grand si l'on prend comme référence l'Ubaye (ayant généralement une conductivité entre 250 et 350 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ environ).

D'une manière générale, il a été observé que les eaux du glissement présentent des conductivités beaucoup plus élevées que celles présentes au voisinage. Leur minéralisation est par voie de conséquence plus importante. Ceci peut en partie être lié au fait que le corps du glissement présente, en période sèche, de nombreuses minéralisations de gypse et de sulfates. La minéralisation des eaux est sûrement liée aussi au fait qu'une partie d'entre elles provient des terrains situés à proximité ou au-dessus du contact entre les Terres Noires et les flyschs. En effet, les eaux provenant des flyschs présentent toujours toutes les caractéristiques d'une eau évoluée (Tullen, 2002), c'est à dire en équilibre avec le ou les aquifères rencontrés.

Ces constatations conduisent donc à mettre l'accent sur la maîtrise des infiltrations indirectes et bien en amont de la zone déstabilisée, sans pour autant négliger les infiltrations directes.

3.3. Le glissement-coulée de la Valette et son contexte

Le glissement-coulée de la Valette est situé au niveau d'un torrent, celui de la Valette, qui était un affluent rive droite de l'Ubaye, situé entre les communes de Barcelonnette et de Saint-Pons (cf. Figure 3-4).

3.3.1. Présentation détaillée du versant : torrents et sources

L'analyse hydrogéologique du glissement-coulée de la Valette a été entreprise avec un cadre dépassant l'emprise stricte du glissement afin de caractériser le contexte dans lequel il s'insère. La zone d'étude prend appui, à l'Est, sur le torrent de Faucon, et, à l'Ouest, sur la crête de Bernarde et de Chalanche.

3.3.1.1. Présentation du versant du torrent de la Valette : torrents et différents aménagements

Le versant du torrent de la Valette est situé en rive droite de l'Ubaye sur l'adret. L'ensemble du versant considéré est parcouru par trois torrents principaux qui sont (d'Est en Ouest) : le torrent de Faucon, le torrent de la Valette et le torrent de Saint-Pons. Il existe, en plus, des

zones où de petits ravins drainent des écoulements discontinus et des fossés faisant partie d'un ancien système d'irrigation.

Ces trois torrents, ainsi que certaines portions de ravins, ont été corrigés afin de limiter leur activité torrentielle. Les torrents sont formés tous trois par une conjonction de quelques sources diffuses qui alimentent leurs thalwegs.

3.3.1.2. Inventaire des sources du versant et du glissement

Cet inventaire des sources (et/ou résurgences) a été réalisé à deux échelles différentes afin d'insérer le glissement-coulée de la Valette dans son contexte hydrogéologique : l'échelle du glissement-coulée avec l'inventaire de toutes les sources et résurgences sur le corps des matériaux mobilisés, et l'échelle du versant avec l'inventaire des sources et sagnes sur ce dernier (cf. Figure 3-6 et Figure 3-7).

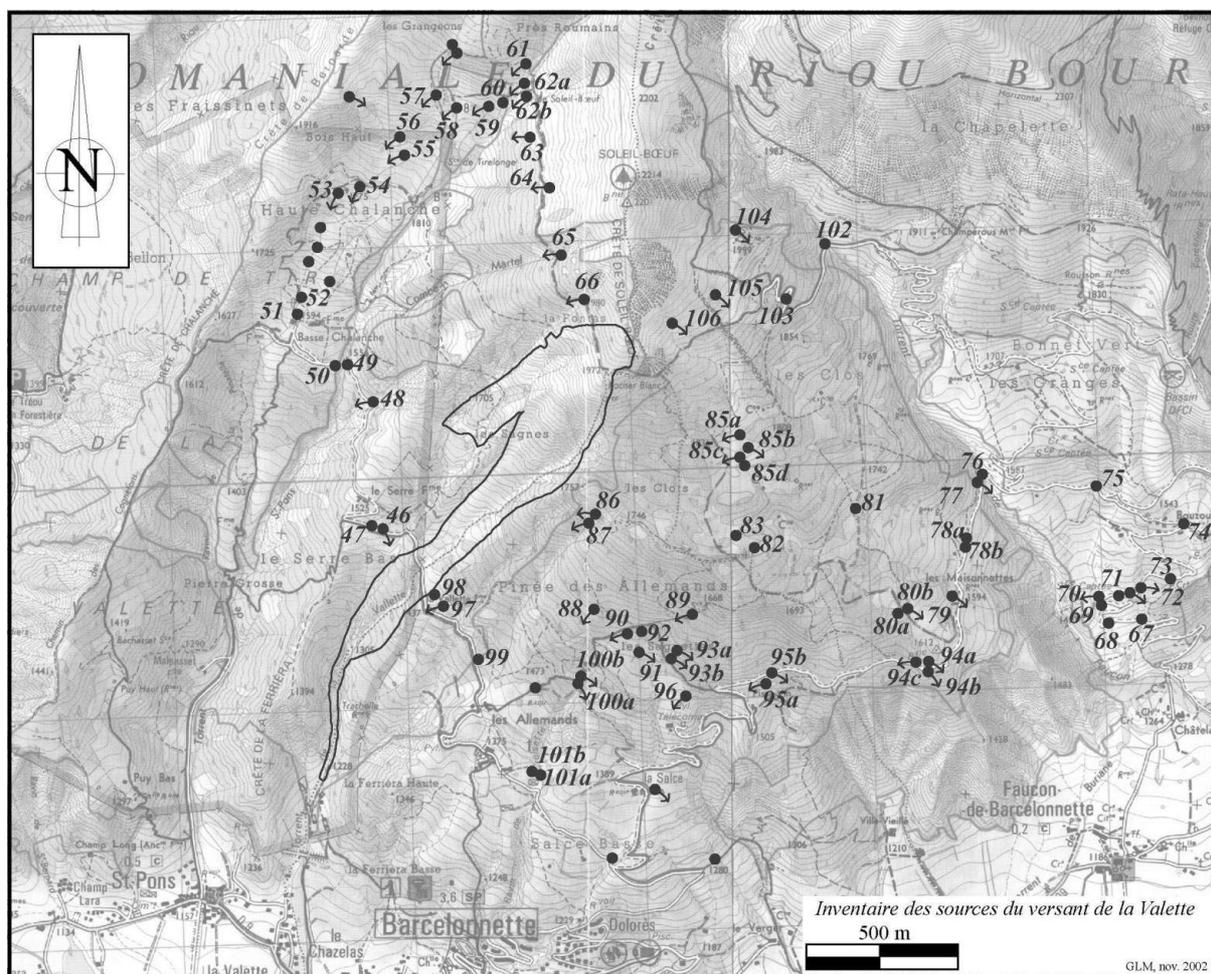


Figure 3-6. Carte de l'inventaire du versant réalisé autour du glissement-coulée de la Valette (version agrandie en Annexe 3-5).

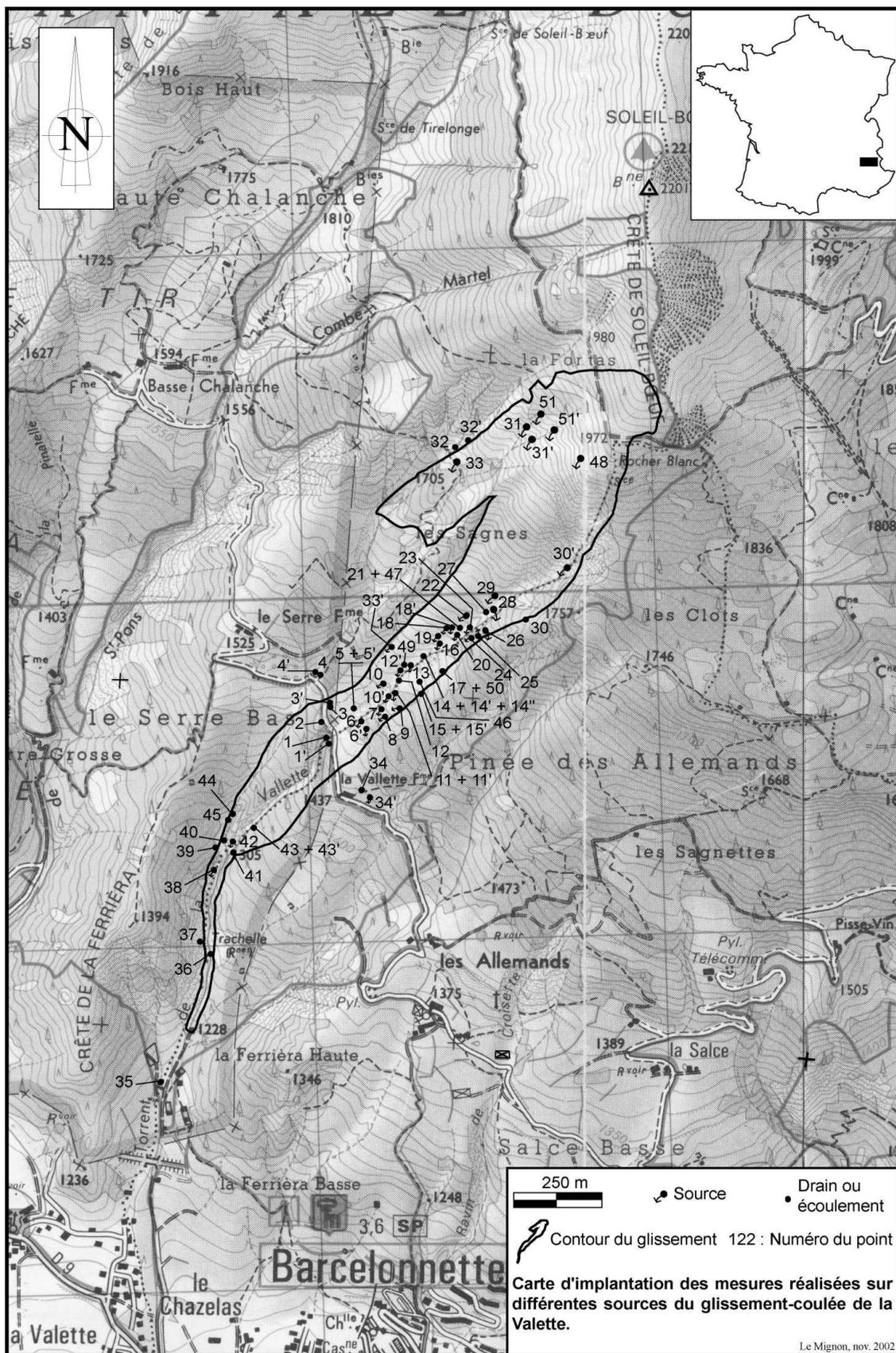


Figure 3-7. Carte de l'inventaire réalisé sur le glissement-coulée de la Valette (version agrandie en Annexe 3-6).

A l'échelle du versant, les principales sources se situent au niveau du contact anormal, ou bien dans les flyschs de l'Autapie. Les différentes campagnes ont permis de répertorier un maximum de 61 sources sur le versant et de 45 sources dans la zone du glissement. Cet inventaire a été réalisé à plusieurs reprises et à différentes époques dans le but de couvrir le cycle hydrogéologique : une mission réalisée en août 2000 (avec l'Université de Chambéry, Dupont et Taluy 2000), deux autres en 2001 (une en mai, et une en octobre en collaboration avec l'Université de Paris 6, U.M.R. Sisyphe), et deux missions en 2002 (mai et octobre en collaboration avec l'U.M.R. Sisyphe).

3.3.1.3. Liens entre présence des sources, lithologie et structure

La configuration géologique du versant de la Valette est relativement complexe dans le détail et présente une singularité au niveau du comportement hydrogéologique. En effet, les flyschs de la nappe de l'Autapie et le calcaire du Pelat jouent le rôle d'aquifère, alors que les Terres Noires (marnes callovo-oxfordiennes) constituent un mur imperméable. Cependant quelques sources sont présentes dans les Terres Noires.

Les mesures de conductivité présentent aussi un contraste en fonction de leur position géographique (cf. Figure 3-8 et Annexe 3-11 à Annexe 3-15) et leur position structurale.

Ainsi, les fortes conductivités sont observables au niveau du chevauchement entre la nappe de l'Autapie et les Terres Noires. Ceci peut s'expliquer par le fait que ce contact anormal est jalonné de lentilles de formations triasiques et notamment du gypse (cf. Figure 2-14). De plus, au niveau du contact anormal, le massif est fortement fracturé et joue donc le rôle de drain pour l'aquifère des flyschs de l'Autapie. En revanche, les faibles conductivités, à quelques rares exceptions, sont plutôt relevées dans les Terres Noires ou dans les flysch (au-dessus de la zone de chevauchement). Il pourrait s'agir d'eau de pluies infiltrées en amont et circulant en écoulement hypodermique, dans la tranche altérée du substratum et les formations de pente ou les moraines, réapparaissant à la faveur de contrastes locaux de perméabilité.

Ces données ont été complétées et confirmées par les analyses chimiques réalisées sur les échantillons prélevés sur certains exutoires.

3.3.1.4. Type de configuration hydrogéologique

Ces premiers éléments d'analyse conduisent à envisager une configuration hydrogéologique en deux grandes parties.

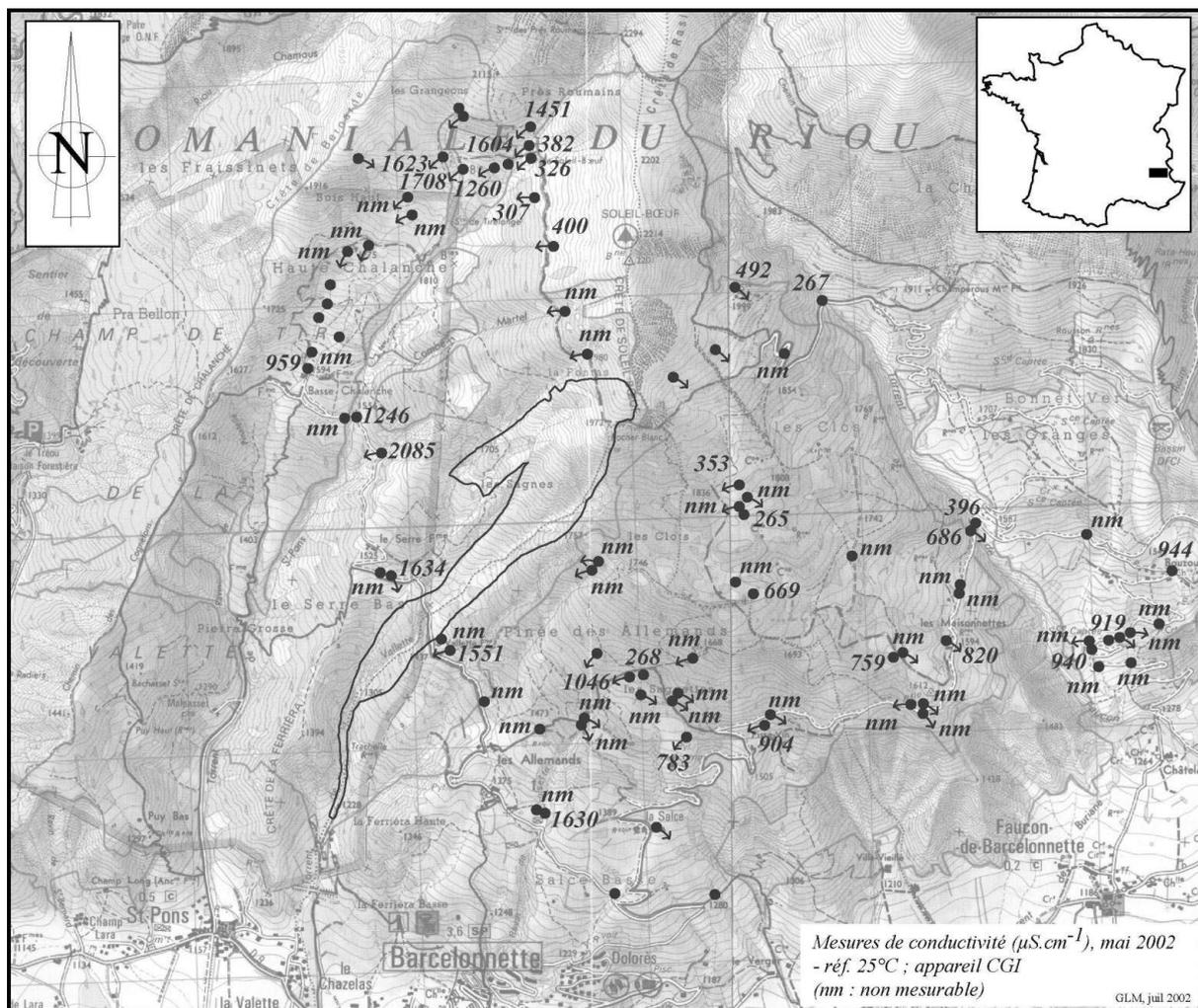


Figure 3-8. Carte des conductivités des sources, mesurées en mai 2002 (version agrandie et séries complètes de mesures en Annexe 3).

D'une part, un aquifère d'extension régionale dans les flyschs de l'Autapie et du Parpaillon, avec une limite inférieure constituée par les Terres Noires, donne des sources de déversement au niveau du chevauchement. Ces sources ont des minéralisations tellement élevées qu'elles sont impropres à la consommation, malgré des débits parfois intéressants.

D'autre part, des écoulements plus superficiels, de caractère hypodermique, se réalisent, alimentés par des eaux d'infiltration d'origine météorique et localement par des sources de déversement de l'aquifère des flyschs.

Cette configuration représentée en Figure 3-9 est relativement simplifiée, et peut être améliorée par les analyses des caractéristiques chimiques des eaux. Notons qu'il existe de nombreux systèmes d'irrigation, pas toujours bien entretenus, pouvant alimenter des points plus en aval. En outre, le versant présente des zones de sagnes à l'origine de mouvements de solifluxion.

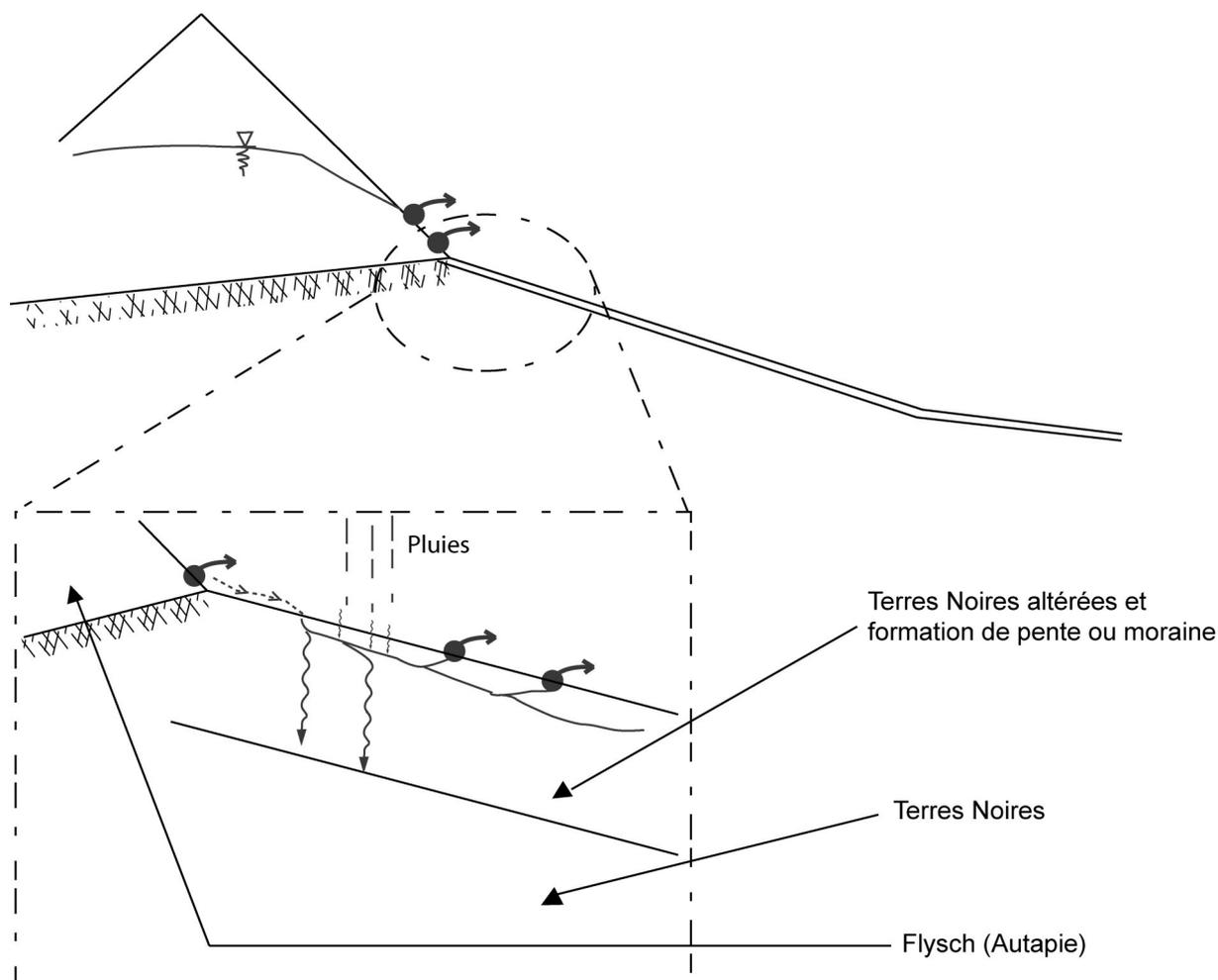


Figure 3-9. Schéma de principe de la configuration hydrogéologique du versant.

3.3.2. Relation eau – déplacements du glissement-coulée

Le glissement-coulée de la Valette mobilise des volumes de matériaux considérables (environ 10 millions de m³), et menace des habitations et des infrastructures. Ceci a conduit le service R.T.M. de Digne-Barcelonnette à équiper le site de dispositifs de surveillance des déplacements et d'un pluviomètre.

Les données proviennent essentiellement :

- du suivi des déplacements effectué au travers du profil repère par surveillance topographique (voir implantation en Figure 2-20) ;
- de la pluviométrie obtenue à partir des données de Météo-France (station de Barcelonnette, Le Verger à 1140 m), et depuis janvier 1999, à partir des données d'un pluviomètre automatique installé par le service R.T.M. sur le site du glissement (ferme de la Valette à 1450 m, en rive gauche du glissement).

De plus, il a été installé depuis peu (octobre 2002) un limnigraphe sur le torrent de la Valette, avant sa confluence avec l'Ubaye. Cependant, ces dernières données ne sont encore que trop partielles pour pouvoir être exploitées, car elles ne couvrent pas encore un cycle hydrologique.

Néanmoins ces différentes mesures ont permis de surveiller l'évolution du glissement-coulée, et de qualifier la réponse des masses mobilisées par rapport aux précipitations (cf. Figure 3-10).

Il ressort de ces mesures qu'il existe bien une relation entre la pluviométrie et les déplacements superficiels. Cette relation est visible par une accélération des déplacements, avec un temps de réponse d'environ trois semaines. Ce temps de réponse n'est cependant connu qu'approximativement, du fait de la fréquence des mesures qui est d'environ 15 jours.

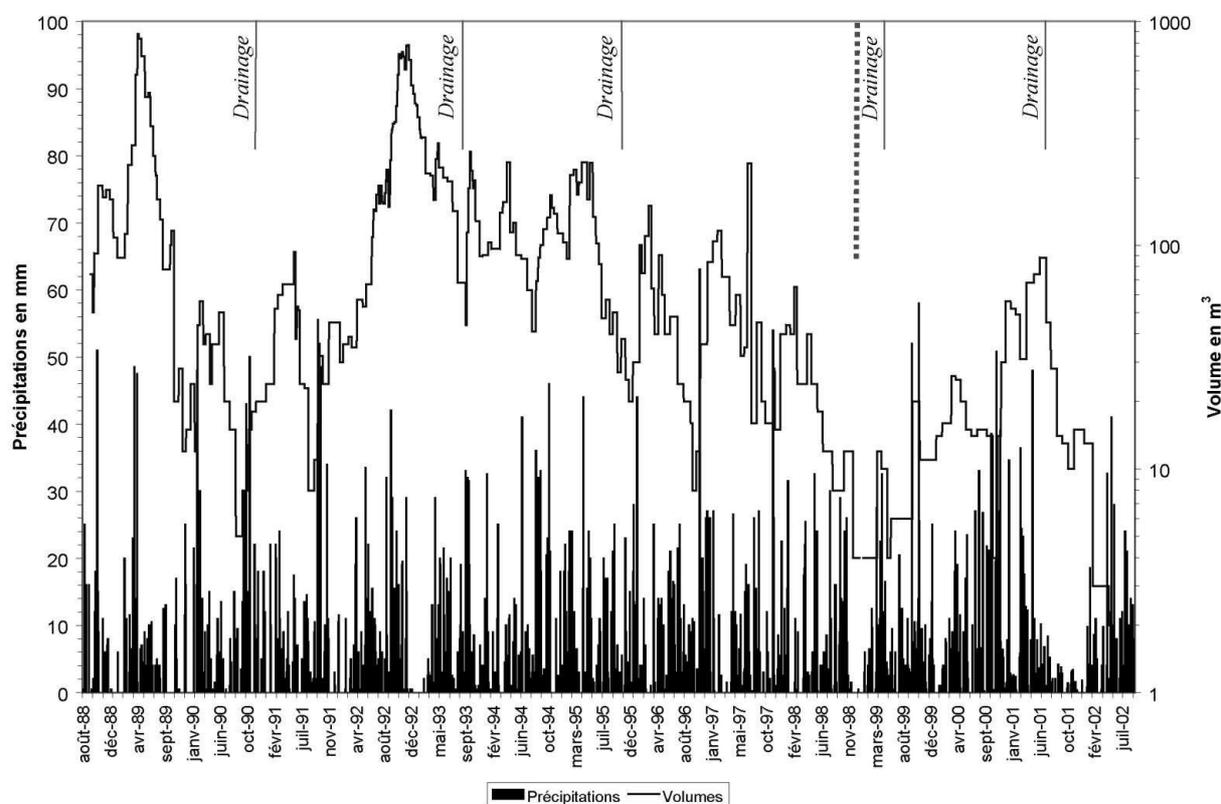


Figure 3-10. Pluviométrie journalière et volumes transitant, par période de 15 jours, au travers d'un profil repère. La pluviométrie est construite à partir des données Météo-France entre août 1988 et janvier 1999 (trait pointillé), et ensuite à partir du pluviomètre R.T.M. Les valeurs de volumes sont des données R.T.M. Les traits pleins indiquent les dates où le système de drainage superficiel a été repris.

En outre, il apparaît que les périodes de déplacement maximum se situent préférentiellement au printemps et à l'automne. Cette période du printemps correspond aux mois de déclenchement du glissement (1982) et de la coulée (1988), mais aussi au moment où l'infiltration, donc la saturation des terrains, est importante (cf. Figure 3-11 et Annexe 3-7).

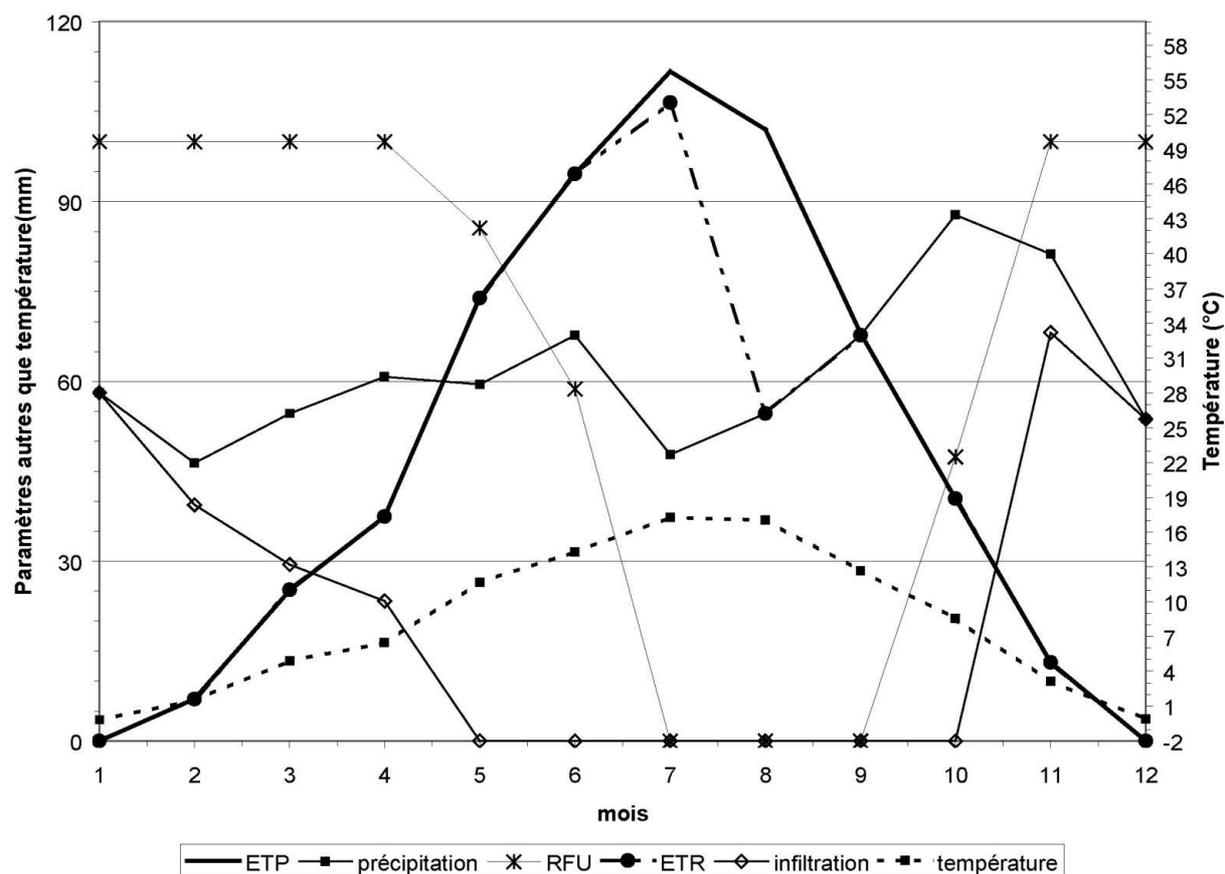


Figure 3-11. Données météorologiques et hydrologiques calculées par la formule de Thornthwaite (précipitations et températures de la station Météo-France du Verger, moyennes mensuelles respectivement sur les périodes suivantes : 1961 à 2000 et 1988 à 1999).

Cette configuration a été confirmée par des modèles de variations de nappes qui ont permis de mettre en évidence, dans la région de Barcelonnette, le rôle prépondérant de l'évapotranspiration dans le déclenchement des instabilités dans les Terres Noires (Van Asch et Buma, 1997).

Par ailleurs, à pluviométrie équivalente, il apparaît clairement que les travaux de drainage superficiel influent sur les déplacements : les opérations de mise en place du réseau de drainage en 1990 et de reprises, par la suite, sont marquées par des diminutions notables des déplacements (cf. Figure 3-12 et Figure 3-13).

Cependant, ces derniers ne disparaissent pas totalement, et augmentent à chaque fois qu'il y a des précipitations importantes. Il en est de même pour les résurgences sur le corps du glissement-coulée. Ceci montre bien le rôle néfaste de la pluie sur l'activité du glissement-coulée, et l'efficacité des systèmes de drainage superficiel.

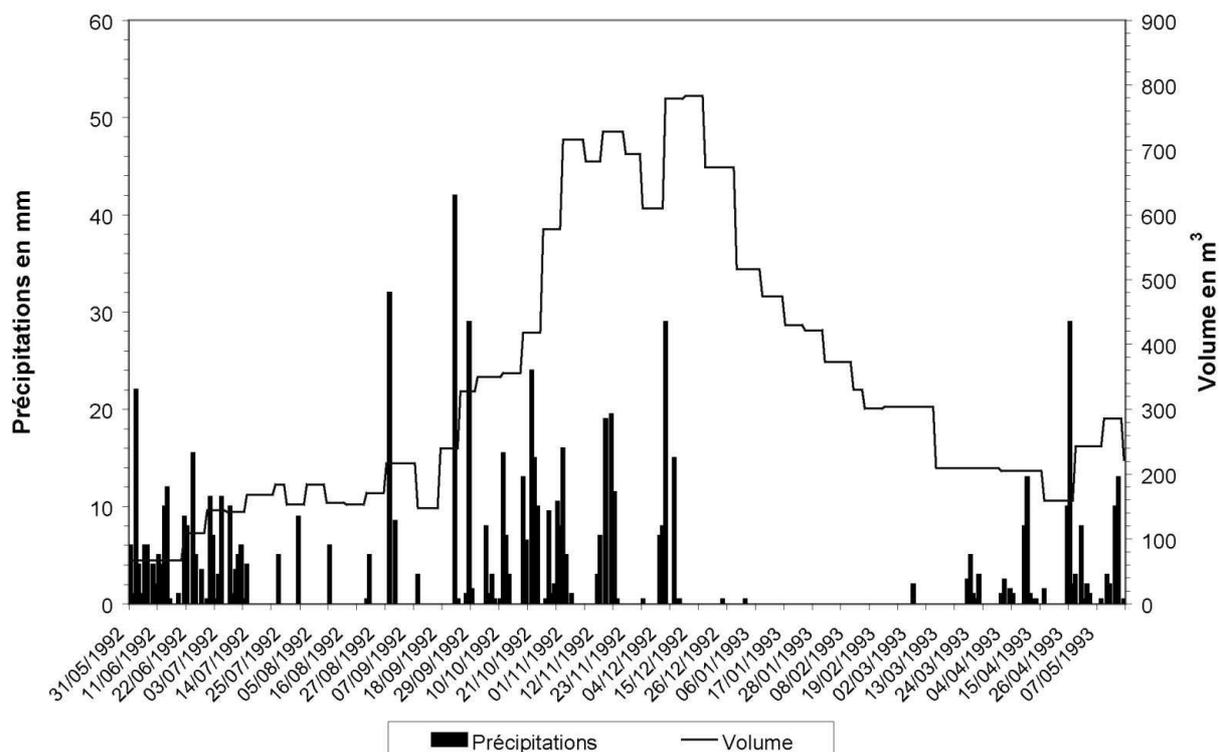


Figure 3-12. Graphe présentant les déplacements avant reprise du réseau de drainage.

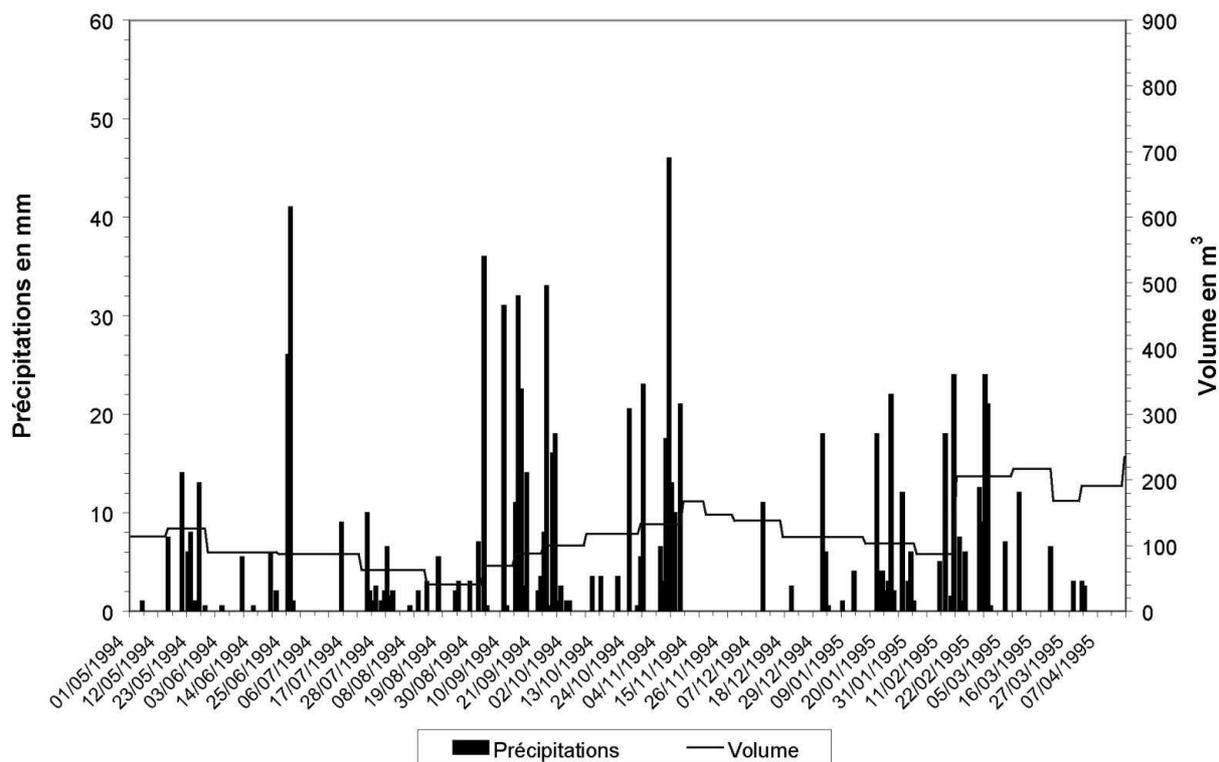


Figure 3-13. Graphe présentant les déplacements après reprise du réseau de drainage (opération effectuée courant été 1993). Par rapport à la situation précédente (cf. Figure 3-12) les déplacements sont réduits, avec une pluviométrie comparable.

Le fait que certaines sources persistent, et que les déplacements soient toujours sensibles, suppose que l'alimentation en eau du glissement-coulée s'effectue aussi de manière profonde par déversement de la nappe contenue dans les flyschs.

Cette hypothèse est confirmée par les mesures de conductivité des sources qui révèlent des valeurs nettement plus élevées (cf. cartes présentées en Annexe 4) sur le glissement-coulée que sur le reste du versant (à quelques exceptions près).

Or, les valeurs élevées de conductivités résultent d'une importante minéralisation des eaux. Par conséquent, ces sources sont alimentées par des eaux ayant transité dans des terrains en profondeur où les carbonates et les sulfates sont abondants. Les valeurs élevées de certaines conductivités (au-delà de $600 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) témoignent de la présence de sulfate en abondance.

3.3.3. Mesures de terrain et dosages en laboratoire : résultats des analyses

Afin de caractériser plus finement le phénomène de minéralisation des sources, des échantillons ont été prélevés et analysés en laboratoire (soit le soir même, soit après la mission de terrain au Laboratoire de Géologie Appliquée – U.M.R. Sisyphe).

Les analyses ont été orientées autour de deux grandes catégories, à savoir les anions et les cations. Un dosage chimique du titre alcalimétrique total est de plus réalisé.

3.3.3.1. Les anions

Les sulfates ont été les seuls anions dosés dans le cadre de ce travail. Le dosage a été réalisé, peu de temps après le prélèvement, sur des échantillons filtrés ($0,45 \mu\text{m}$) mais non acidifiés. Ce dosage a été effectué par analyse photométrique à l'aide d'un appareil de type Palintest (appareil du Laboratoire de Géologie Appliquée, UMR Sisyphe).

Sur l'ensemble de la fenêtre de Barcelonnette, les seules sources, en nombre relativement important, se situent au niveau des zones de chevauchement des nappes. Or, ces zones renferment de grandes quantités de gypse et de cargneules du Trias. De plus, l'eau provient principalement de la nappe des flyschs. Par conséquent, la concentration des sulfates est fortement conditionnée par le trajet de l'eau dans le massif et la dissolution des lentilles triasiques basales, au niveau du chevauchement (cf. Équation 3-1).



Des documents consultés en mairie de Barcelonnette, ainsi que le témoignage d'habitants de l'Adroit de Barcelonnette, ont permis d'établir que l'exploitation de l'aquifère contenu dans les flyschs de l'Autapie a été envisagée, mais abandonnée en raison de la trop forte teneur en sulfates.

Les résultats des concentrations en sulfates sont présentés en Annexe 3. Les mesures devront être, pour plus de précision, étalonnées à l'avenir par des dosages en laboratoire par chromatographie.

Les dosages alcalimétriques ont été réalisés dans les mêmes conditions et avec les mêmes méthodes, à savoir par l'analyse d'échantillons d'eau prélevés quelques heures auparavant.

Ce dosage permet de connaître la concentration de l'anion HCO_3^- présent dans chaque échantillon, et donc la teneur total en carbonates. Il a consisté à mesurer le pH pour chaque volume d'acide sulfurique (de normalité 1,6N) ajouté. Le saut de pH nous donnant alors la concentration en ions HCO_3^- .

Les concentrations élevées en ions HCO_3^- , indicateur de la présence de plusieurs types de carbonates, qui résultent de ces dosages, semblent aussi indiquer que les eaux proviennent de la zone du chevauchement. En effet, ceci est à mettre en relation avec le fait que ces eaux drainent des faciès différents (flysch, gypse, calcaire planctonique, ...), et peuvent donc se charger en différents carbonates. Ces dosages permettent donc de différencier les eaux provenant du chevauchement et des flyschs, des eaux plus superficielles. Par ailleurs, tous les torrents présentent des concentrations élevées en raison de leurs parcours qui recoupent l'ensemble des formations carbonatées de la zone d'étude. Ces eaux peuvent être considérées comme relativement évoluées, c'est à dire en "équilibre" avec l'aquifère.

3.3.3.2. Les cations

Les cations ont tous été dosés sur des échantillons d'eau filtrée (0,45 μm) et acidifiée (HNO_3 suprapur). Le dosage a été établi grâce à des mesures par spectroscopie à la flamme au Laboratoire de Géologie Appliquée (U.M.R. Sisyphe). Il concernait les éléments suivants : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , et Fe^{2+} .

Les analyses ont révélé que sur l'ensemble des échantillons d'eau de la zone d'étude, la concentration en Fe^{2+} est quasiment nulle. En outre, les concentrations en ions potassium (K^+) ont montré de fortes différences pour une même source entre deux missions.

Il est à noter que suite à un incendie de forêt, des produits chimiques retardants ont été répandus sur le site. Cependant, ces produits ne sont a priori pas de nature à modifier les mesures que nous avons réalisées. Par ailleurs, il est difficile de retenir d'autres hypothèses liées à l'activité anthropique (amendement des sols, apports liés au pacage) pour expliquer ces variations.

Les concentrations relevées sur chaque point échantillonné figurent en Annexe 3 sur une série de cartes.

3.3.4. Analyse des conditions d'infiltration et d'écoulement des eaux dans le versant par le suivi chimique des sources

3.3.4.1. Influence de la pluviométrie sur les sources

Les précipitations ont une influence plus ou moins directe sur les sources, et donc sur les zones en glissement.

Les mesures de débit sont les plus simples à réaliser pour déterminer les relations entre la pluviométrie et les sources. Il faut cependant considérer la difficulté d'évaluation de certains débits lorsque les sources présentent un exutoire relativement diffus. Ainsi, d'une manière générale, les sources (ou résurgences) situées dans les Terres Noires et les formations de pente et moraines sont très dépendantes des eaux de pluies infiltrées. En revanche, les sources situées dans les flyschs et aux abords du chevauchement ont un caractère plus pérenne, leur débit étant peu influencé par la pluviométrie des jours précédant les mesures.

Les valeurs de température n'ont pas permis de distinguer différentes catégories de sources sur le corps des glissements. En raison de la teinte foncée des marnes, celles-ci accumulent rapidement de la chaleur, et la température mesurée s'approche alors très rapidement de celle de l'air. Cependant, nous pouvons en déduire que les sources mesurées sur le corps du glissement ne correspondent pas à des résurgences d'origine profonde. De telles résurgences peuvent exister, mais ces eaux doivent avoir un parcours dans les formations glissées du versant, avant de donner lieu à des sources.

Les mesures de conductivité ont permis d'établir des relations entre la pluviométrie et les conductivités des sources du versant (cf. Figure 3-14 et Figure 3-15).

Nous pouvons remarquer que les sources proches du chevauchement présentent des conductivités relativement élevées par rapport aux eaux de l'Ubaye et aux eaux de pluie. Par ailleurs, les sources situées plus en altitude dans le versant, c'est à dire dans les flyschs de l'Autapie, présentent des conductivités beaucoup plus sensibles aux pluies, mais avec des valeurs élevées.

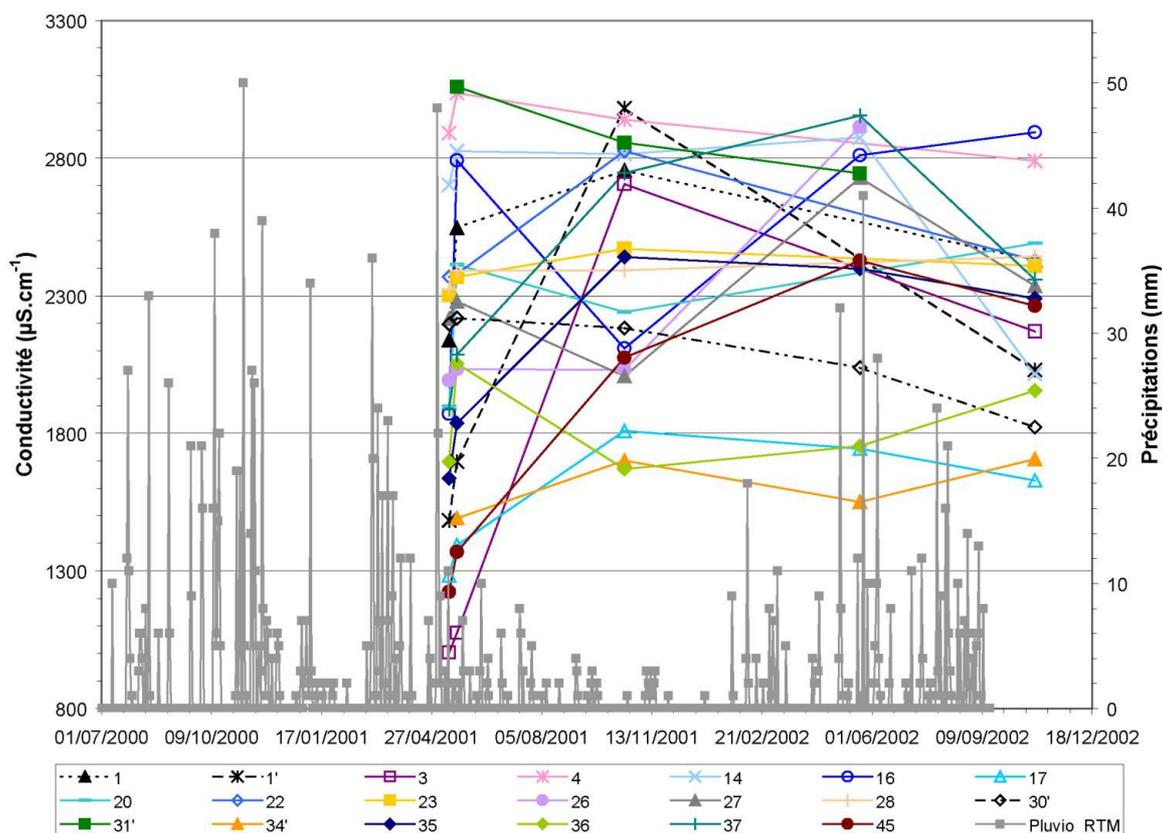


Figure 3-14. Conductivité des sources du glissement et pluviométrie sur le glissement (les numéros correspondant aux sources sont en Figure 3-7 et Annexe 3-6).

Nota : dans cette figure, comme dans la Figure 3-15, les points de mesures sont reliés par des segments pour améliorer la lisibilité. Cette représentation ne préjuge pas de l'évolution réelle des conductivités entre ces points de mesure.

Ceci pourrait résulter de trois facteurs, en accord avec la géologie du versant :

- les flyschs, formation qui drainent des eaux semi-profondes et minéralisées, peuvent être relativement sensibles aux longues périodes humides en raison de la forte fracturation de cette formation ;
- la zone de chevauchement représente un niveau de drainage profond. Avec des eaux fortement minéralisées, elle est peu influencée par les eaux de surface ;
- les terrains glissés des Terres Noires, altérites et moraines associées, sont très sensibles aux périodes humides quelque soit leur durée. Les sources présentes résultent principalement d'écoulements hypodermiques.

Le rôle de la pluie apparaît donc important, et par voie de conséquence la maîtrise du ruissellement sur l'ensemble du versant est donc un facteur prépondérant dans la stabilité des pentes.

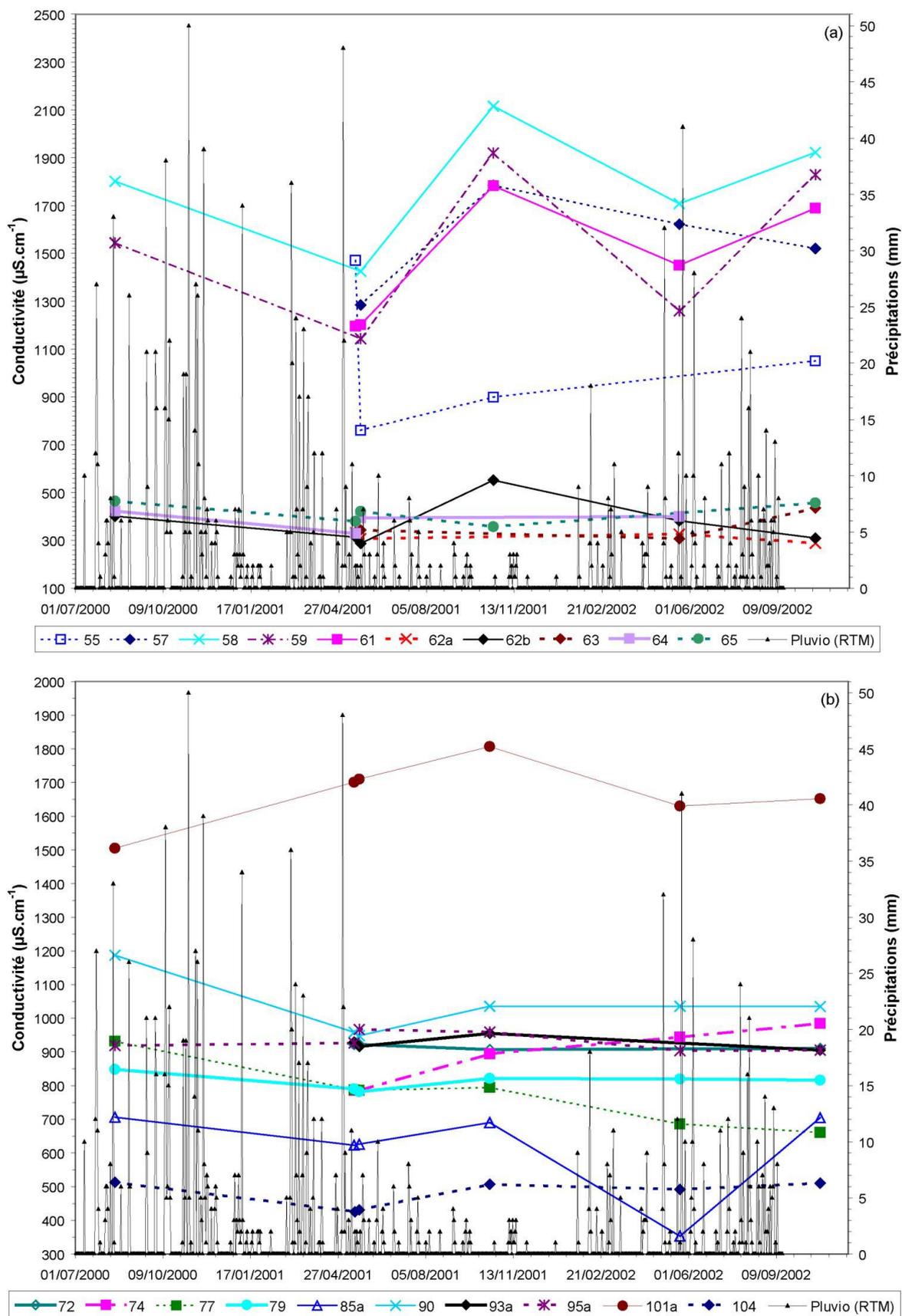


Figure 3-15. Conductivité des sources du versant autour du glissement-coulée en fonction de la pluviométrie : (a) côté ouest ; (b) : côté est. (numéro des sources en Figure 3-6 et Annexe 3-5).

3.3.4.2. Relation entre la position structurale des sources et leurs évolutions chimiques

Comme nous avons pu le constater dans le paragraphe précédent, la conductivité et la concentration de certains anions et cations varient en fonction du contexte géologique et structural des sources.

Le marqueur le plus évident de la proximité du chevauchement avec les sources observées est la concentration en sulfates (SO_4^{2-}). En effet, les concentrations mesurées (cf. cartes en Annexe 3) sont beaucoup plus élevées pour les sources proches du chevauchement. Cette différence, d'environ un facteur dix, est constante quelque soit la période de mesure. Certains points relativement éloignés du chevauchement apparaissent aussi avec les mêmes caractéristiques, mais ils sont tous situés dans des zones en glissement, ou ayant glissé.

D'autres éléments semblent être des marqueurs du chevauchement, surtout le calcium (Ca^{2+}) qui peut provenir du massif, mais aussi des lentilles de gypse présentes au niveau du chevauchement (cf. Figure 3-16).

Cependant, les concentrations en Ca^{2+} des sources proches du chevauchement ne présentent pas nécessairement les valeurs les plus élevées de tout le versant. En revanche, ces sources présentent des concentrations en Mg^{2+} plus élevées que le reste du versant. En effet, les concentrations de Mg^{2+} augmentent fortement avec celles de SO_4^{2-} (cf. Figure 3-17).

Ceci est confirmé par leurs plus fortes valeurs de titre alcalimétrique complet (T_{AC}). Elles présentent donc des minéralisations en carbonates plus diverses que les autres points du versant (cf. Figure 3-18). Cependant la dominante calcique est clairement affichée : tous les rapports Ca/Mg sont supérieurs à 1.

Par ailleurs, les sources proches du chevauchement présentent des concentrations fortes en sodium (Na^+), au niveau du glissement-coulée essentiellement. On sait que la présence de sodium dans les argiles se traduit par une augmentation de l'indice de plasticité. On peut faire référence en particulier aux données présentées par Skempton, mais aussi Cornell (1951, in Lambe et Whitman 1979), concernant les sols artificiels mono-minéraux, montrant la forte dépendance de l'indice de plasticité avec la nature du complexe d'adsorption et la présence de Na^+ tout spécialement (cf. Tableau 3-1).

Ceci pourrait en partie expliquer le comportement particulier des matériaux mobilisés par le glissement-coulée. En effet, cet apport de sodium pourrait être absorbé par la phase argileuse des Terres Noires.

La position structurale des sources influence donc nettement leur minéralisation, avec une influence majeure du contact anormal entre les Terres Noires et la nappe de l'Autapie.

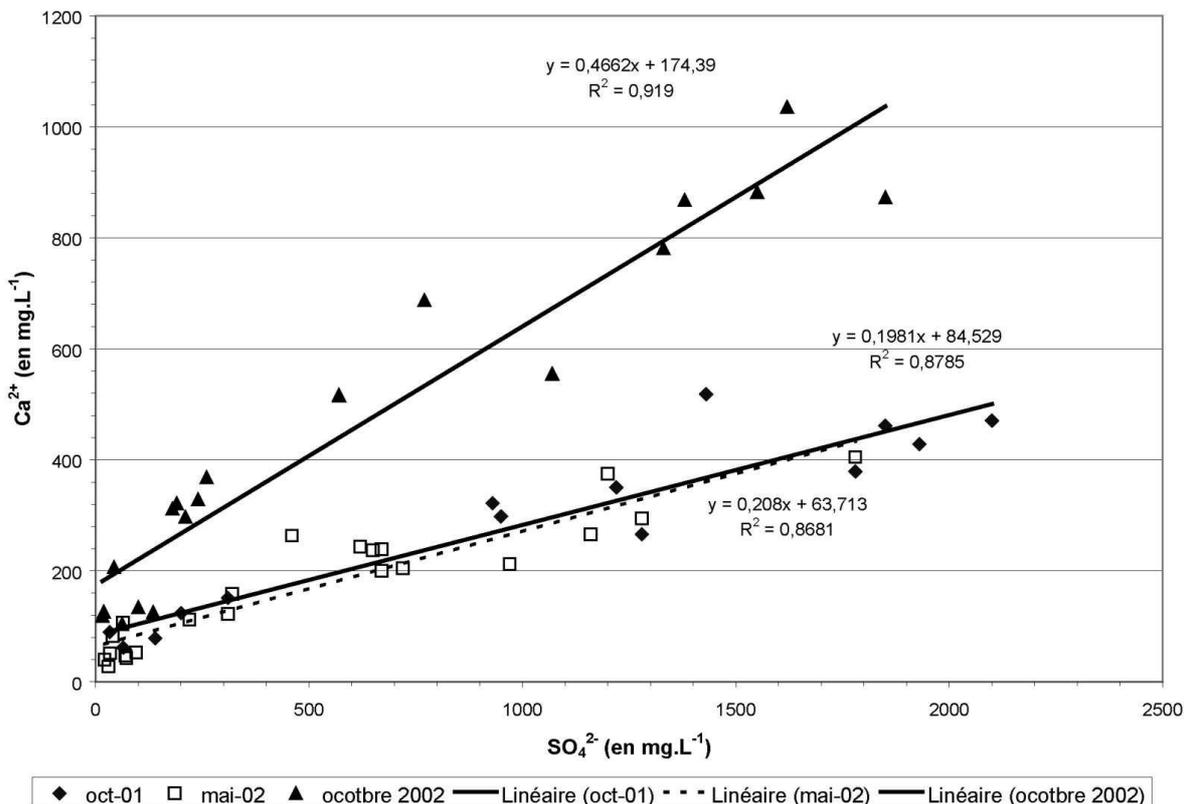


Figure 3-16. Concentration du calcium (Ca^{2+}) en fonction de la concentration de sulfates (SO_4^{2-}), sur l'ensemble du versant.

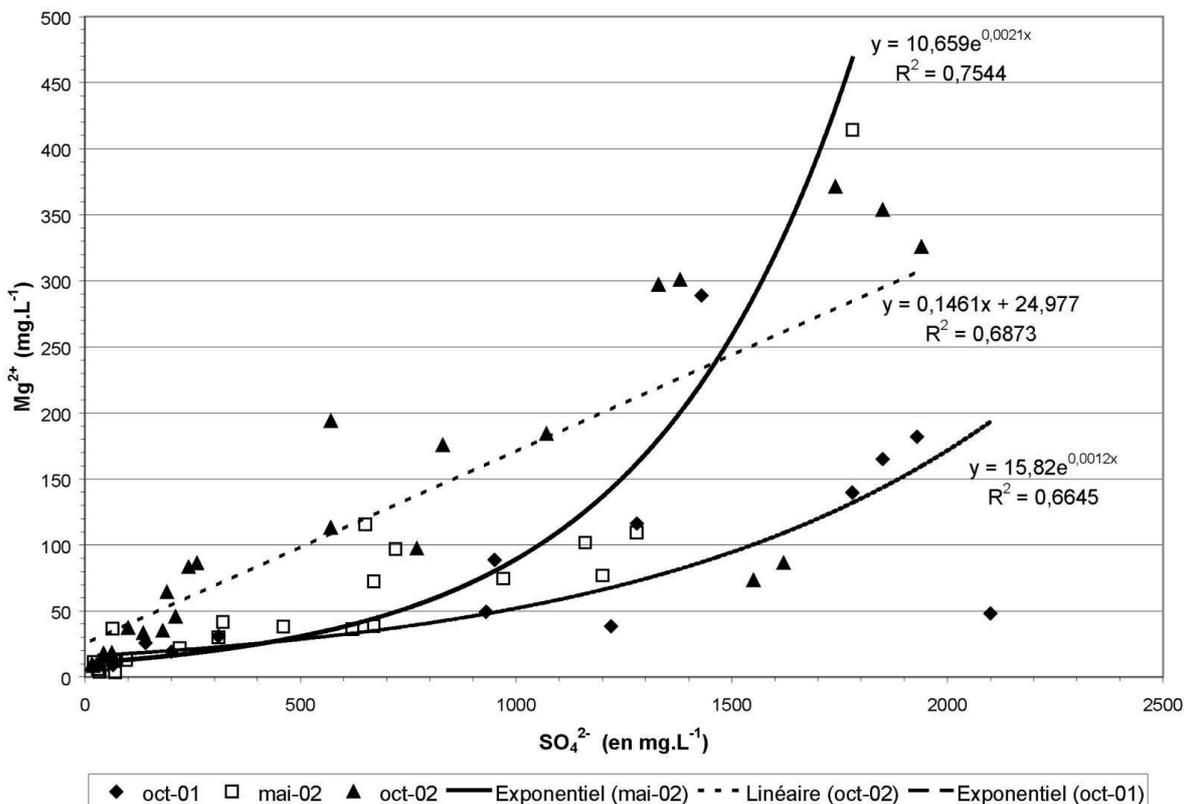


Figure 3-17. Concentration de Mg^{2+} en fonction de SO_4^{2-} (sur l'ensemble du versant).

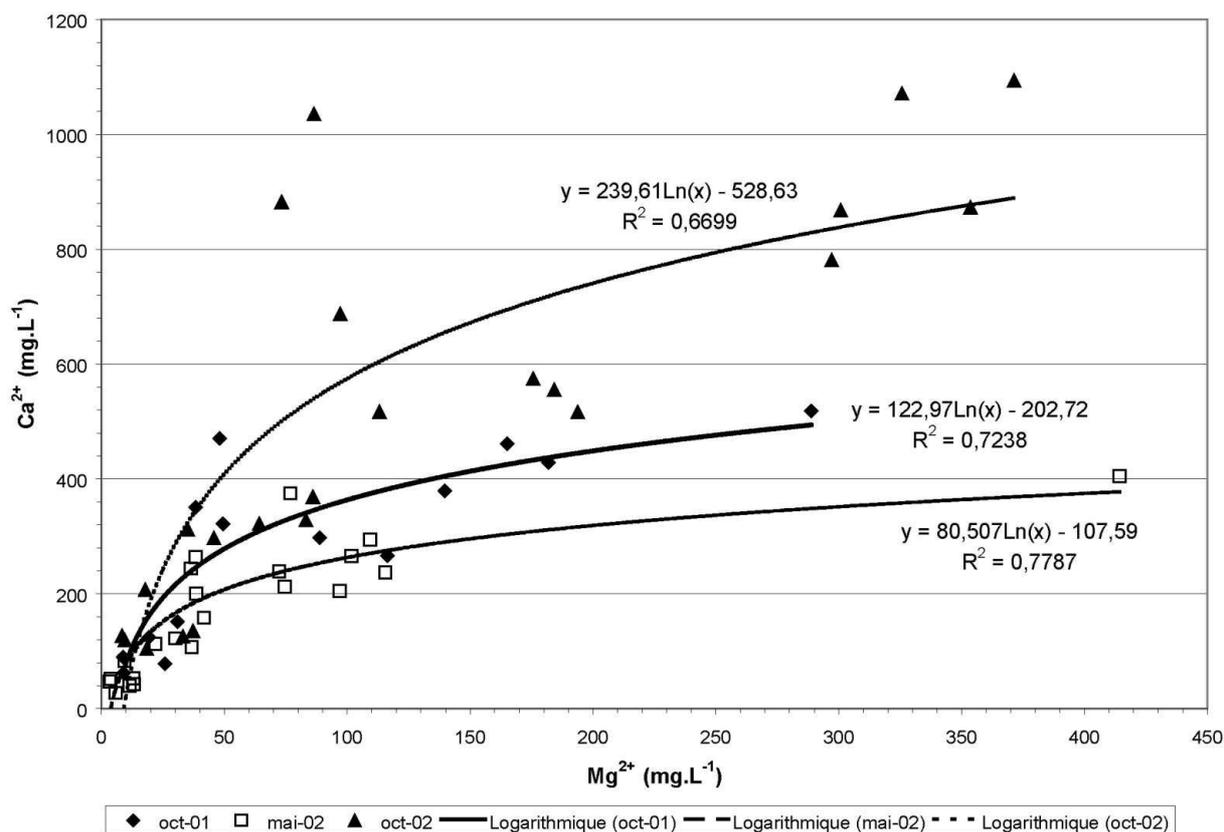


Figure 3-18. Concentration de Ca^{2+} en fonction de Mg^{2+} (sur l'ensemble du versant).

Minéral	Cation échangeable	Limite de liquidité (%)	Limite de plasticité (%)	Indice de plasticité (%)
Montmorillonite	Na	710	54	656
	K	660	98	562
	Ca	510	81	429
	Mg	410	60	350
	Fe	290	75	215
	Fe ^a	140	73	67
Illite	Na	120	53	67
	K	120	60	60
	Ca	100	45	55
	Mg	95	46	49
	Fe	110	49	61
	Fe ^a	79	46	33
Kaolinite	Na	53	32	21
	K	49	29	20
	Ca	38	27	11
	Mg	54	31	23
	Fe	59	37	22
	Fe ^a	56	35	21

^a après 5 cycles humidification et dessiccation

Tableau 3-1. Valeurs des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité pour différents minéraux argileux en fonction de leur cation échangeable (d'après Cornell 1951 in Lambe et Whitman 1979).

3.3.4.3. Les différents faciès de sources

Les différentes analyses ont permis de mettre en évidence plusieurs caractères ou "faciès" de sources particuliers, en rapport avec le contexte géologique et géomorphologique. Toutes les sources ont des pH à tendance basique avec, par endroits, présence de matière organique et de H₂S synonyme de milieu réducteur.

Il ressort quatre grands types de sources :

- les sources situées dans les Terres Noires ou des formations superficielles associées : altérites, moraines et formations de pente qui présentent des minéralisations faibles, assez proches de celles des eaux de pluie. Ceci résulte de courts parcours de l'eau dans le versant, à faible profondeur, dans un contexte d'écoulements hypodermiques de nappes de versant ;
- les sources situées près de la zone de chevauchement qui présentent de fortes minéralisations avec un caractère alcalin très marqué (cf. Figure 3-19) ;
- les sources moyennement minéralisées, présentes dans les flyschs, dont la minéralisation est sensible aux précipitations du fait de la fracturation importante qui affecte ces flyschs ;
- les sources très fortement minéralisées, plus minéralisées que les sources proches de la zone du chevauchement, avec des caractéristiques quasi constantes. Elles présentent des concentrations en SO₄²⁻ très élevées et proches du seuil de saturation du gypse, qui est de 1925 mg.L⁻¹ à 10°C (Hölting 1992, in Tullen 2002). Ces sources sont toutes situées dans des zones en mouvement (le glissement-coulée de la Valette) et au niveau de certaines zones du versant qui présentent des signes d'instabilités. La présence de sources fortement minéralisées et particulièrement riches en sulfates semble être un bon indicateur de zones instables dans la fenêtre de Barcelonnette.

L'analyse isotopique δO₁₈ permettrait de préciser les différents impluviums contribuant à l'alimentation des sources et d'améliorer la compréhension du modèle hydrogéologique.

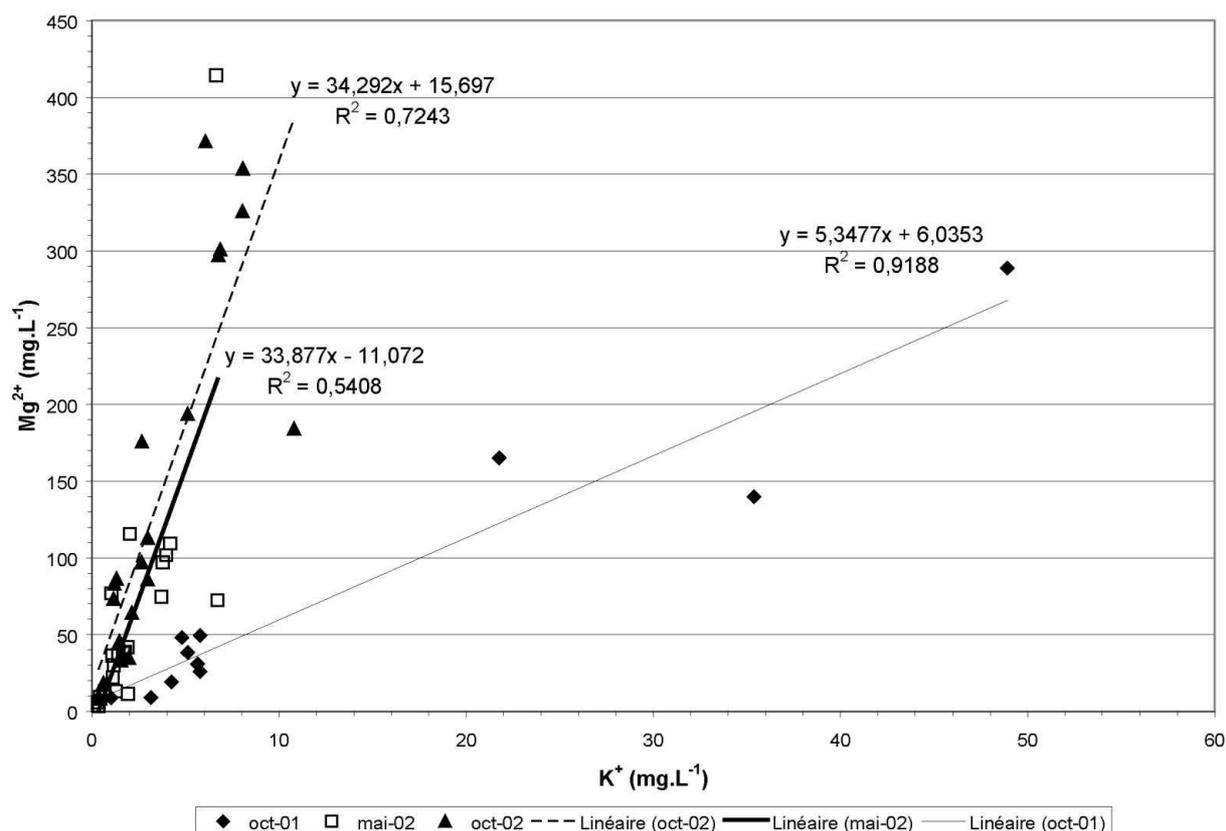


Figure 3-19. Concentration de Mg^{2+} en fonction de celle de K^+ (sur l'ensemble du versant)

3.4. Conclusions : Relation eau – zones en glissement

3.4.1. Caractère particulier des sources dans les zones instables (Poche, Valette, Chalanche et Soleil Bœuf)

Les différentes mesures de terrains et de laboratoire nous ont permis de mettre en évidence que les zones en glissement, telles que les glissements-coulées de Poche et de la Valette, présentent de fortes similitudes au niveau des sources présentes sur ces sites.

En outre, certaines zones, en dehors de ces deux glissements, présentent des caractéristiques comparables du point de vue hydrogéologique. Elles correspondent à des secteurs de versant où sont présents des signes d'instabilités superficielles plus ou moins actives ou des signes de paléo-glissement d'ampleur comparable à celui de Poche ou de la Valette. Ceci a été observé en particulier au niveau du cours supérieur du torrent de Saint-Pons, au lieu dit de Haute-Chalanche.

Toutes ces sources présentent des minéralisations très importantes et plus diversifiées que le reste du versant. Au niveau du glissement-coulée de la Valette, les concentrations ont une

particularité supplémentaire : une concentration légèrement plus importante en sodium (Na^+) que l'ensemble du versant, ce qui indique que ces eaux sont plus évoluées (Tullen, 2002).

Ce phénomène de forte minéralisation a été observé aussi au niveau de Barcelonnette, au-dessus et en tête du petit glissement qui menaçait le collège-lycée de la commune (des suintements étaient visibles en mai 2001 et présentaient des conductivités élevées, de l'ordre de 1200 à 1400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

3.4.2. Mise en évidence de la double "alimentation" des zones en glissement

Les différentes caractéristiques chimiques des sources sur l'ensemble des versants étudiés autour de Barcelonnette, nous ont permis de différencier l'eau présente dans les zones en glissement de l'eau analysée dans les sources hors glissement.

D'une façon générale, les minéralisations des zones en glissement sont plus importantes.

Les zones en glissement constituent des zones de forte perméabilité par rapport au substratum représenté par les Terres Noires. Elles sont constituées de matériaux très hétérogènes, hétérométriques, fracturés et altérés, facilitant ainsi le drainage des nappes du versant et l'infiltration des eaux de pluie.

Les matériaux mobilisés dans les glissements constituent donc des volumes drainants relativement efficaces pour les nappes contenues dans le versant.

En outre, la présence du contact anormal définissant les limites de la fenêtre de Barcelonnette semble aussi nettement influencer la qualité des eaux présentes sur les glissements. En effet, ce niveau de contact entre l'autochtone et les nappes de l'Embrunais-Ubaye, d'une puissance plurimétrique et aux limites floues, constitue un drain mettant en contact les eaux avec des roches très solubles comme le gypse.

Par ailleurs, les flyschs étant des formations présentant une grande perméabilité de fracture, le renouvellement des eaux au niveau du chevauchement est important et leur pouvoir de dissolution est entretenu. Cette perméabilité est renforcée par le fait que le glissement-coulée engendre une décompression et une fracturation du massif qui augmentent sa sensibilité par rapport à l'eau.

Cette configuration permet donc de mettre en évidence le fait qu'outre les eaux de ruissellement et d'infiltration directe des eaux de pluies, les apports d'eau en provenance de la nappe profonde sont significatifs (cf. Figure 3-20). De ce fait, le seul drainage superficiel, bien que très efficace pour limiter la recharge, ne permet pas de réduire complètement le rôle de l'eau sur les versants déstabilisés puisqu'il n'a aucune influence sur les pressions interstitielles au sein du massif.

Cependant, le drainage superficiel et les écoulements superficiels doivent être surveillés et canalisés, pour éviter les infiltrations ou les ré-infiltrations qui pourraient alimenter le glissement ou contribuer à son extension. En effet, il existe dans la région de nombreux

systèmes d'irrigation, en général anciens mais parfois actuels, qui présentent des pertes. Il faut donc ne pas négliger ces écoulements superficiels, et éventuellement capter certains exutoires.

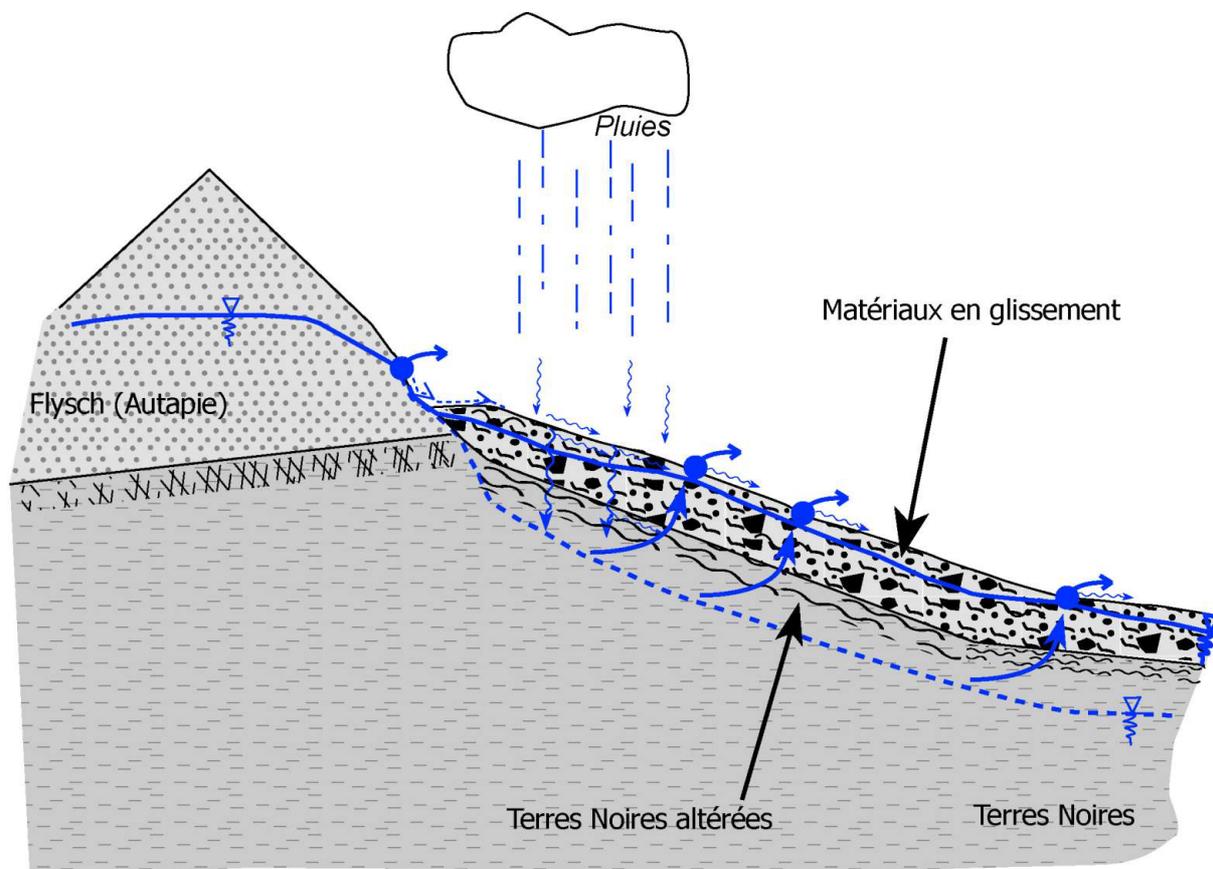


Figure 3-20. Coupe synthétique pour le glissement-coulée de la Valette (pour le cas du glissement-coulée de Poche, le chevauchement serait plus en amont de l'escarpement).

De plus, des études plus fines des caractères chimiques (en fréquence de mesures et en nombre d'éléments dosés) permettraient sûrement d'améliorer la connaissance des processus d'alimentations des glissements et des processus et altitudes d'infiltration des eaux de pluies.

3.4.3. Synthèse

Les zones en glissement requièrent une maîtrise des différentes voies d'apports d'eau, afin de limiter l'activité des matériaux déstabilisés. C'est pourquoi, une approche hydrogéologique du site, surtout lorsque l'ampleur du phénomène est importante, est particulièrement utile à la compréhension du fonctionnement du processus de déstabilisation du versant.

Les analyses de la chimie des eaux permettent d'établir de façon relativement rapide la part des eaux superficielles et des eaux profondes qui viennent alimenter les zones instables. Ces méthodes permettent donc de dresser des stratégies de drainage plus fines et plus efficaces.

L'analyse des eaux prélevées au niveau des sources présentes sur le glissement conduit à mettre en évidence des "aires contributives" qui dépassent largement le site instable. C'est pourquoi dans certaines configurations, les systèmes de drainage et la maîtrise de l'infiltration doivent déborder largement la zone déstabilisée.

Ceci a donc pour effet de compléter et d'affiner la connaissance du fonctionnement des sites en glissement, et éventuellement de déceler des modifications dans leurs comportements géomécaniques.

Dans la très grande majorité des cas, lorsque de grands volumes sont en jeu, les apports de l'analyse hydrogéologique et hydrochimique sont indispensables pour la compréhension des processus en jeu dans les déplacements des terrains. De plus, les investigations hydrochimiques ont permis d'établir le rôle significatif des nappes profondes dans la circulation des eaux au niveau du versant. Ceci doit conduire à ne pas négliger les drainages profonds lorsqu'ils sont réalisables, tant techniquement qu'économiquement, sans pour autant diminuer les systèmes de drainage superficiel qui permettent de limiter les infiltrations. En revanche, ces derniers doivent dépasser largement les limites strictes du glissement, surtout en amont. De plus, il faut impérativement contrôler de manière rigoureuse et périodique, les écoulements d'eau naturels ou artificiels préexistants.

Chapitre 4 : Les différents scénarios d'évolutions pour les glissements-coulées étudiés

La fenêtre tectonique de Barcelonnette donne un caractère géologique particulier à la vallée de l'Ubaye (cf. paragraphe 2.2). A la faveur de cette structure, les marnes du Callovo-oxfordien (ou Terres Noires) affleurent largement. Ces marnes sont très sensibles à l'érosion de par leur structure, et les instabilités de versants y sont nombreuses. D'une manière générale, lorsque le matériau est à l'affleurement sur des pentes fortes (20 à 45°), la pluie l'imprègne et le transforme en une pâte boueuse et ceci sur quelques centimètres d'épaisseur avant que le ruissellement ne l'évacue. En revanche, sur des pentes moins fortes, l'eau s'infiltre plus en profondeur et les conditions peuvent être réunies pour que se réalisent des phénomènes de solifluxion et de glissement-coulée. Ces différents comportements du matériau sont observables sur ce site à petite ou grande échelle.

Dans le cadre de ce travail, deux grands glissements-coulées ont été étudiés : le glissement-coulée de Poche et celui de la Valette.

4.1. Le glissement-coulée de Poche

Le glissement-coulée de Poche se situe entre la commune de Barcelonnette et celle de Jausiers, en rive gauche de l'Ubaye (cf. Annexe 3-4). Son contexte géologique est relativement simple puisqu'il se situe entièrement dans les Terres Noires (cf. Figure 4-1). Le cours supérieur du torrent de Poche se situe lui aussi quasiment entièrement dans ces marnes.

Le glissement-coulée s'étend entre la cote 1510 m (à la niche d'arrachement) et la cote 1230 m au front de la coulée, avec une pente moyenne d'environ 18°. Au niveau de sa niche d'arrachement, sa largeur mesure environ 170 m.

Sur le corps du glissement-coulée et sur sa bordure gauche, le torrent de Poche a recreusé son lit dans les matériaux mobilisés.

Les formations superficielles de la zone sont discontinues. Elles sont représentées par des altérites de Terres Noires, des moraines en place ou glissées et des formations de pente alimentées par ces deux unités. Ces formations de pente présentent de nombreuses plaquettes de calcite provenant des filons recoupant les marnes fortement tectonisées. Ces diverses formations sont mobilisées dans le glissement-coulée avec les marnes.

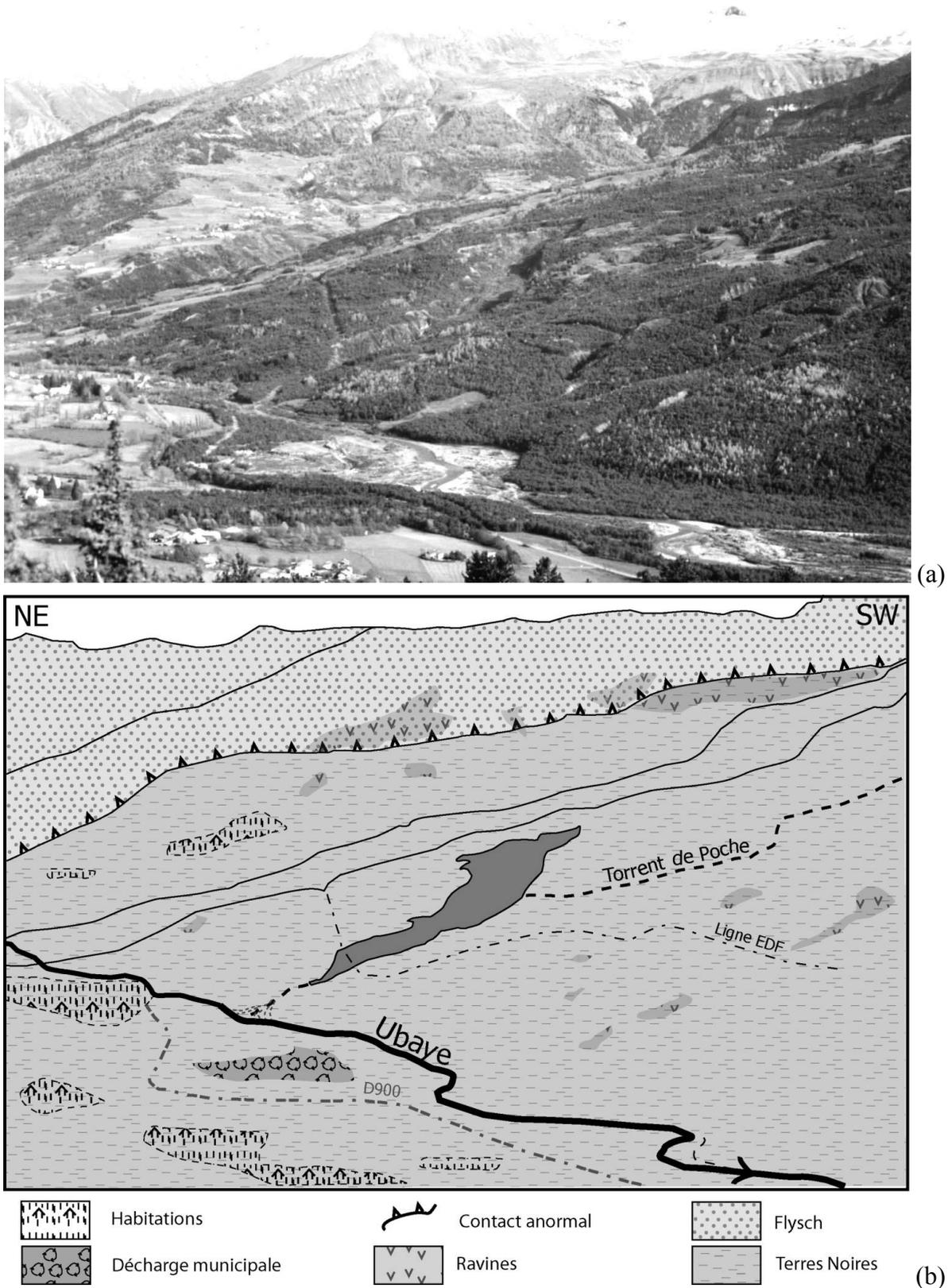


Figure 4-1. Vue générale et contexte du glissement-coulée de Poche (a : photographie prise depuis le versant rive droite en octobre 2002 ; b : contexte schématique).

Le volume total des matériaux mobilisés est estimé à environ 2 millions de mètres cubes (données O.N.F.-R.T.M. de Barcelonnette). Néanmoins, il ne représente pas une menace directe pour les personnes ou des infrastructures particulières. Même en cas de réactivation importante du glissement-coulée, la menace serait indirecte et liée au risque d'embâcle sur l'Ubaye.

De ce fait, sa surveillance est relativement modérée. Par exemple, les mesures de déplacements, réalisées par le service O.N.F.-R.T.M. de Barcelonnette, sont effectuées à une fréquence bi-annuelle.

4.1.1. Historique des instabilités sur le site du glissement

Cette région du torrent de Poche, partiellement occupée par un ancien terrain militaire racheté par l'O.N.F. à la fin du 19^{ème} siècle, est, d'après les archives des services R.T.M., connue pour ses multiples problèmes d'instabilité et son activité torrentielle.

Le site est en fait composé de deux thalwegs: le torrent de Poche et un petit affluent dont le nom est incertain. D'après certaines archives de la fin du 19^{ème} siècle, ce dernier aurait été surnommé "*Riou merdoux*" en rapport avec son activité torrentielle. Actuellement, ce petit torrent rejoint le torrent de Poche (proprement dit ; cf. Figure 4-2) à une altitude d'environ 1400 m, en rive droite. Soit en un point situé un peu au-dessous de la niche d'arrachement, sur la rive gauche du glissement.



Figure 4-2. Vue aérienne du torrent de Poche et du glissement-coulée (cliché J.-C. Hippolyte, mai 2001).

Dans le passé, le torrent de Poche et son affluent ont vu leurs cours inférieurs corrigés afin de limiter leur activité torrentielle qui perturbait l'écoulement de l'Ubaye.

La date exacte du déclenchement du glissement-coulée ne semble pas figurer dans les archives, mais cet événement doit dater du début du 20^{ème} siècle.

En ce qui concerne l'estimation de la vitesse d'évolution du glissement-coulée, certains documents laissent à penser que son évolution est relativement rapide sur la fin du 20^{ème} siècle. En effet, depuis le milieu des années 1970, le glissement a progressé et doublé sa surface (cf. Figure 4-3 et Figure 4-4).

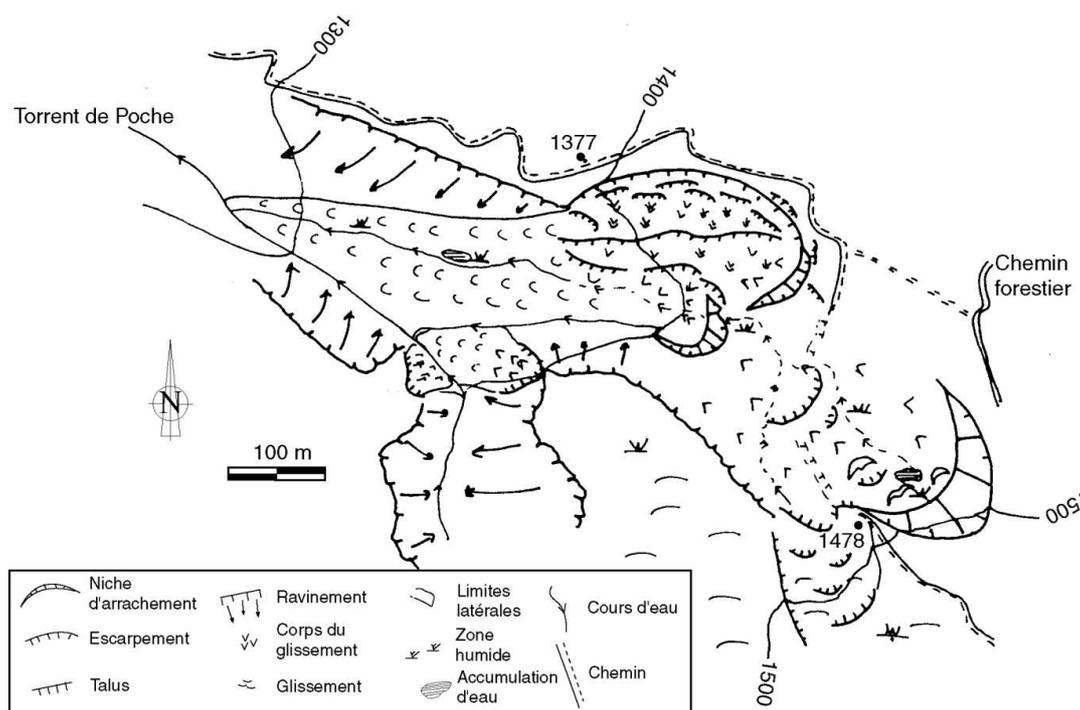


Figure 4-3. Glissement-coulée de Poche en 1977 (d'après A. Légier, 1977).

Par ailleurs, les habitants du hameau des Davids, hameau voisin en rive droite de l'Ubaye, ont vu le glissement-coulée emporter une partie de leurs pâturages, et l'Ubaye être parfois fortement perturbée par l'arrivée massive de matériaux dans son cours.

4.1.2. Description du glissement-coulée

Dans ce secteur, les marnes du Callovo-oxfordien présentent de nombreux plis et micro-plissements très marqués, qui confèrent au matériau une structure et un débit particuliers. Ces marnes sont également parcourues par de très nombreux filonnets de calcite témoignant de l'intense fracturation du massif au cours des différents épisodes tectoniques qui l'ont affectés.

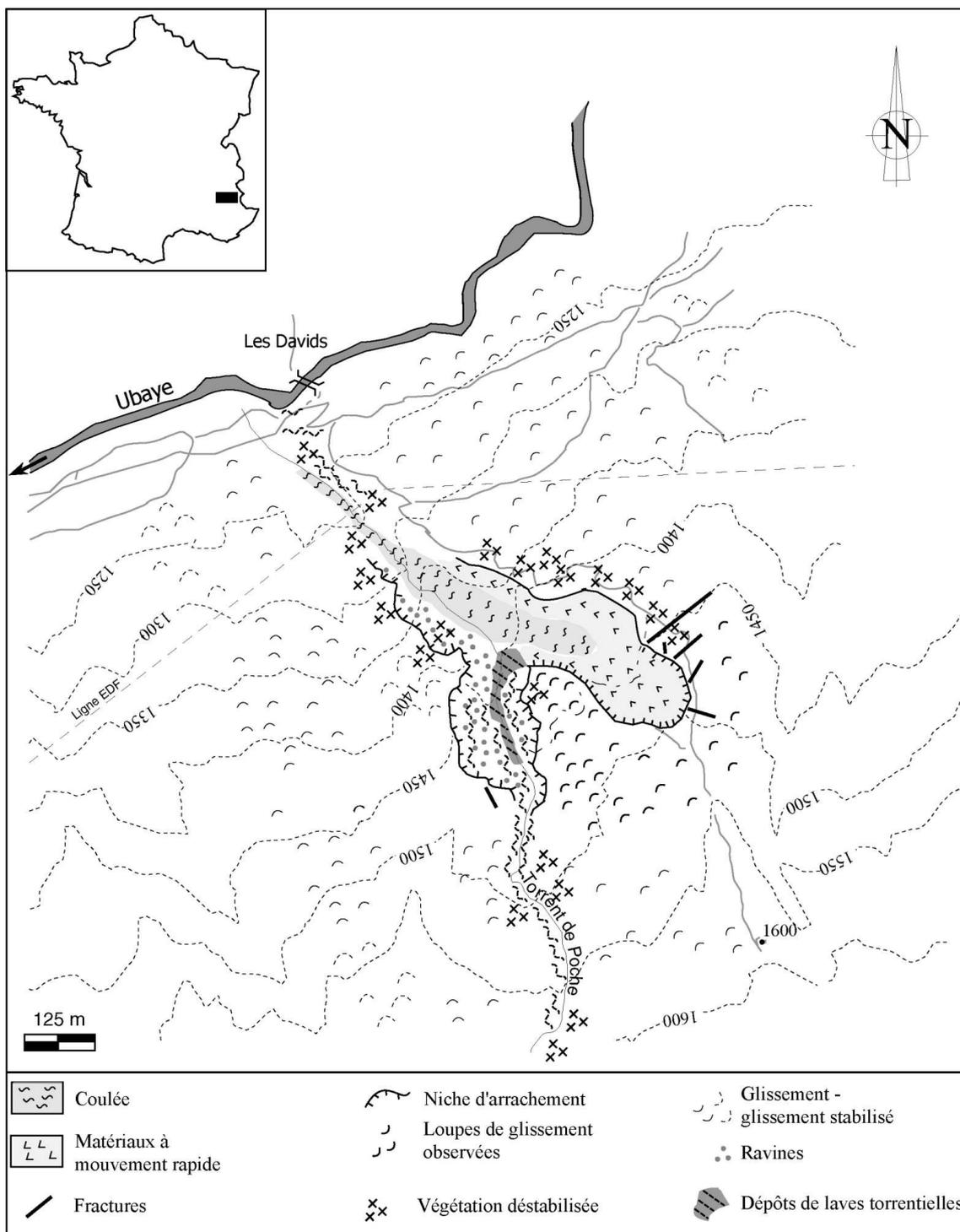


Figure 4-4. Carte (actuelle) du glissement-coulée de Poche et de son contexte.

Cette micro-tectonique très développée semble avoir joué un rôle dans l'initiation de la phase de glissement car au niveau de la niche d'arrachement, des blocs se détachent et glissent "banc sur banc" en tête, favorisant ainsi la progression du glissement.

L'escarpement principal du glissement, proprement dit, se situe donc en partie Est du bassin versant du torrent. Actuellement, la tête du glissement-coulée évolue de manière régressive dans les Terres Noires. Des petits paquets glissés se détachent, et se disloquent

progressivement en rejoignant le corps principal de la coulée. Des bords très abrupts limitent l'escarpement sommital.

Sur le corps du glissement, il apparaît de nombreuses fractures en traction (N 170°E) qui indiquent un mouvement allant d'amont vers l'aval. Au contact des terrains stables et des matériaux de coulée constituant le corps principal de la coulée, des surfaces de cisaillement sont très nettement visibles. Il s'agit en fait de véritables zones de cisaillement de quelques mètres de largeur au sein desquelles, le système des surfaces de cisaillement et des fentes de tension du modèle de Riedel sont clairement observables en surface de la coulée et en bordure de la masse glissée (cf. Figure 4-5, voir aussi Figure 1-9).

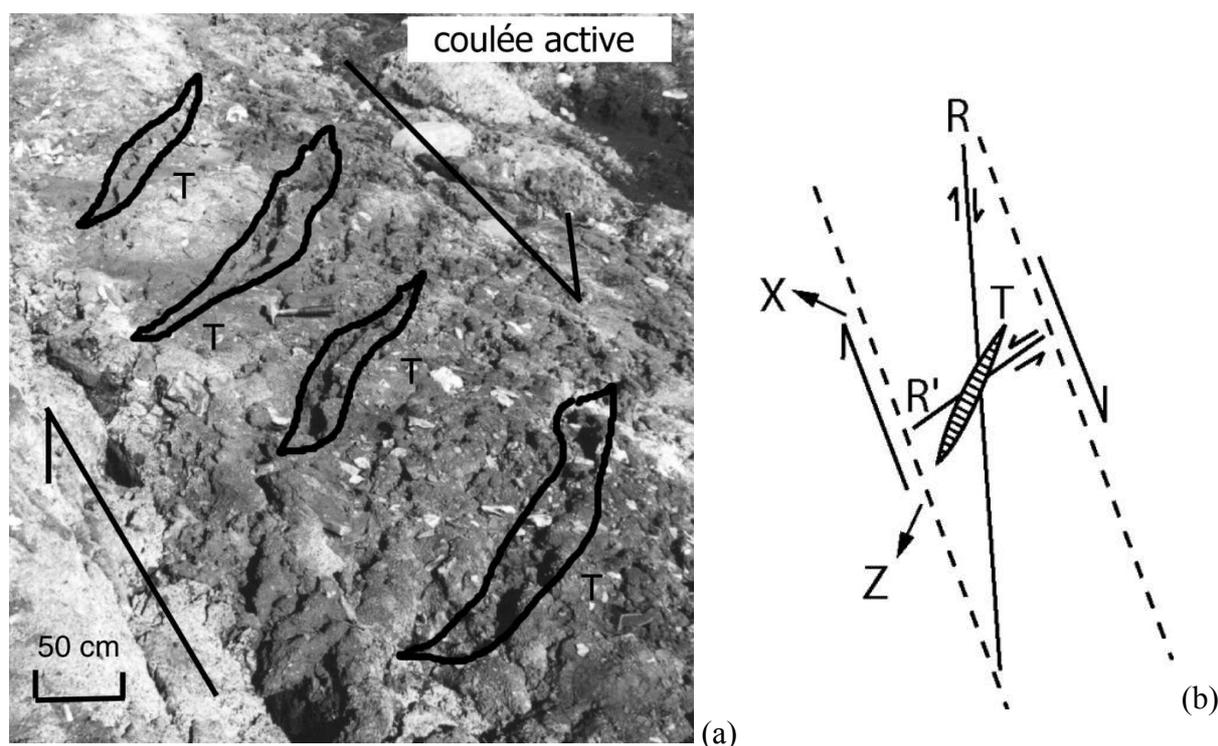


Figure 4-5. Fentes de traction sur le corps de la coulée active au contact du terrain en place (a) ; schéma de principe du modèle de Riedel (b).

En outre, des stries de glissement sont visibles sur les surfaces de cisaillement verticales qui limitent ces zones de cisaillement (cf. Figure 4-6). Ces surfaces verticales correspondent à des levées latérales de compression, bien visibles en certaines zones de bordure de la coulée.

Le corps interne (ou plus central) de la coulée ne présente pas de tels signes de progression puisque les coulées évoluent comme un corps mort ("plug"), avec une concentration des efforts de cisaillement en bordure.

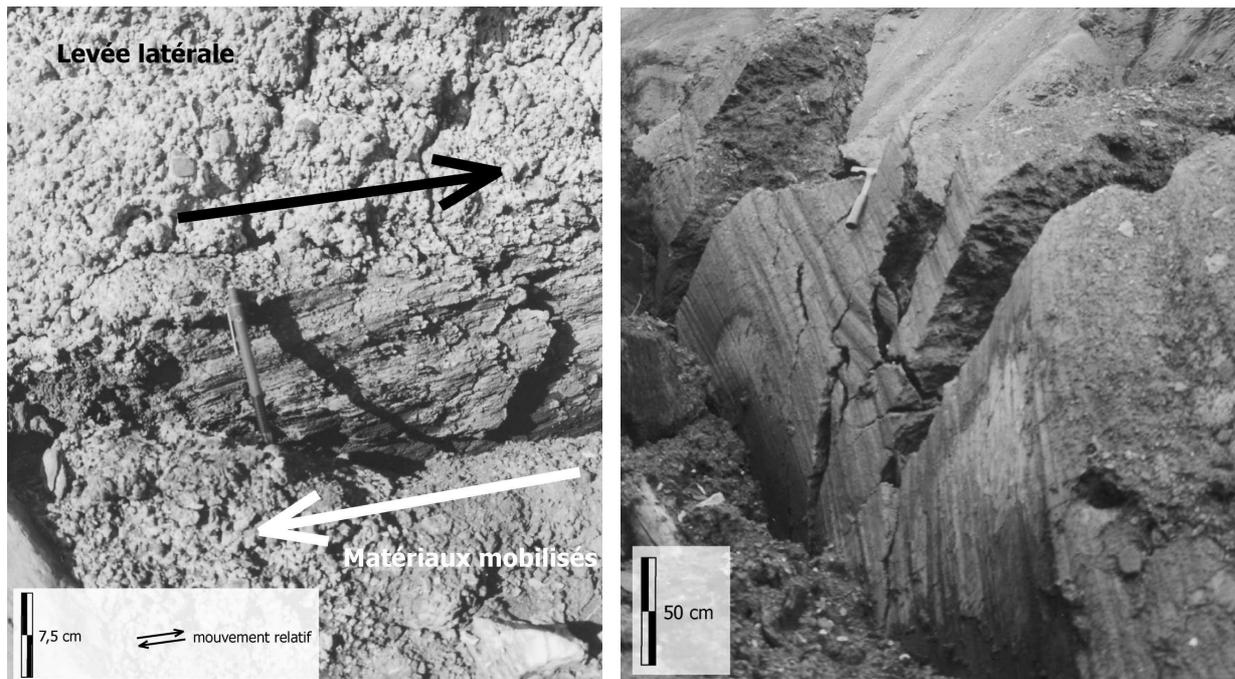


Figure 4-6. Exemples de stries sur une levée latérale du glissement-coulée de Poche.

Par ailleurs, le corps de la coulée principale présente plusieurs ressauts topographiques de Terres Noires, dans lesquels le torrent (de Poche) a creusé son lit. Ces ressauts topographiques correspondent à l'activité de la coulée et du glissement. Des petites coulées ont même réussi à gagner le cours de l'Ubaye.

De plus, des micro-recristallisations de gypse peuvent être observées en plusieurs endroits. En période sèche, des efflorescences de sulfates (cf. Chapitre 2) blanchissent la coulée et le glissement (cf. Figure 4-7).



Figure 4-7. Vue, depuis la niche d'arrachement, du corps de la coulée blanchi par les efflorescences (juillet 1999).

4.1.3. Indices de terrain sur les scénarios d'évolution du glissement

L'historique des instabilités du site permet de dire que l'évolution du site n'est pas achevée et qu'elle est même susceptible de s'accélérer.

Deux grandes voies d'évolution sont à envisager : la réactivation en coulée boueuse de la partie aval, et en glissement régressif pour la partie plus en amont.

4.1.3.1. Réactivation de la coulée de boue

La réactivation de la coulée de boue (cf. Figure 4-4) est une évolution fortement probable en cas d'apport massif d'eau (par la nappe et les précipitations), puisque ce phénomène s'est déjà produit, avec de faibles volumes. Le fait que le torrent de Poche creuse son lit dans les matériaux du glissement-coulée, et que sa position évolue en fonction du déplacement des matériaux et de la charge solide transportée, favorise d'autant plus cette évolution.

En effet, les produits du glissement et de la coulée, mélange de Terres Noires remaniées et de formations superficielles, présentent une texture très lâche, avec une forte aptitude à l'absorption d'eau.

En outre, les Terres Noires en place de ce secteur sont fortement plissées et fracturées (avec des recristallisations de calcite). De ce fait, elles peuvent contribuer très largement au processus de remobilisation et d'évolution régressive.

Lors d'un éventuel déclenchement d'une coulée boueuse, les enjeux directs sont nuls ou presque. En revanche, les enjeux indirects, comme le barrage ou la déviation du cours de l'Ubaye, pourraient avoir des conséquences relativement importantes, notamment sur le hameau des Davids et sur la décharge située en rive droite, dans le lit majeur de l'Ubaye (cf. Figure 4-8 et Figure 4-9).

De plus, un départ de coulée boueuse constituerait une "perte" de matériaux en aval de l'instabilité, ce qui reviendrait à supprimer une partie de la butée de pied du glissement. Ceci aurait alors pour effet d'accélérer les déplacements de la partie amont en glissement dont la progression serait facilitée. Cette progression pourrait ensuite "nourrir" une nouvelle fois le corps d'une prochaine coulée.

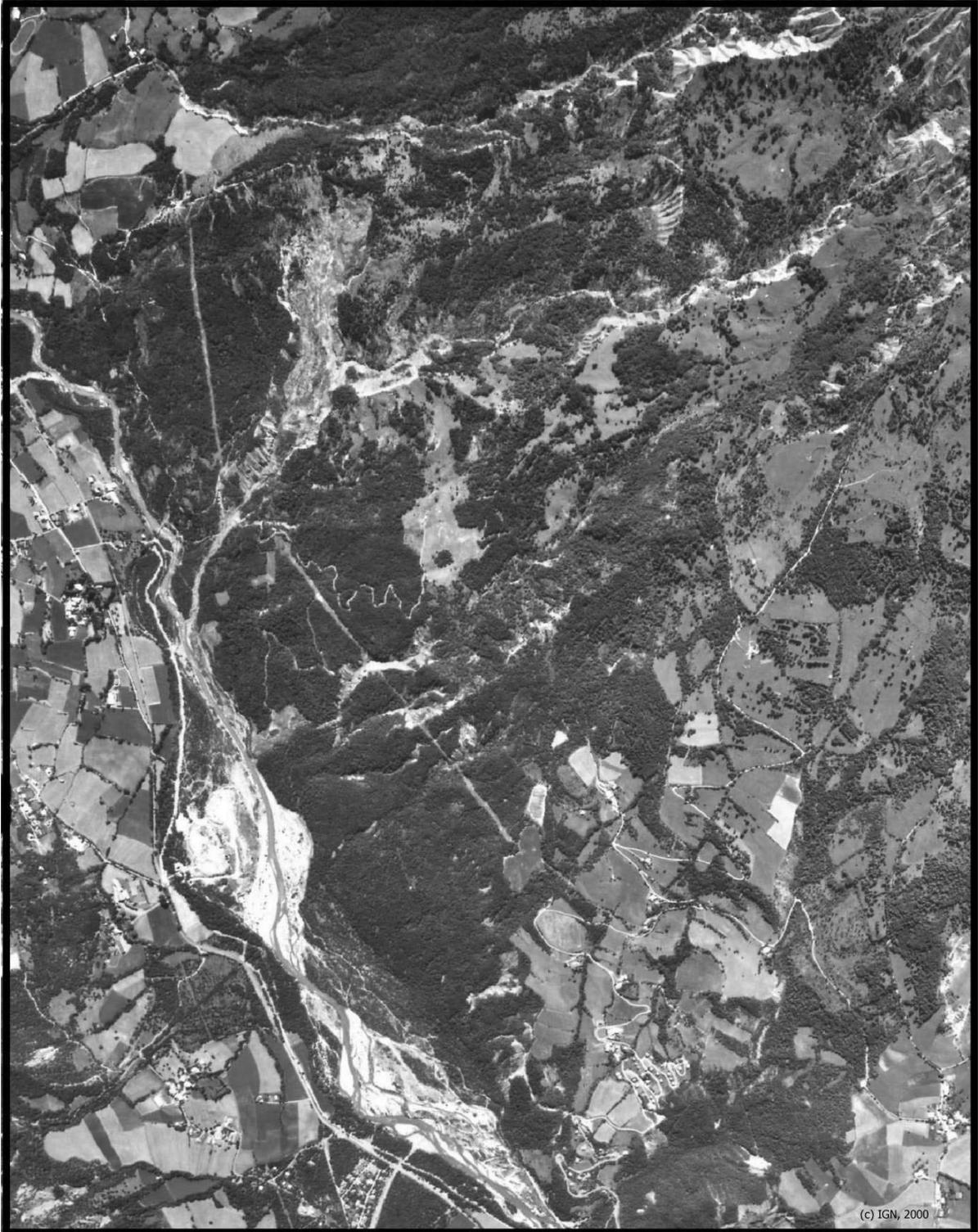


Figure 4-8. Extrait d'une photographie aérienne en 2000 de la mission FD-04_250 (cliché 1723, IGN).

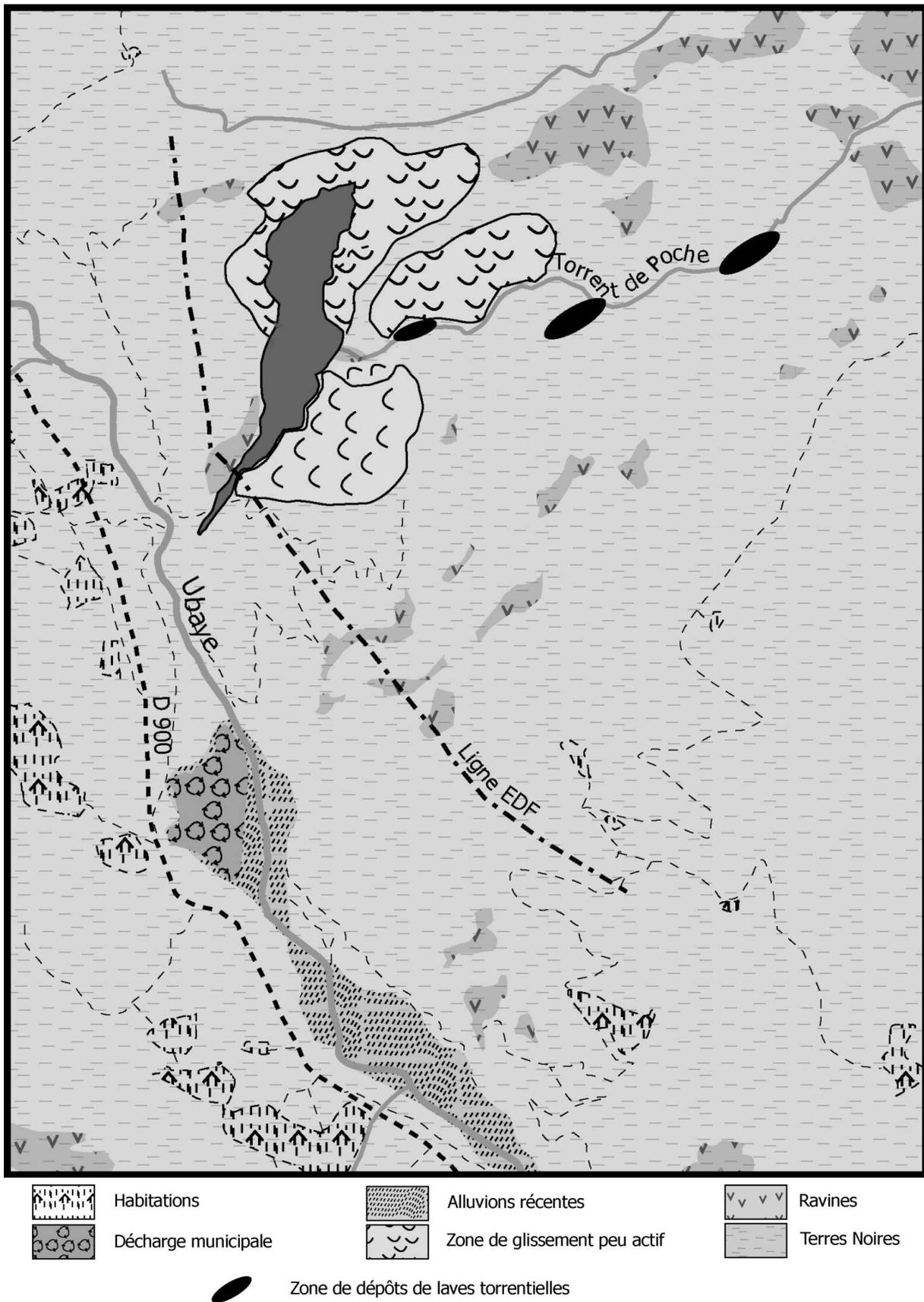


Figure 4-9. Vue schématique de la photographie aérienne présentée en Figure 4-8.

4.1.3.2. Evolution régressive et expansion latérale

L'évolution régressive et latérale concerne essentiellement la partie en glissement, c'est à dire la partie amont du processus de déstabilisation. Celle-ci peut évoluer dans deux grandes directions essentiellement, à savoir vers l'amont et sur les côtés.

Par ailleurs, la hauteur de la niche d'arrachement laisse supposer que la surface de rupture est assez profonde. Elle pourrait correspondre à une réactivation "locale" au sein d'un système plus important à l'échelle du versant.

En effet, en amont du glissement proprement dit, les berges et les versants présentent de nombreux signes d'instabilité (cf. Figure 4-4) : forêt de saules, fissures de traction dans le sol (orientées aussi N 170 E pour la plupart), bourrelets de compression, sagnes et sources à forts débits, suffisants pour générer des phénomènes de suffosion et d'entraînement de fines argileuses. En outre, de nombreux blocs et matériaux marneux sont présents dans le lit du torrent, dans son parcours amont, et témoignent d'écoulements torrentiels hyperconcentrés, voire d'écoulements de laves torrentielles (cf. Figure 4-10).



Figure 4-10. Vues du torrent de Poche en amont du glissement-coulée : les berges sont instables et il y a plusieurs zones de dépôts de laves torrentielles.

L'examen des clichés aériens (missions des années 2000 et 1997) permet de constater que l'ensemble du versant est affecté par des glissements plus ou moins actifs ou dormants (cf. Figure 4-8 et Figure 4-9).

Ces photographies révèlent en outre des linéaments et des fractures qui correspondent plus ou moins au contour et à l'activité du glissement-coulée de Poche. En effet, la déstabilisation des

terrains à proximité de l'escarpement est par ailleurs très nette. Un processus d'évolution régressive de ce glissement-coulée est donc très probable à court terme, et il pourrait être de grande ampleur.

Le glissement-coulée du torrent de Poche est un bon exemple des instabilités se produisant dans la vallée de l'Ubaye et plus particulièrement dans les Terres Noires. Sa progression, même si elle n'est pas spectaculaire, est réelle, et pourrait devenir préoccupante. Les déplacements mesurés par le service R.T.M. de Barcelonnette permettent d'évaluer la vitesse à 5 m par an environ, avec des maxima pouvant atteindre 20 m par an (pour la période du 18/11/1992 et du 14/04/1994).

4.2. Le glissement-coulée de la Valette

Le glissement-coulée de la Valette est un des plus importants processus de déstabilisation des Alpes du sud. Il se situe en rive droite de l'Ubaye, sur la limite séparant les communes de Barcelonnette à l'Est et de Saint-Pons à l'Ouest (cf. Figure 3-4).

Le contexte géologique de ce glissement-coulée est particulier, puisqu'il se produit à la limite de la fenêtre tectonique de Barcelonnette (cf. Figure 4-11). Contrairement au glissement-coulée de Poche, ce glissement-coulée constitue une menace directe pour la population et les infrastructures. Cette menace est amplifiée par le volume considérable de matériaux mobilisés, actuellement estimé à 10 millions de mètres cubes.

C'est pourquoi, le site fait l'objet d'une surveillance beaucoup plus importante qui est coordonnée par le service O.N.F.-R.T.M. (04).

4.2.1. Données sur les processus de déstabilisation et mesures de protection

4.2.1.1. Contexte géologique et historique des déstabilisations

Le glissement-coulée de la Valette se développe dans un contexte géologique particulier où l'héritage glaciaire est très présent. Le glissement-coulée de la Valette s'est développé à la fois dans les Terres Noires (marnes autochtones du Callovo-oxfordien) et dans les flyschs de la nappe de l'Autapie. Ces deux formations sont mises en contact par un chevauchement majeur (limite de la fenêtre de Barcelonnette) qui joue un rôle sur les plans hydrogéologique et mécanique. Sur le plan hydrogéologique, une ligne de sources est présente au niveau de ce contact, avec de nombreuses zones humides et sagnes (lieu-dit les Sagnes au droit de la zone glissée).

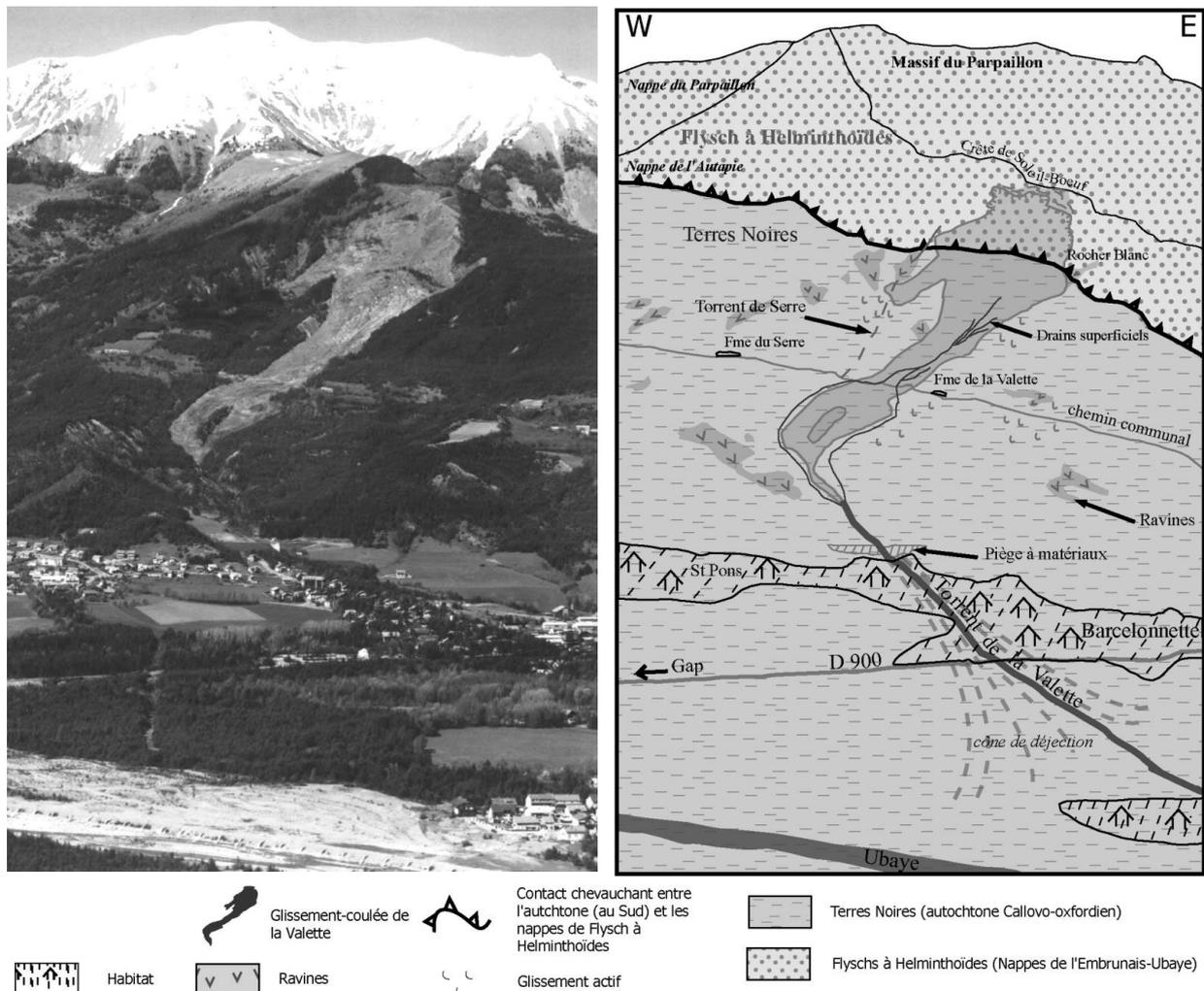


Figure 4-11. Vue générale du glissement-coulée de la Valette depuis la rive gauche de l'Ubaye (cliché en mai 2001).

Par ailleurs, entre le torrent du Faucon (à l'Est) et la rive gauche du glissement-coulée de la Valette, le contact tectonique ne présente pas de variation notable d'altitude, jusqu'à l'approche de la rive gauche du glissement-coulée de la Valette. Sa localisation, en sous-bois est cependant difficile à préciser, en raison du très faible nombre d'affleurements.

Aux environs de cette rive, la cote du contact remonte fortement. Cette différence d'altitude est associée à la présence d'une stratification verticale dans les Terres noires et des perturbations dans le faciès dissocié du Flysch à Helminthoïdes. Ceci conduit à envisager l'existence d'une grande flexure affectant les Terres noires, prolongement d'une faille plus en amont dans les flyschs. Il est permis de supposer que ces éléments structuraux, post-nappes, seraient à l'origine de l'augmentation brutale de l'altitude du contact anormal à proximité de la rive gauche du glissement-coulée de la Valette.

En outre, ces éléments structuraux s'intègrent dans un contexte déjà tectonisé lors de la mise en place des nappes de flysch (cf. Figure 4-12).

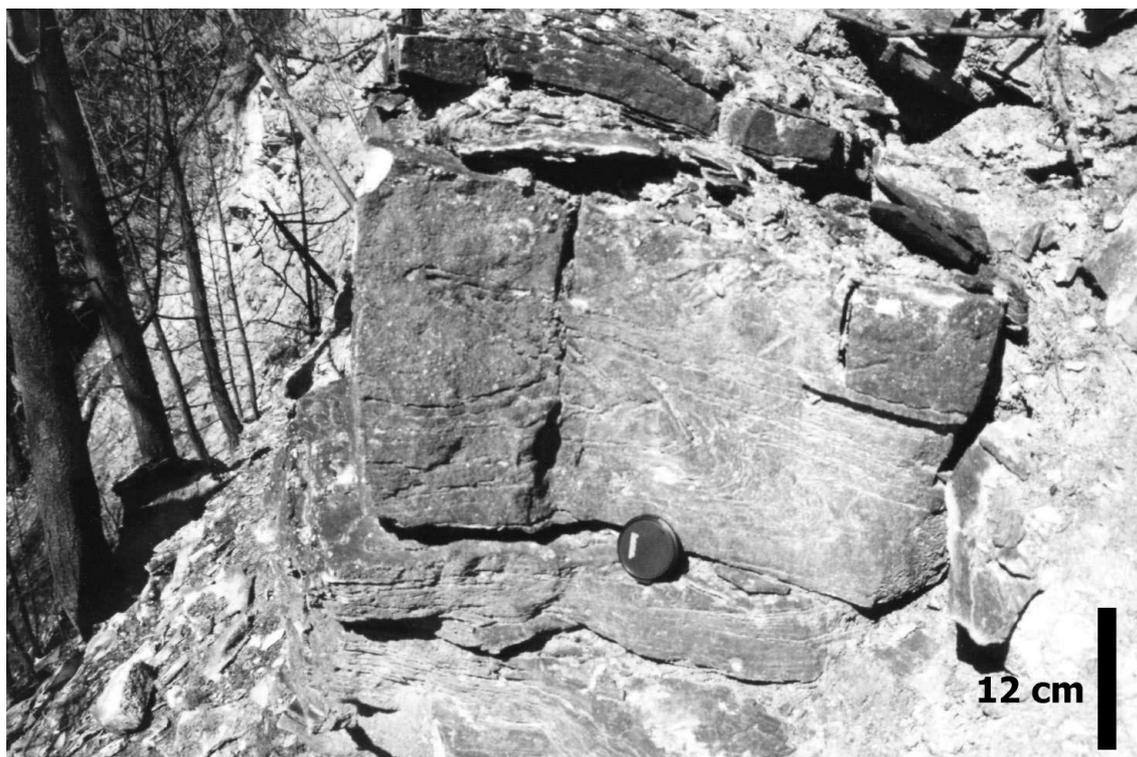


Figure 4-12. Vue d'un bloc (sub en place) de flysch de la nappe de l'Autapie, en rive gauche du glissement-coulée, présentant des micro-plis soulignant le caractère perturbé de la zone de chevauchement.

Dans le glissement-coulée, le contact disparaît sous les produits du glissement (cf. Figure 4-13). En poursuivant vers l'Ouest, c'est à dire en rive droite du glissement et au-delà vers le Riou Bourdoux, le contact est visible sans trop de variation d'altitude. Cependant, d'autres phénomènes de flexure doivent l'affecter localement, mais sont difficilement représentables à l'échelle cartographique.

D'autre part, le glissement-coulée s'est développé sur une autre particularité géologique qui est liée au chevauchement. Cette particularité apparaît sur la carte topographique en lieu-dit noté le "Rocher Blanc". Elle est en fait liée à la présence d'une écaille de calcaire planctonique de la nappe du Pelat à cet emplacement.

A ce niveau, apparaissait une source qui est actuellement dans le glissement. Néanmoins, sa persistance peut être en partie suspectée par l'abondance de résurgences sur le corps du glissement-coulée en aval (rive gauche) de ce point (cf. Figure 3-7).

Le glissement-coulée de la Valette est un processus encore actif qui mobilise environ 10 millions de mètres cubes de matériaux sur une longueur d'environ 2500 m et une largeur de 600 m. La pente moyenne est d'environ 18° entre les cotes 1230 m et 2020 m, avec un raidissement important de la pente dans la partie en glissement (essentiellement à partir de la cote de 1500 m environ).

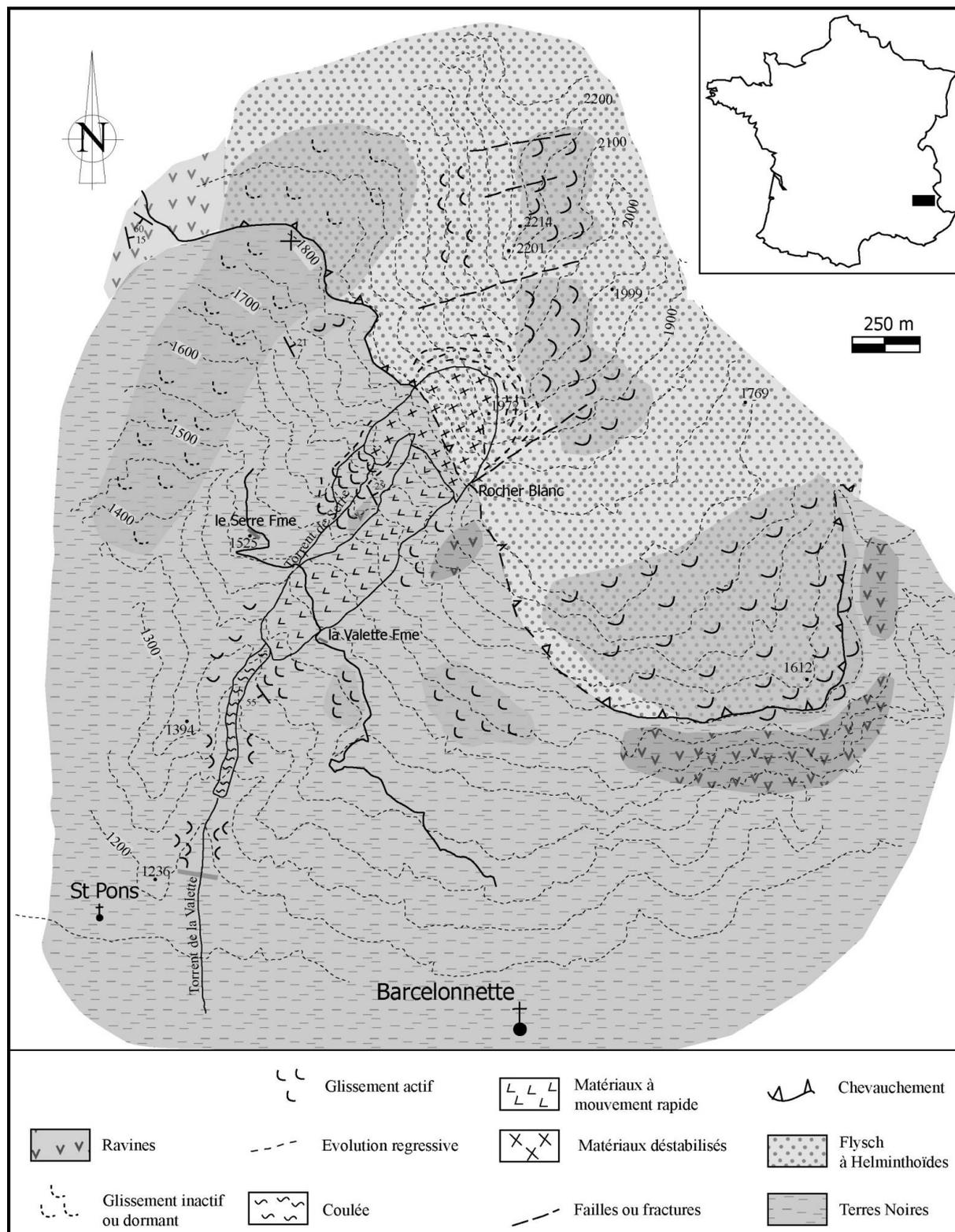


Figure 4-13. Carte du glissement-coulée de la Valette et de son contexte géologique proche.

Le déclenchement du processus a eu lieu au printemps de 1982, par une rupture, de type rotationnel, qui s'est produite dans les Terres Noires et les flyschs, au niveau du chevauchement, à la suite d'une période de précipitations importantes lors de la fonte des neiges. Nous avons indiqué en 3.3.1.3, le cadre hydrogéologique de ce contact, avec une

nappe de fracture dans les flyschs et un mur peu perméable représenté par les marnes du Callovo-oxfordien.

Ensuite, le versant s'est peu à peu déstabilisé vers l'aval, dans des Terres Noires relativement peu résistantes aux sollicitations mécaniques (cf. Figure 4-14).



Figure 4-14. Vue du glissement-coulée de la Valette avant le déclenchement de la coulée boueuse (cliché RTM).

Puis, à la fin de l'hiver 1988, très humide, une coulée de boue s'est détachée de la base des matériaux mobilisés. Cette coulée s'est développée à partir de la piste reliant le hameau des Allemands à la ferme du Serre, c'est à dire à la cote 1450 m et jusqu'à la cote 1230 m environ, soit 80 m plus haut que les premières habitations du lotissement de la Valette (cf. Figure 4-15). Le volume ainsi mobilisé par cette coulée a été estimé à environ 50 000 m³.

Depuis, le glissement-coulée progresse plus lentement. Au plus fort de la crise, juste après le déclenchement de la coulée, les déplacements étaient de l'ordre de 40 cm.j⁻¹.

Sa surface a cependant évolué : 26 ha en 1982, 32 ha en 1984, 50 ha en 1985, et environ 90 ha en 2001 (d'après le relevé R.T.M.).

Les raisons de la rupture sont clairement liées, pour une grande partie, à la présence d'eau en quantité relativement importante. Cependant, d'autres facteurs sont à considérer telle que l'histoire géomécanique du versant.

En revanche, bien que la région ait un caractère sismique (un séisme de magnitude proche de 3.0 par semaine environ, données RENASS –<http://renass.u-strasbg.fr>), le déclenchement du glissement-coulée n'est pas relié à une activité sismique particulière.



Figure 4-15. Vue de la coulée juste après son déclenchement en 1988 (cliché RTM).

Malgré le caractère actif du torrent de la Valette qui était corrigé (cf. Annexe 4), des habitations ont été édifiées sur le cône de déjection, sans que le chenal (pente d'environ 3%, largeur de 6 m environ et profondeur entre 1 et 7 m) ne soit aménagé. Ces instabilités et menaces potentielles pour la population (environ 700 personnes) ont donc conduit les autorités à réaliser des travaux visant à limiter les effets du glissement-coulée.

4.2.1.2. Mesures de protection passives et actives

Suite au déclenchement du glissement en 1982, et devant l'ampleur de son développement, des mesures de drainages et de remodelage des matériaux déstabilisés ont été rapidement décidées. Ces mesures ont consisté à drainer les matériaux, mais aussi à entreprendre des travaux visant à limiter l'apport en eau des sources provenant de la zone de chevauchement. Ainsi 1200 m de drains subhorizontaux ont été réalisés en amont du glissement, entre les cotes 1615 et 1720 m, dans les flyschs et au niveau du chevauchement, à l'endroit même où les venues d'eau étaient les plus importantes (cf. Figure 4-16), tout spécialement au niveau du Rocher Blanc. Ces drains ont contribué à un assainissement provisoire du versant. Mais l'évolution régressive ultérieure du glissement les a rendus rapidement inefficaces.

En aval, il a également été décidé de construire un piège à matériaux qui est en fait une large plage de dépôts limitée en aval par une digue en terre avec un pertuis central permettant de laisser passer une partie des écoulements liquides (cf. Figure 4-17 et Annexe 4). Ce piège à

matériaux, achevé au printemps 1988, a été construit pour arrêter un volume d'environ 100 000 m³.



Figure 4-16. Vue des travaux de remodelage et de drainage entrepris sur la partie en glissement (cliché RTM).

Cette première phase de travaux, avec des mesures de protection active et passive, a été complétée par la dérivation du torrent du Serre (affluent rive droite du torrent de la Valette) ainsi que par l'ensemencement de la surface du glissement par du sainfoin. Enfin, de nombreux systèmes de drains PVC ont été posés et des fossés creusés sur le corps du glissement-coulée, afin de limiter les ré-infiltrations. Tous ces travaux ont permis de maîtriser les déplacements (cf. Figure 3-10, Figure 3-12 et Figure 3-13), puisque ces derniers ont été ramenés à une valeur de l'ordre du centimètre par jour.

Mais les drains sub-horizontaux se sont rapidement révélés peu efficaces, car les déplacements engendrés par le mouvement des matériaux a conduit à leur cisaillement.

En revanche, les drains superficiels (fossés et collecteurs PVC) ont été refaits à plusieurs reprises afin de maintenir l'efficacité du système (cf. Chapitre 3). Ces travaux de reprises s'accompagnent souvent de travaux de réfection de la piste traversant le glissement-coulée pour aller vers la ferme du Serre.

En outre, considérant l'enjeu présent en aval (cf. Figure 4-11 et Figure 4-17), ces mesures ont été renforcées par la mise en place de systèmes d'alerte et de surveillance.

Ainsi, un profil topographique transversal (au glissement-coulée) de référence a été créé afin de mesurer les déplacements des matériaux mobilisés. Celui-ci est régulièrement contrôlé par le service R.T.M. Ensuite, plusieurs profils repères ont été instaurés en amont et au niveau de la niche d'arrachement pour contrôler son évolution. De plus, le service R.T.M. a ajouté une

surveillance topographique à partir d'un point fixe (appelé "point 1394", point coté 1394 m en rive droite du glissement-coulée).



Figure 4-17. Vue du glissement-coulée de la Valette et du piège à matériaux (mai 2002).

Vue rapprochée du piège à matériaux en Annexe 4.

D'autre part, un autre dispositif de surveillance automatisé a été mis en œuvre au niveau du front de la coulée (vers la cote 1250 m). Ce dernier comporte deux dispositifs. Il s'agit d'une caméra infrarouge faisant une mise au point régulière sur des cibles prédéfinies, et d'un système de palpeurs en travers du lit du torrent qui déclenchent un contacteur en cas d'arrivée massive de matériaux. Ces deux systèmes sont consultables à distance par les services d'alerte (C.O.D.I.S.* à Digne).

De plus, depuis janvier 1999, un pluviomètre automatique a également été installé sur le site du glissement en rive gauche vers la cote 1450 m. Ce pluviomètre vient d'être complété par l'implantation d'un limnigraphe automatique au niveau du pertuis du piège à matériaux.

Toutes ces mesures sont supervisées par le service R.T.M. de Digne – Barcelonnette, et leurs coûts sont pris en charge par différents services de l'Etat. Le financement des travaux est soutenu par l'Etat (service R.T.M.), la Région, le Département, la Communauté de Communes de la Vallée de l'Ubaye (C.C.V.U.), et en premier lieu les communes de Barcelonnette et Saint-Pons.

D'autres dispositifs de surveillance ont fait leur preuve dans la surveillance du glissement-coulée, en période de faible activité du point de vue des déplacements. La mesure des

* Centre Opérationnel Départemental Incendies et Secours

déplacements (2D) par interférométrie radar, avec corrections des effets topographiques à l'aide d'un M.N.T. *, ont permis de montrer que cette méthode était en accord avec les mesures de terrain, ainsi que de visualiser les zones en mouvement qui ne seraient pas prises en compte par des repères topographiques sur le site (Squarzoni et al, 2003). Cette méthode a aussi été complétée par des relevés par G.P.S.** (mono-fréquence) qui ont permis de cartographier rapidement les contours de la zone en glissement, et d'accéder aux vecteurs déplacements en 3D (Squarzoni, 2003). Ces deux dispositifs permettent donc d'envisager une surveillance continue et relativement fine du glissement-coulée, en complément des mesures topographiques de terrains indispensables au calage de ces deux méthodes indirectes. Par ailleurs, cette méthodologie a été appliquée sur le glissement-coulée de Super-Sauze, en rive gauche de l'Ubaye, et a permis d'établir les variations saisonnières des déplacements des matériaux mobilisés en fonction des variations du niveau piézométrique (Malet et al, 2000 et 2002).

4.2.2. Différents indices de terrain et mesures mettant en évidence les évolutions du glissement

Les mesures de déplacement et les relevés topographiques évoluent dans le temps, montrant que le glissement-coulée demeure encore actif. Les deux grandes évolutions possibles sont la réactivation de la coulée de boue et l'évolution régressive de la partie en glissement.

4.2.2.1. Réactivation de la coulée de boue

La coulée de boue a été très active en 1988. Les levées latérales en partie supérieure de coulée et au niveau de la zone en glissement peuvent en témoigner. Depuis, son évolution relève du processus de fluage.

Les déplacements cumulés sont importants : un peu plus de 160 m depuis 1988, après le déclenchement. Actuellement, les matériaux de la coulée occupent le lit du torrent, lequel a retracé son cours dans ces matériaux en aval des dérives, c'est à dire en front de coulée.

Ces matériaux en évoluant conduisent les produits du glissement à se déplacer vers l'aval par absence de butée de pied. De ce fait, des quantités importantes de matériaux deviennent disponibles pour le déclenchement d'une nouvelle coulée de boue (cf. Figure 4-18).

Cette accumulation de matériaux du glissement, dans un état de résistance résiduelle, avec une pente de plus en plus importante, se présente aujourd'hui au niveau de la zone de départ de la coulée de 1988. Ceci est visible en comparant les deux vues de la Figure 4-18 (voir aussi Annexe 4-3), au niveau de l'interfluve qui tend à disparaître sous les matériaux glissés.

* Modèle Numérique de Terrain

** de l'anglais : Global Positioning System

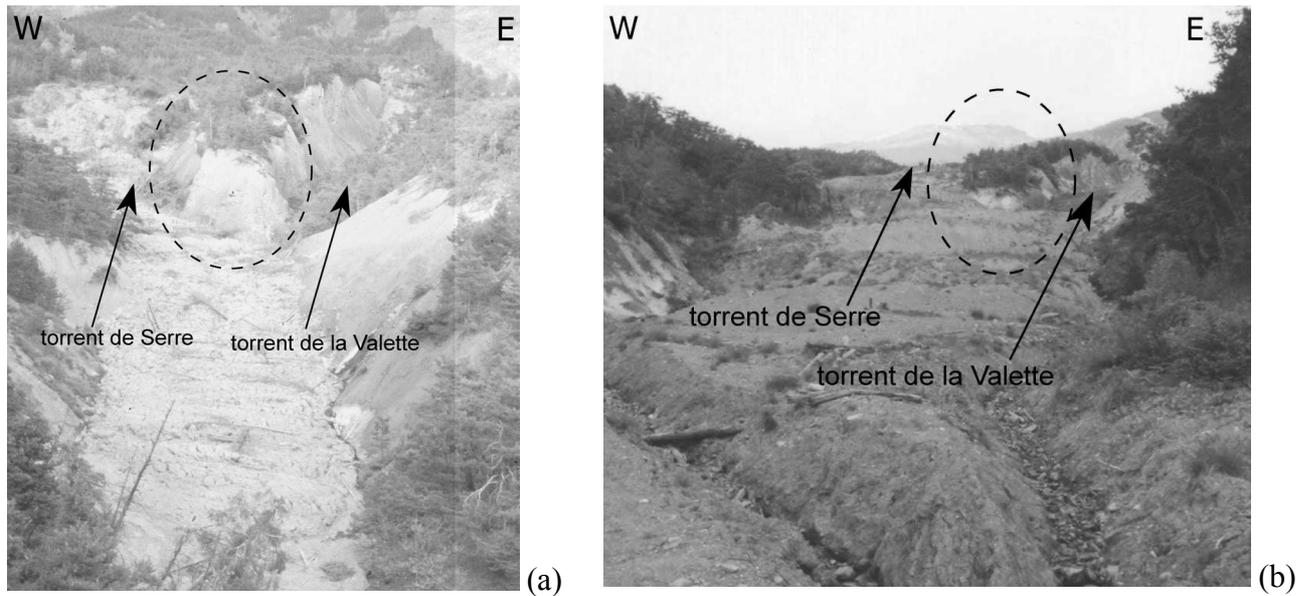


Figure 4-18. Vue de la coulée de la Valette au niveau de l'ancienne confluence entre le torrent de Serre et le torrent de la Valette. (a) : cliché R.T.M. à la fin des années 80 ; (b) : vue en 1999 ; l'interfluve est marqué par des pointillés.

Dans cette partie aval, les berges du torrent présentent des signes d'instabilité et des zones de fort ravinement. Ces zones sont susceptibles de fournir des matériaux pouvant alimenter des petites coulées, ou bien bloquer le lit du torrent et contribuer à la génération d'un événement plus important (cf. Figure 4-19 et Annexe 4).



Figure 4-19. Exemple d'un petit glissement affectant les berges du torrent de la Valette, en amont du piège à matériaux en front de coulée.

La réactivation de la coulée de boue serait très dangereuse pour les habitants et les infrastructures en aval, et poserait un énorme problème de stabilité au niveau du versant. En effet, le départ de la coulée contribuerait fortement à la sollicitation des matériaux en phase de glissement qui alimenterait la coulée et aboutirait probablement à déstabiliser le versant jusqu'à la crête de Soleil-Bœuf.

C'est pourquoi, l'entretien des systèmes de drainage paraît indispensable afin de limiter au maximum les sources possibles d'alimentation en eau.

4.2.2.2. Evolution régressive du glissement en amont et latéralement

Différents indices permettent de mettre en évidence le caractère actif de l'évolution régressive du glissement.

En effet, en arrière de la niche d'arrachement, de nombreuses fractures, d'extension plurimétrique, apparaissent en dessinant une réplique, plus ou moins continue, de la niche d'arrachement actuelle (cf. Figure 4-21).



Figure 4-20. Niche d'arrachement du glissement-coulée de la Valette (en 1999).

Ces fractures ont parfois des orientations particulières ($N 30^\circ E$ et sa conjuguée $N 120^\circ E$) découpant ainsi la zone en divers sous-ensembles instables évoluant à des vitesses plus ou moins rapides (cf. Figure 4-21).



Figure 4-21. Vue d'une fracture en sous bois, en amont de la niche d'arrachement du glissement-coulée.

Cette situation a conduit le service R.T.M. à introduire des profils de surveillance au niveau de la crête de Soleil-Bœuf. Ces profils extensométriques et repères topographiques concernent différentes zones où des fractures sont présentes. Ils sont surveillés de façon périodique par relevé ponctuel (cf. Figure 4-22 et aussi Annexe 4).

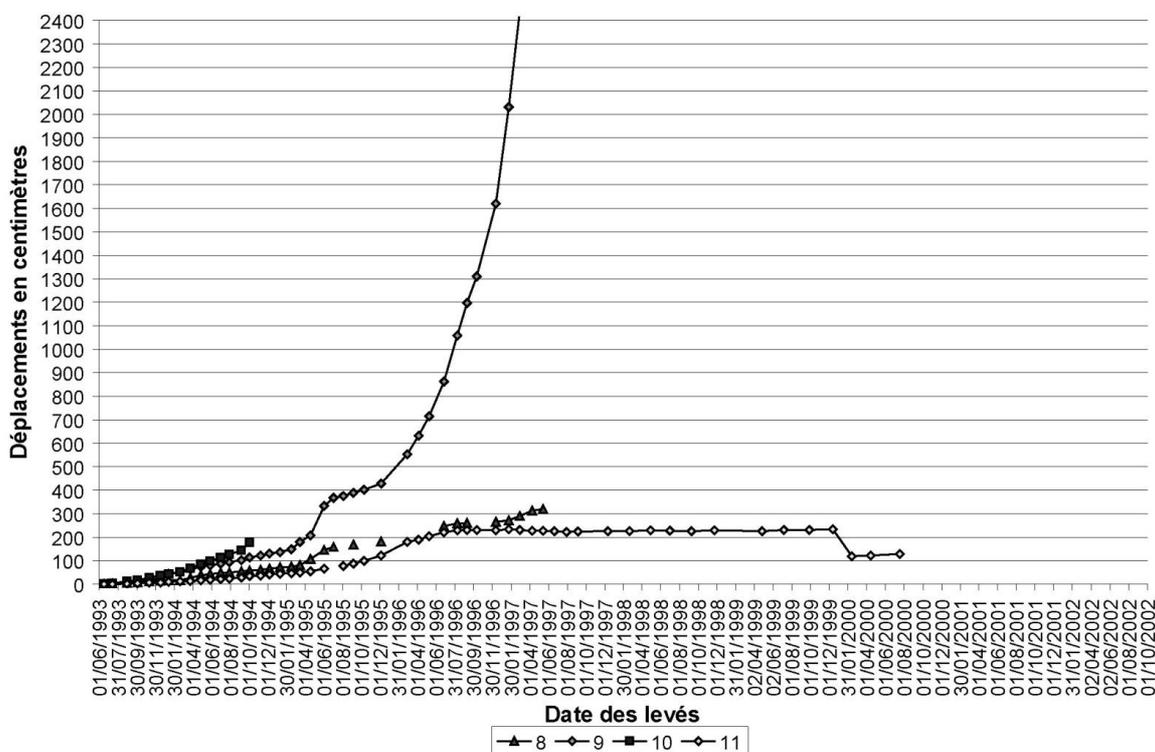


Figure 4-22. Exemples de graphe de déplacements sur points surveillés en amont de la niche d'arrachement (d'après R.T.M.).

Nous pouvons observer que les points ainsi surveillés n'évoluent pas tous à la même vitesse. Néanmoins, certains présentent des évolutions métriques à plurimétriques avec une tendance comparable. D'autres points apparaissent sur les graphes de surveillances avec des relevés interrompus. Ce qui signifie qu'ils ont été emportés par le glissement, ou plus rarement que les repères (souvent des arbres) sont devenus inutilisables. Actuellement, ces profils de surveillance doivent être redéfinis en raison du fait que la totalité des arbres présents entre la crête et la niche d'arrachement ont été abattus et exploités par l'O.N.F. (Office National des Forêts), avec l'autorisation du service R.T.M. En effet, le glissement-coulée est, depuis son déclenchement, classé en terrain domanial.

Cette opération a eu un effet négatif sur la stabilité, en mettant à nu l'ensemble des terrains en amont de la niche, en exposant les fractures à la pluie et en annulant la cohésion racinaire.

Mais, elle a eu pour conséquence positive de supprimer le poids des arbres dans une zone déjà déstabilisée où le poids avait un rôle moteur localement.

Latéralement, le glissement gagne aussi en surface, puisque sa progression en rive droite est assez nette. En effet, le lit du torrent de Serre est quasiment entièrement perturbé dans sa partie amont (au-dessus de 1450 m). Cette situation est analogue en rive gauche, puisque la déstabilisation a engendré la ruine de la ferme de la Valette et des désordres importants dans le petit thalweg voisin (cf. Figure 4-23).



Figure 4-23. Vue d'un petit glissement en rive gauche (vers 1650 m) légèrement en dessous du contact entre les Terres Noires et les flyschs de la nappe de l'Autapie (octobre 2002).

La situation en rive droite du glissement (au voisinage de la partie amont du torrent de Serre) s'est fortement dégradée en très peu de temps. Durant la durée de cette thèse, les changements ont été très importants. En effet, en 1999, la situation était encore peu avancée, avec cependant des contre pentes et des sagnes avec accumulations d'eau. En octobre 2002, la situation était préoccupante par le degré de déstabilisation des terrains et la surface concernée. La situation a été jugée, par des témoins, proche de celle de 1988 juste avant le déclenchement de la coulée.

Cette évolution régressive et l'expansion latérale sont visibles en photographies aériennes I.G.N. Une analyse multi-dates de clichés (de 1965 à 2000) a permis de mettre en évidence l'évolution régressive du glissement.

La série de clichés observés montre que le versant présente des indices d'instabilité (fissures, bourrelets) au moins dès 1971 (les clichés de 1965 étant peu exploitables sur la zone), au niveau de la tête actuelle (cf. Figure 4-24 à Figure 4-27).

Puis, les déformations se propagent sur l'ensemble du versant de la Valette. Ce n'est qu'en 1982, après la rupture principale, que l'évolution régressive de la tête commence à être visible. Elle s'accroît ensuite progressivement pour devenir préoccupante aujourd'hui.

La partie supérieure est constituée de plusieurs unités ou masses glissées. En limite du glissement, des fissures d'extension plurimétrique témoignent de l'évolution régressive en cours, vers l'amont et latéralement. L'évolution, sur l'ensemble des clichés observés, permet de constater que la niche progresse de façon très rapide. En effet, en suivant l'évolution de quelques repères visuels, entre 1988 et 1995, on observe que l'éloignement de ceux-ci par rapport à la niche d'arrachement a un peu plus que doublé. De même, entre 1995 et 2000, cette distance semble avoir doublé à nouveau.

Ceci est en accord avec les mesures de surveillance réalisées par le R.T.M. qui indiquent que des points situés dans le glissement progressent, et que des points en amont bougent, alors qu'auparavant ils étaient "stables".

Certaines des fractures présentes, en amont de la niche d'arrachement, semblent résulter de la réactivation de fractures plus anciennes. Il semblerait ainsi que le glissement de la Valette soit une réactivation d'un mouvement de versant plus ancien et plus important.

Légende relative aux Figure 4-24, Figure 4-25 et Figure 4-27 :

		Habitations		Linéament		Zone en glissement
		Route ou chemin		Ligne de crête		Ravines
		Drains		Contact anormal Terres Noires - Fysch à Helminthoïdes		Flysch Dissocié
		Torrent		Zone en fluage		Terres Noires

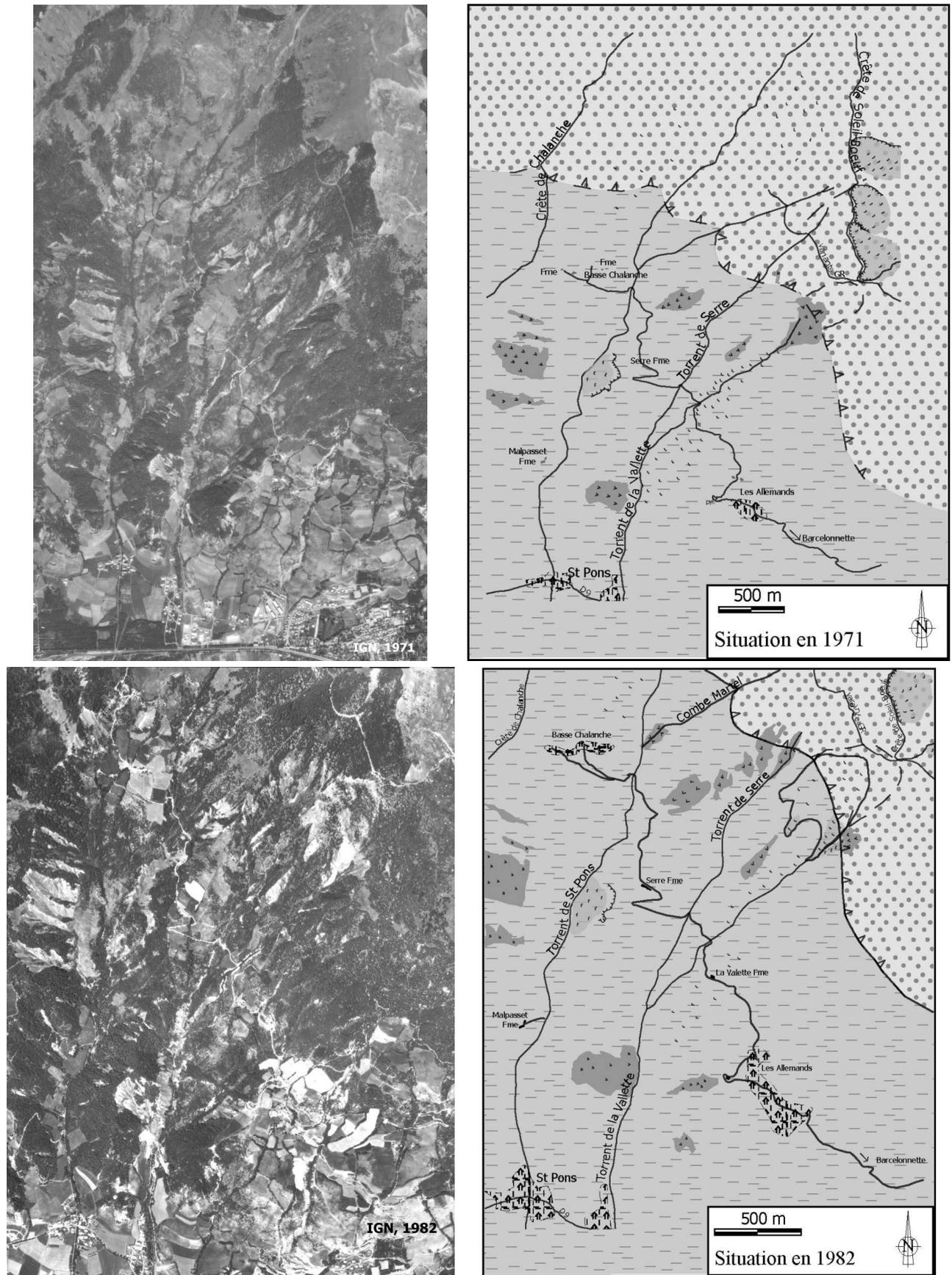


Figure 4-24. Vues aériennes de 1971 et 1982 du glissement-coulée de la Valette (cf. Annexe 4-11 pour des figures agrandies).

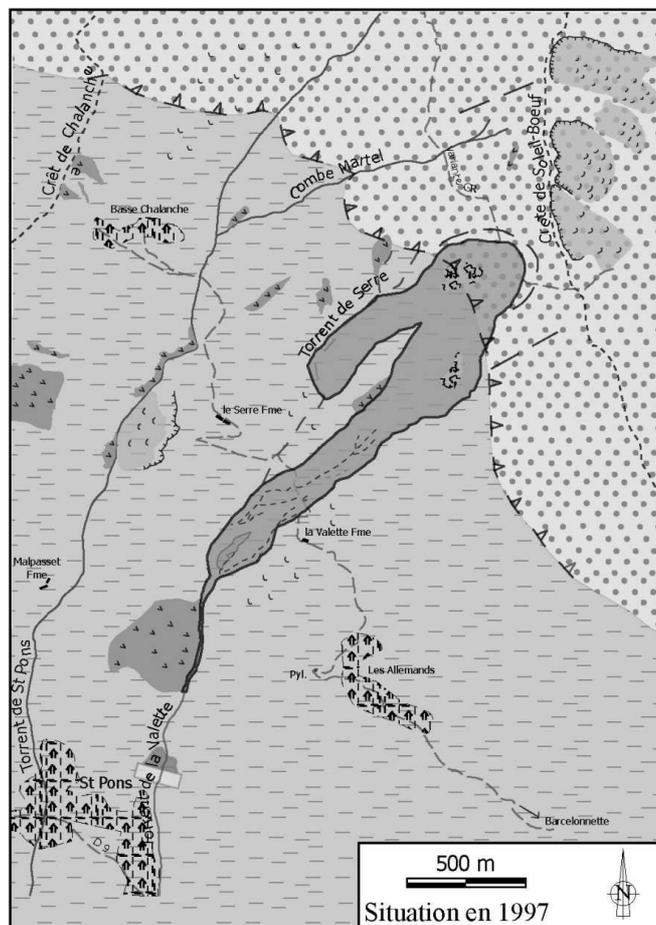
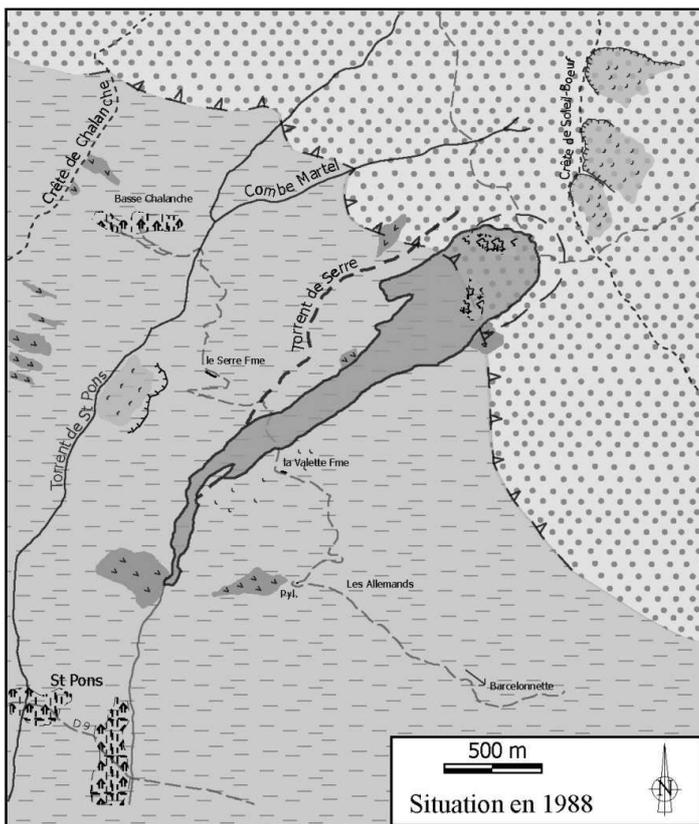
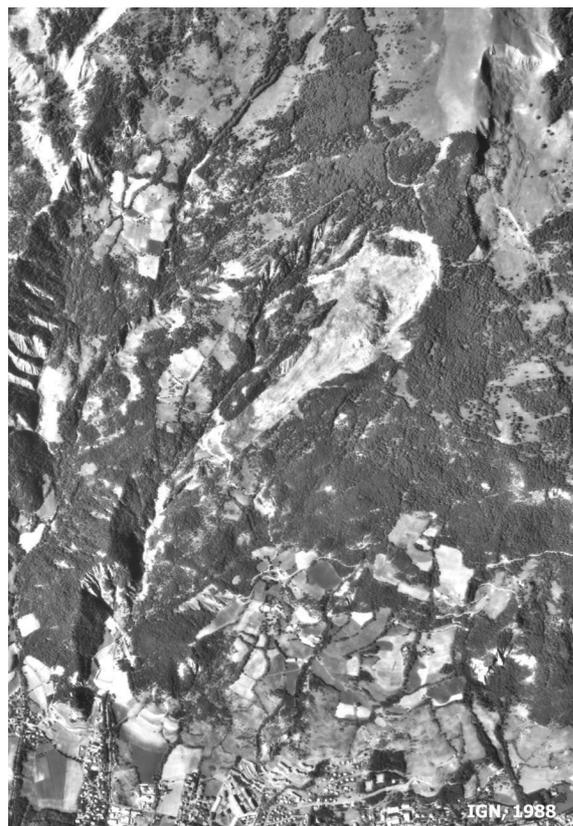


Figure 4-25. Vues aériennes de 1988 et 1997 du glissement-coulée de la Valette (cf. Annexe 4-11 pour des figures agrandies).



Figure 4-26. Vue aérienne de 2000 du glissement-coulée de la Valette (IGN, 2000).

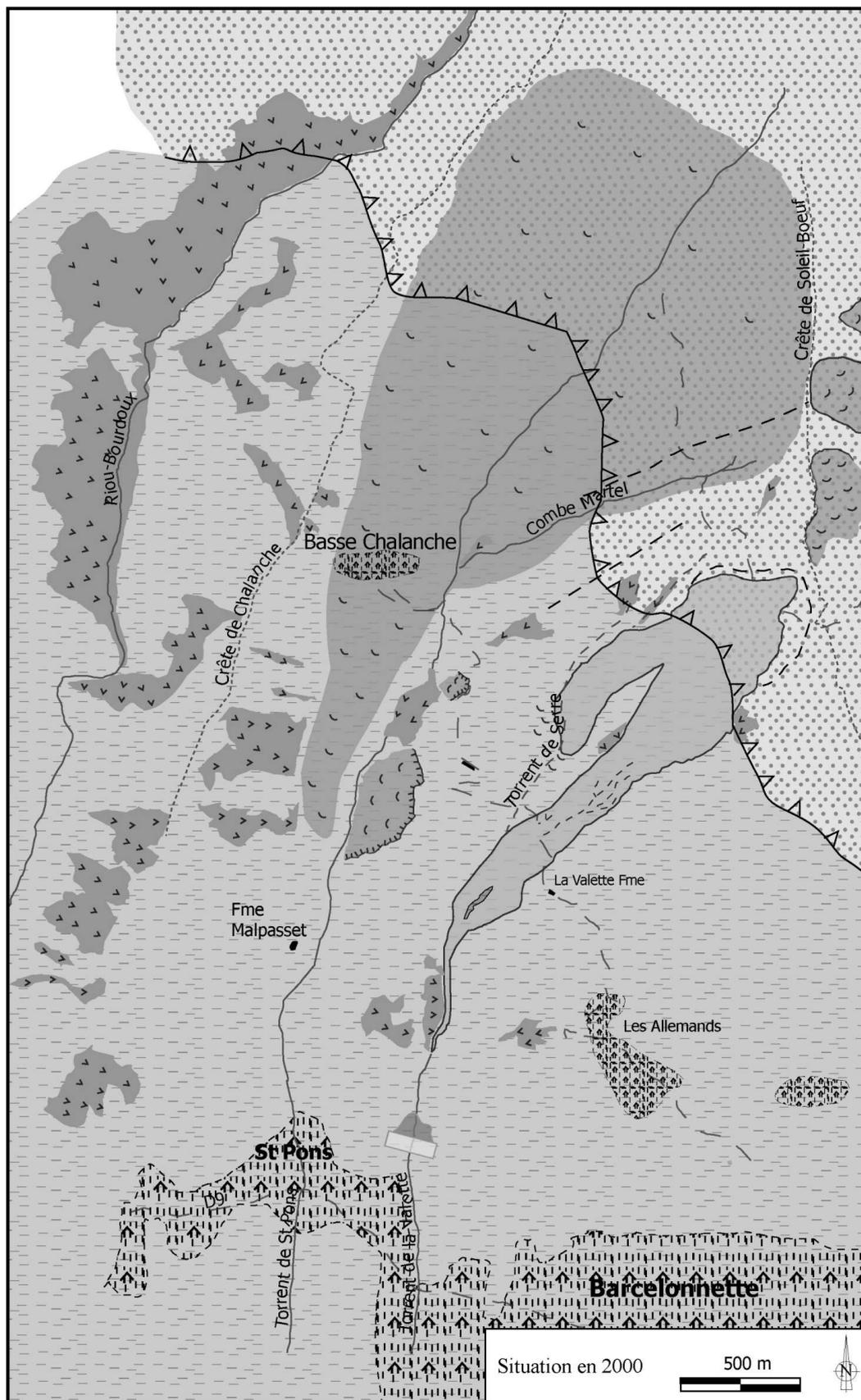


Figure 4-27. Photo-interprétation du cliché de la mission IGN, 2000.

4.2.2.3. Facteurs explicatifs de l'évolution du glissement-coulée

L'évolution régressive et latérale du glissement est relativement rapide, et semble être contrôlée structurellement par des directions de fractures particulières.

Cette direction N 60° E à N 80° E se retrouve dans le glissement au niveau de la tête, et légèrement au-dessous en sous bois. Elle est présente aussi sur toute la crête de Soleil-Bœuf. En effet, cette dernière est découpée en plusieurs ensembles décalés altimétriquement (cf. Figure 4-28).

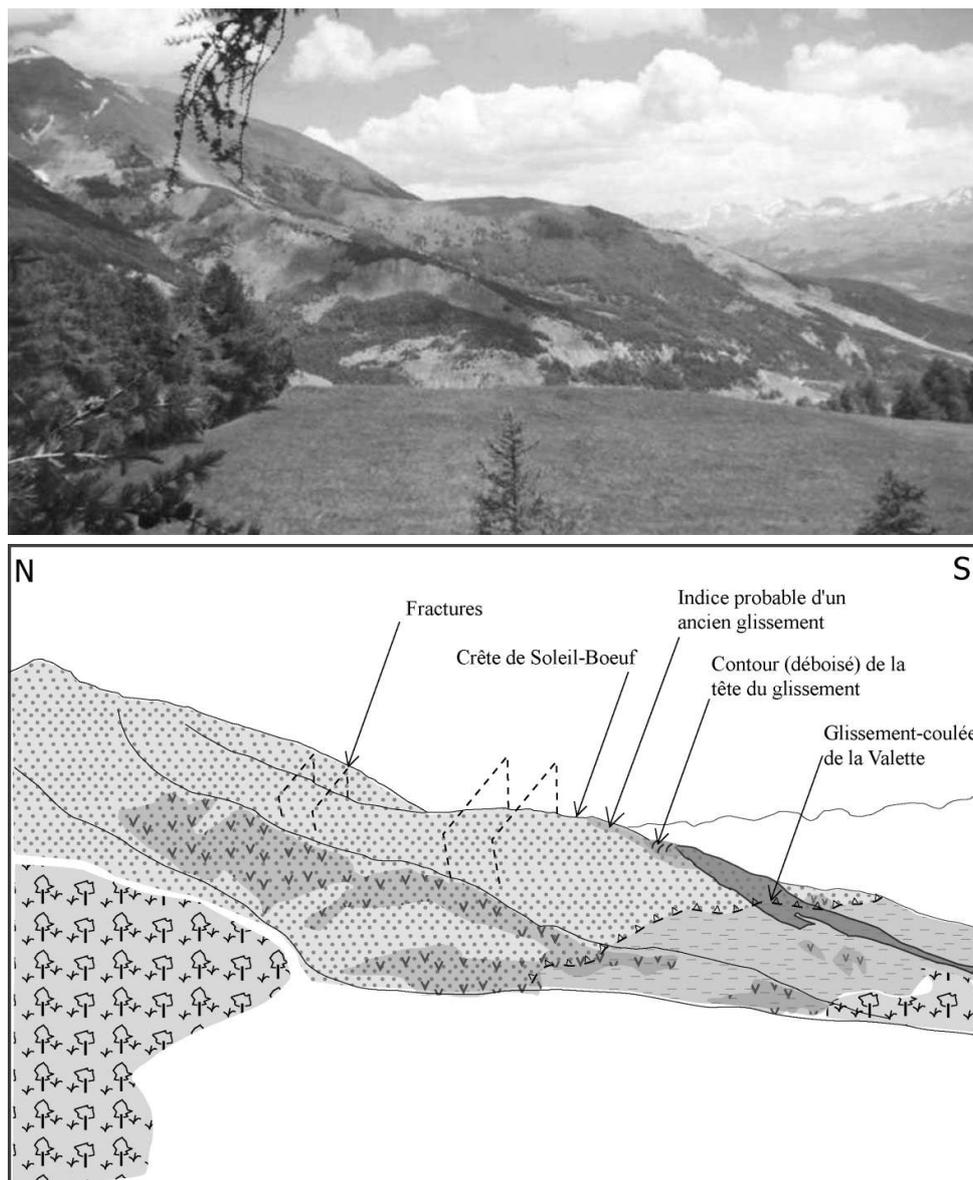


Figure 4-28. Vue oblique du glissement-coulée et de la crête de Soleil-Bœuf, fracturée, depuis la rive ouest du Riou Chamous (juin 2002).

La morphologie de détail de cette crête est déterminée par ce réseau, constitué de fractures et de failles (cf. Figure 4-29). En outre, au sein de la nappe de l'Autapie, de nombreux thalwegs

présentent la même orientation. De plus, les flyschs présentent des plis d'axes entre N60 et N150 avec un pendage modéré vers le Sud. Au niveau de la crête de Soleil-Bœuf, cette phase de micro-plissement semble s'intensifier, augmentant ainsi le caractère hétérogène du massif. La résistance mécanique des matériaux est donc diminuée, et l'évolution régressive du glissement vers l'amont s'en trouve favorisée.

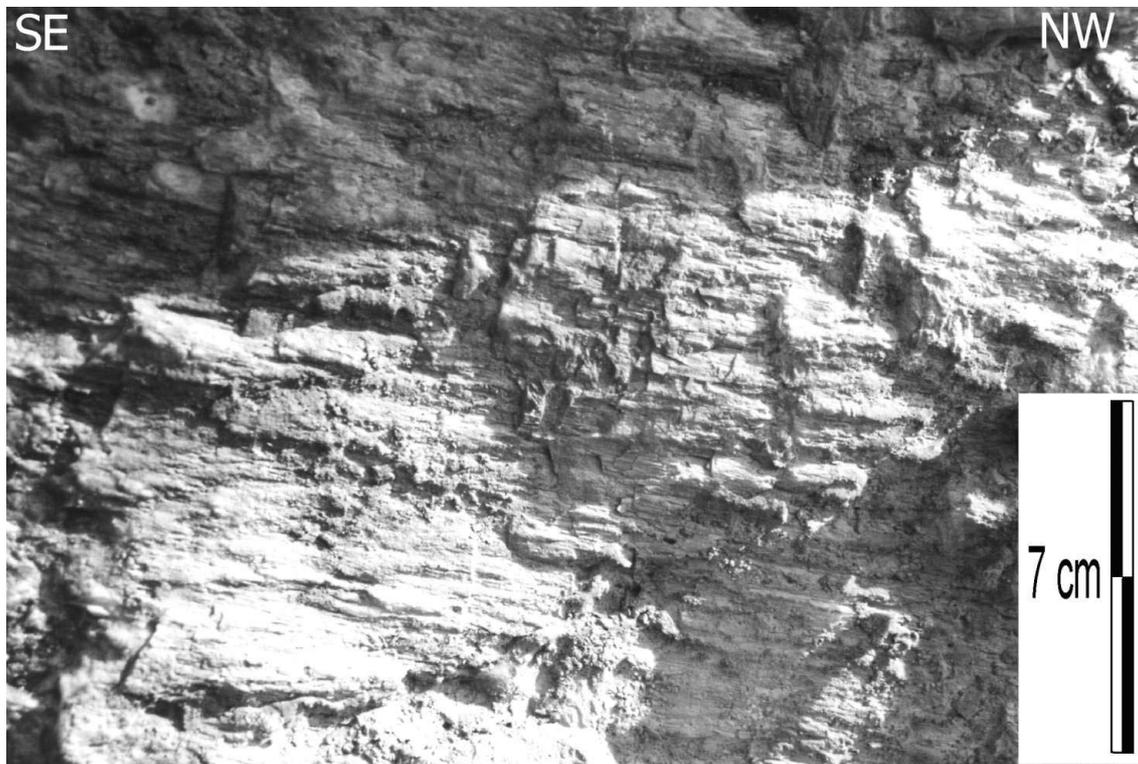


Figure 4-29. Plan de faille avec des stries sur la crête de Soleil-Bœuf ; orientation du plan N 125° E, 90° avec un pitch de 15° vers l'Est, à composante sénestre.

Il apparaît donc qu'il existe des éléments structuraux majeurs ainsi qu'un historique d'ancien versant instable jouant le rôle de facteurs de prédisposition pour un scénario d'évolution régressive du glissement-coulée (cf. Figure 4-28). Cette hypothèse de paléo-glissement, probablement un héritage post-glaciaire, sur le site du glissement coulée de la Valette peut être confirmé par d'autres facteurs. Ces facteurs, outre les indices visibles sur les photographies aériennes de 1971 et la carte géologique du B.R.G.M.* (carte n°895 - feuille XXXV-39 ; cf. Annexe 2-1), sont visibles sur la crête de Soleil-Bœuf. Il s'agit de sa morphologie, nettement plus visible depuis que les arbres ont été exploités, qui laisse apparaître un escarpement d'une hauteur de deux mètres environ (cf. Figure 4-30). Cet escarpement affecte l'ensemble de la zone, et semble se perdre dans les thalwegs voisins.

* B.R.G.M. : Bureau de Recherche Géologique et Minière



Figure 4-30. Escarpement soulignant une ancienne niche d'arrachement.

Ce paléo-glissement se présente avec une ampleur très importante, englobant le glissement-coulée de la Valette.

Par ailleurs, légèrement à l'Ouest, la crête de Soleil-Bœuf présente des signes d'instabilités superficielles (cf. Figure 2-17 et Annexe 4-18), ainsi que les traces d'un autre paléo-glissement, de même ampleur, mais affectant les prairies de Chalanche (cf. Figure 4-31).



Figure 4-31. Vue des prairies de Chalanche depuis la crête de Soleil-Bœuf avec leur morphologie de paléo-glissement.

De même, le versant côté ubac de la crête de Soleil-Bœuf présente de nombreuses marques d'instabilités relativement superficielles qui sont visibles dans les flyschs fracturés (cf. Annexe 4-19 et Figure 4-32). Ces instabilités viennent s'amortir dans les Terres Noires, légèrement en-dessous du contact anormal, au niveau des ravines de Pisse-Vin.

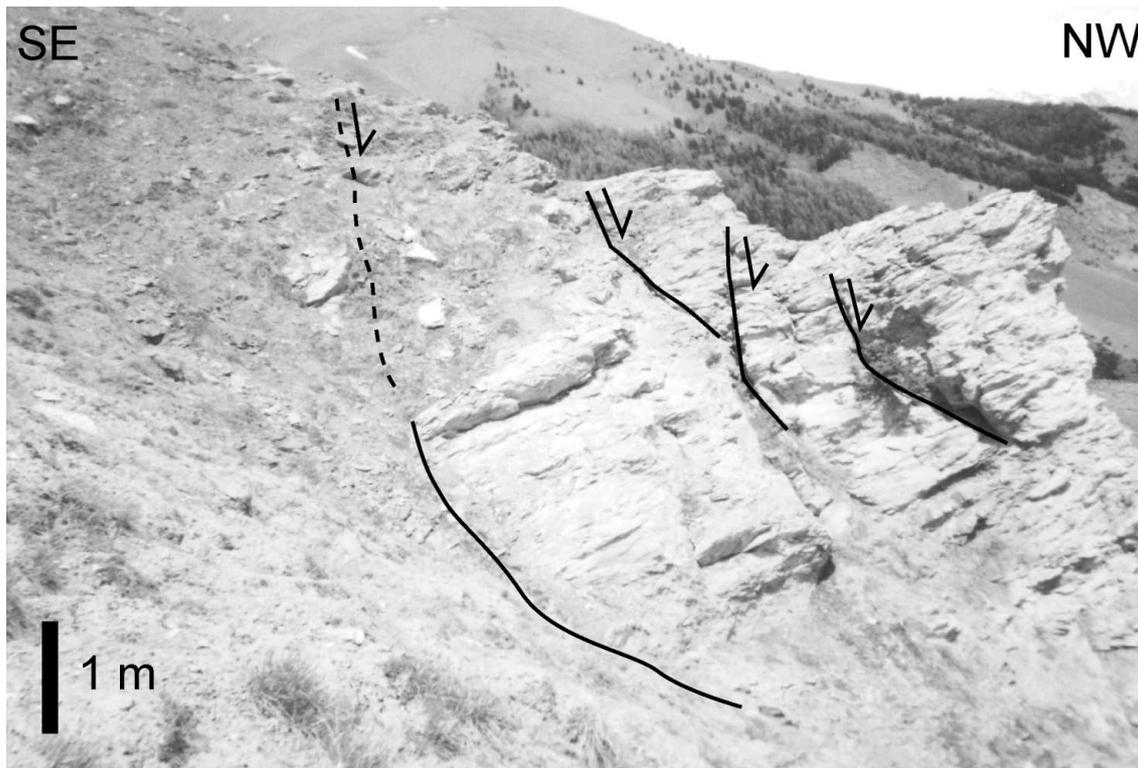


Figure 4-32. Paquets glissés en contre-bas, sur l'ubac, de la crête de Soleil-Bœuf (mai 2000).

L'évolution de la coulée est, en partie, liée à l'évolution régressive du glissement, du fait du chargement constitué par les matériaux déstabilisés en crête.

En outre, tous les matériaux du glissement viennent s'accumuler en tête de la coulée de 1988 (un peu au-dessus de l'interfluve constitué par les torrents de la Valette et du Serre) de manière très importante. Ces matériaux ont déjà été remaniés, tout comme les matériaux de la coulée, et présentent donc des caractéristiques mécaniques résiduelles sur une pente qui se raidit localement. Ceci constitue donc une réserve de matériaux susceptibles d'être mobilisés par une coulée de boue en cas de forte pluie et/ou d'apport massif d'eau par la nappe contenue dans les flyschs de l'Autapie.

Certains de ces scénarios d'évolution ont été analysés avec l'aide de la simulation numérique.

4.2.3. Simulation numérique de quelques scénarios

4.2.3.1. Présentation du code de calcul utilisé : *FLAC*®

La modélisation numérique s'est appuyée sur le logiciel *FLAC* (versions 3.3 sous Unix et 4 sous Windows) développé par la société Itasca. Ce logiciel repose sur une formulation qui permet de calculer des déformations d'un milieu continu. La résolution de ce problème est réalisée suivant un mode explicite à l'aide des différences finies. Dans le cas présent, c'est la

version 2D du logiciel qui a été utilisée. Par conséquent, les déformations prises en compte sont des déformations planes sur une coupe du milieu défini.

Afin de modéliser un massif géologique, le milieu est discrétisé à l'aide d'un maillage constitué par des éléments de formes rectangulaires (que le logiciel gère comme deux demi triangles rectangles).

Une fois le milieu discrétisé, une solution peut être calculée à condition d'avoir préalablement défini les conditions aux limites du modèle, les conditions initiales, et les lois de comportement du milieu. Il existe des lois de comportement classiques enregistrées dans le logiciel qui peuvent être complétées ou modifiées.

Un comportement élastique peut être retenu par l'intermédiaire de deux paramètres K (module de compressibilité) et G (module de cisaillement) qui sont dérivés de la loi de Hooke :

$$K = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)} \quad \text{Équation 4-1}$$

$$\text{et } G = \frac{E}{3 \times (1 - 2 \cdot \nu)} \quad \text{Équation 4-2}$$

avec E : module de Young et ν : coefficient de Poisson.

Dans le cas du modèle élasto-plastique, une fonction de charge $f = 0$ définit le critère de plasticité (critère de Mohr-Coulomb), et une fonction potentiel plastique $Q = 0$ définit la loi d'écoulement plastique.

Par ailleurs, un modèle peut être constitué de plusieurs régions (ou maillages) différentes reliées entre elles par des liens (virtuels) fixes ou des interfaces autorisant des mouvements, en accord avec les critères mécaniques imposés pour ces interfaces.

Ces interfaces sont destinées à relier deux maillages entre eux. Ces deux régions peuvent se justifier par l'existence d'une lithologie différente, ou bien, par l'application d'une taille de maille différente en fonction de l'objet à traiter.

4.2.3.2. Paramètres utiles à la modélisation des scénarios

La génération de la grille s'effectue sur la base d'une coupe jugée représentative de l'objet à étudier, dans le cas présent le glissement-coulée de la Valette (cf. Annexe 4-20).

Cette coupe intègre les différentes couches géologiques présentes sur le site, c'est à dire à la base les Terres Noires callovo-oxfordiennes, chevauchées par le Flysch Dissocié de la nappe de l'Autapie. L'écaille de calcaire planctonique de la nappe du Pelat n'a pas été intégrée en raison du peu d'informations (avant glissement) sur sa dimension et sa position cartographique précise. De plus, sa dimension est relativement réduite, et donc difficile à incorporer dans un modèle 2D représentant la totalité du glissement-coulée. Les unités concernant le glissement reprennent celles qui figurent sur la carte en Figure 4-13, et qui sont inspirées des données de vitesses mesurées par le R.T.M. et par les données de terrain (cf. Figure 4-33).

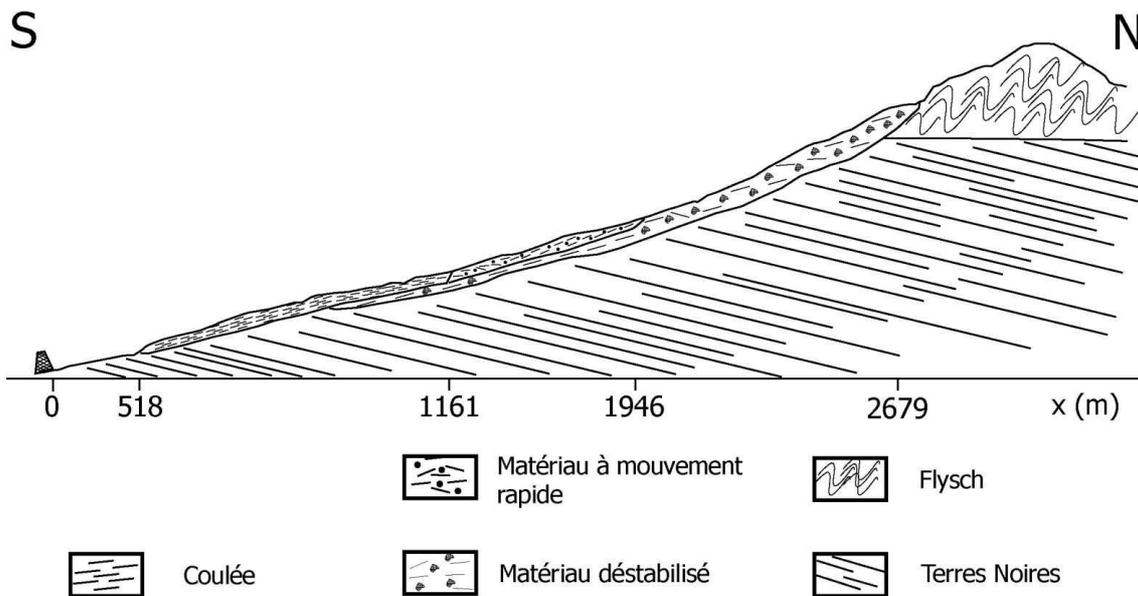


Figure 4-33. Coupe de principe retenue pour la simulation numérique.

La génération de la grille a été intégrée dans un processus "semi-automatisé" faisant appel à des tables dans lesquelles ont été stockées les coordonnées topographiques. L'ajout des tables a permis d'optimiser la génération de la grille en externalisant les informations relatives au terrain. Ainsi la grille est générée plus rapidement à chaque modification apportée.

Une autre routine a permis d'adapter les différentes régions même si les tables étaient de tailles différentes. Cependant, dans le cas de la Valette, avec la présence du chevauchement, quelques corrections manuelles ont été nécessaires. Cette méthode permet de modifier la grille plus rapidement en fonction des éléments de terrain à intégrer ou à réévaluer.

En outre, grâce à une autre routine, la position de la nappe et/ou d'un front d'infiltration a pu être intégrée dans le modèle afin de tenir compte des poids spécifiques en conditions naturelles et saturées.

Avant la modélisation de scénarios de montée de nappe et de descente d'un front d'infiltration, une étape préalable est cependant nécessaire. Il s'agit d'une étape qui peut être qualifiée de "consolidation", et qui consiste à appliquer la gravité au modèle. Ensuite seulement, le travail de modélisation de scénarios, à proprement parler, peut débuter.

Toutes les situations des calculs menés dans ce travail ont été réalisées avec un modèle élasto-plastique (dit de Mohr-Coulomb), en grands déplacements afin que le logiciel autorise une actualisation des coordonnées des mailles de sorte que les déplacements des matériaux ne stoppent pas immédiatement le calcul.

Enfin, les paramètres mécaniques nécessaires à la modélisation (cf. Tableau 4-1) ont été affectés en tenant des résultats des essais de caractérisation (cf. Chapitre 2), des références bibliographiques (Phan 1993, Maquaire et al 2003), et en procédant par rétro-analyse, considérant les conditions de déclenchement du glissement-coulée de la Valette.

	γ (kN.m ⁻³)	γ_{sat} (kN.m ⁻³)	C (kPa)	ϕ (°)	E (Mpa)	ν
Coulée	17	19	25	30	1	0,33
Matériau à mouvement rapide	18	20	20	25	10	0,33
Matériau remanié	19	21	50	38	300	0,33
Terres Noires	25	25,1	1000	38	10000	0,30
Flysch dissocié	23	24	2000	40	100000	0,25

Tableau 4-1. Caractéristiques mécaniques utilisées pour la constitution de la grille.

4.2.3.3. Influence de la montée d'une nappe

Le scénario le plus simple est la montée de la nappe seule, en considérant que la nappe contenue dans le flysch dissocié (de la nappe de l'Autapie) sature progressivement les terrains mobilisés par le glissement-coulée.

Dix situations de nappe ont été retenues, depuis la base de la coulée jusqu'à la dernière rangée de mailles. Les calculs sont faits en imposant une surface piézométrique définie par l'utilisateur.

En situation basse, la nappe (dans la coulée) n'a que très peu d'influence sur les déplacements et sur l'état de plasticité du matériau. Ceci correspond plus ou moins à la situation actuelle, avec des déplacements locaux et modérés, ainsi qu'une présence d'eau très ponctuelle.

Le matériau peut entrer en plasticité suivant deux modes importants pour un modèle élasto-plastique, soit en cisaillement, soit en traction. L'alignement de plusieurs mailles en plasticité correspond à une surface de rupture en cours de constitution suivant un processus de localisation progressive des déformations, conduisant éventuellement à la rupture.

En revanche, lorsque le niveau de la nappe monte, les matériaux de la coulée commencent à être remobilisés, et la plasticité des régions constitutives de la coulée se développe. La mobilisation n'est pas homogène, mais commence par des zones où la pente varie pour s'accroître légèrement ou alors au niveau de la tête de la coulée (cf. Figure 4-34). Cette zone, à la tête de la coulée et à la base de la partie en glissement, correspond à la zone, de la coulée, où la pente est la plus marquée et l'épaisseur de matériaux instables la plus importante.

Cependant, le fait que l'accélération des matériaux ainsi que leur état de plasticité se développent pour gagner la zone de contact avec les "matériaux à mouvement rapide" démontre le caractère régressif de la phase de rupture, conduisant ainsi au déclenchement complet de la coulée. En outre, la répartition des indicateurs de plasticité a révélé que ces derniers se concentrent au niveau de la base de la coulée, libérant ainsi le mouvement des matériaux du corps de la coulée (cf. Figure 4-35).

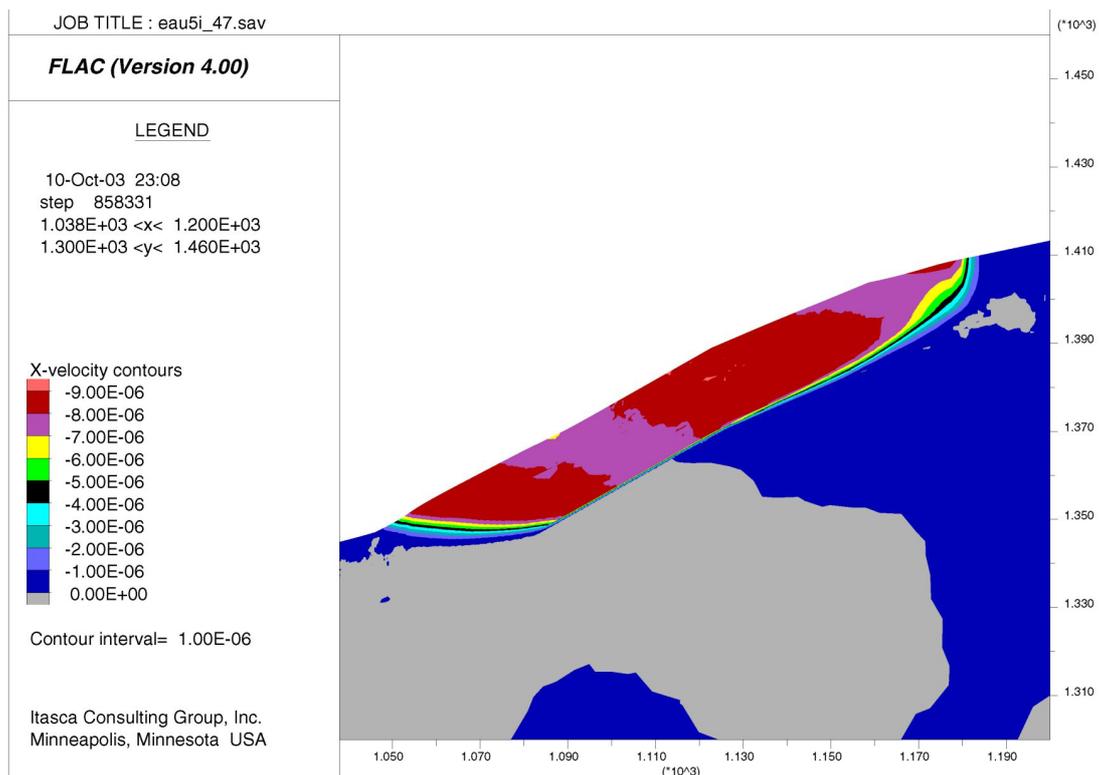


Figure 4-34. Augmentation des vitesses de déplacement lorsque la nappe sature à moitié les matériaux de la coulée.

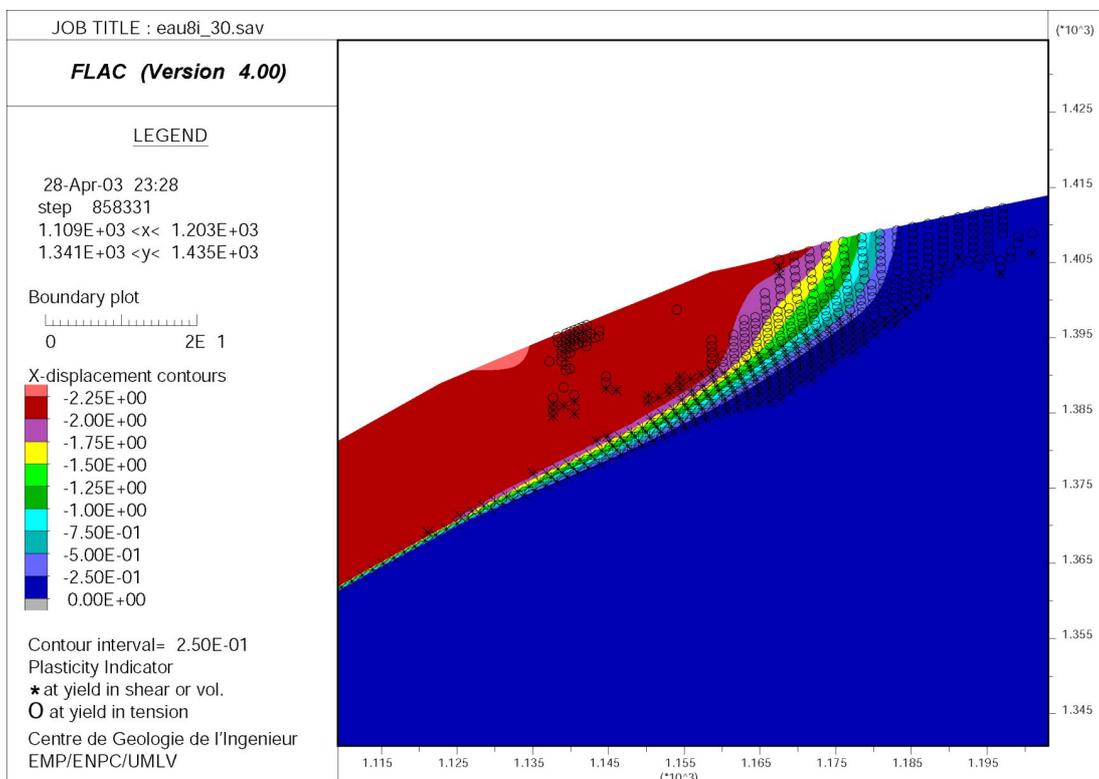


Figure 4-35. La nappe sature presque totalement les matériaux de la coulée (la nappe est à -2 mailles de la surface topographique) et la plasticité se développe.

Dans ce cas, lorsque les indicateurs de plasticité se développent, nous pouvons constater que ceux-ci semblent s'aligner pour définir une surface de rupture. Les indicateurs de plasticité en cisaillement se concentrent en base de coulée, au niveau du changement de taux de déplacement, alors que ceux de traction se situent en tête, en débordant légèrement dans les matériaux à mouvement rapide qui commencent à se déplacer vers l'aval.

A partir de ce moment, le calcul est stoppé. Les déplacements deviennent tellement importants que les mailles présentent un taux de déformation trop important pour que le logiciel puisse continuer à calculer une solution. Cette situation correspond donc au moment où la coulée entre, en quelque sorte, dans sa phase d'écoulement.

L'influence de la nappe sur la coulée peut être visualisée et résumée par trois paramètres :

- l'analyse des déplacements,
- l'évaluation du facteur de sécurité,
- et le suivi de la plasticité.

Le premier est l'analyse des déplacements de la coulée en fonction de la hauteur de la nappe (cf. Figure 4-36).

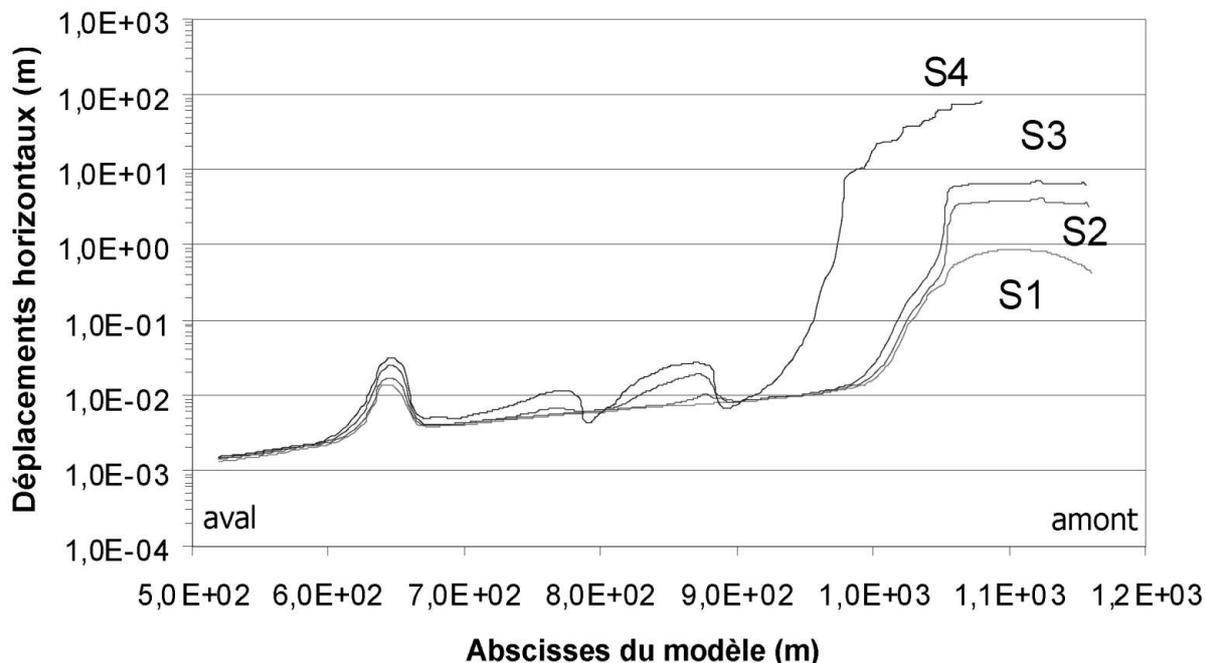


Figure 4-36. Variations des déplacements horizontaux en fonction de l'abscisse du profil pour 4 situations de nappe. "S1" correspond à la situation de nappe basse et "S4" à la situation de nappe la plus haute simulée.

Les déplacements ne paraissent pas augmenter de façon homogène, et se concentrent sur les ruptures de pente topographique. Pour la situation "S4", la courbe des déplacements n'est pas

complète car elle correspond à la situation où les calculs dépassent les tolérances géométriquement admissibles par le logiciel. Cependant, nous pouvons constater que les déplacements se font plus forts au niveau de la zone d'initiation de la coulée, et semblent s'accélérer nettement quand la nappe est en position haute.

Un autre moyen de suivre indirectement l'influence de la montée de la nappe sur la stabilité est l'évaluation du facteur de sécurité local. A l'aide d'une routine, il a été possible d'évaluer le facteur de sécurité sur l'ensemble des mailles d'une région ou d'une zone. Cette routine a été rédigée en prenant appui sur la formulation suivante :

$$F_S = \frac{C' + (\sigma - u) \times \tan \varphi}{\tau} \quad \text{Équation 4-3}$$

avec σ et τ composantes du vecteur contrainte agissant sur les facettes portées par la surface de rupture en cours de formation. Ces composantes sont déterminées à partir des valeurs de σ_{xx} , σ_{yy} et τ_{xy} fournies par le logiciel.

En appliquant cette routine sur le modèle du glissement-coulée de la Valette, il apparaît clairement que le facteur de sécurité local (c'est à dire au niveau de chaque maille) est inférieur à 1 en de nombreuses zones, alors que le coefficient de sécurité global, obtenu par des méthodes classiques de calculs à la rupture (logiciel Carter, développé par le CGI), est supérieur à 1 (cf. Figure 4-37). Cette observation rend compte du processus de localisation des déformations et de rupture progressive.

La montée de la nappe contribue nettement à l'abaissement du facteur de sécurité, aussi bien en base ($j_2 = 67$) qu'à l'intérieur de la coulée ($j_2 = 76$). En effet, entre les abscisses 500 et 1100 m, le facteur de sécurité local présente de nombreuses zones en-dessous de 1. Ceci correspond aux zones présentant des forts déplacements à l'origine de la déstabilisation générale.

Pour les abscisses supérieures à 1100 m, le facteur de sécurité présente de nombreuses zones proches de 1, donc a priori proche de la déstabilisation. Ces zones deviennent donc des sources potentielles d'alimentation supplémentaire de matériaux en cas de départ d'une coulée. C'est pourquoi, une fois la déstabilisation de la coulée obtenue par le calcul, nous avons considéré la coulée en phase d'écoulement. Donc les régions la représentant ont été retirées du maillage général. Lorsque le calcul a été relancé, la zone des matériaux à mouvement rapide a brutalement été déstabilisée au point de stopper à nouveau le calcul. Ceci confirme donc le fait qu'en cas de déclenchement d'une coulée de boue, la déstabilisation des matériaux juste en amont serait quasiment instantanée.

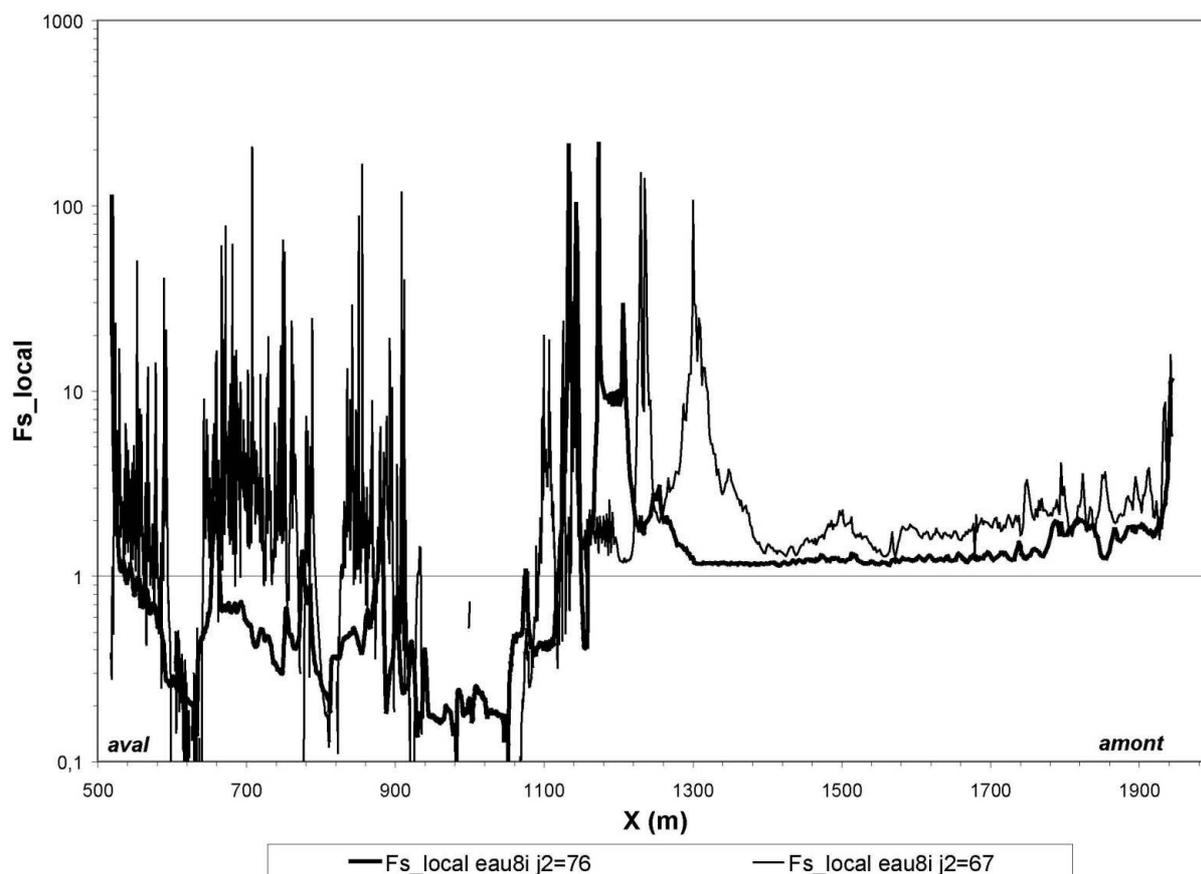


Figure 4-37. Influence de la montée de la nappe sur le facteur de sécurité local

eau8i correspond à une situation où la nappe est à -2 m du terrain naturel ; *j2=67* correspond au niveau de mailles formant la coulée et *j2=76* au niveau de mailles à -2 m par rapport au terrain naturel au niveau de la coulée.

L'influence de la montée de la nappe peut enfin être mise en évidence par un troisième critère qui souligne le caractère complexe de l'appréciation d'un seuil piézométrique critique. Il s'agit d'un indicateur basé sur les indices de plasticité fournis par le logiciel.

Cet "Indicateur global de plasticité" est déterminé à partir de l'application d'une routine comptabilisant le nombre de mailles entrées en plasticité (cisaillement et traction) ramené au nombre de mailles total pour un niveau donné (cf. Figure 4-38).

Cette représentation souligne clairement le caractère exponentiel du développement de la plasticité, et par voie de conséquence l'existence d'un seuil piézométrique critique difficile à appréhender même dans le cas où la zone serait équipée de piézomètres.

D'autre part, la déstabilisation des matériaux de la coulée a des conséquences sur l'ensemble du glissement, et notamment en tête. En observant la niche d'arrachement et son contexte, il est possible d'observer des processus de déstabilisation prononcés. En effet, les déplacements au niveau de la niche d'arrachement s'accroissent, et des processus de ruptures régressives semblent se développer à ce niveau et légèrement en retrait de celle-ci (cf. Figure 4-39).

Dans ce cas, les déplacements sont importants au niveau de la niche d'arrachement, et au moins deux séries d'indicateurs de plasticité semblent délimiter des surfaces de ruptures en arrière de la niche. En outre, des indicateurs de plasticité semblent s'aligner verticalement, encore plus en amont des précédents, délimitant ainsi des fractures verticales potentielles, qui à terme vont faciliter l'évolution régressive du glissement.

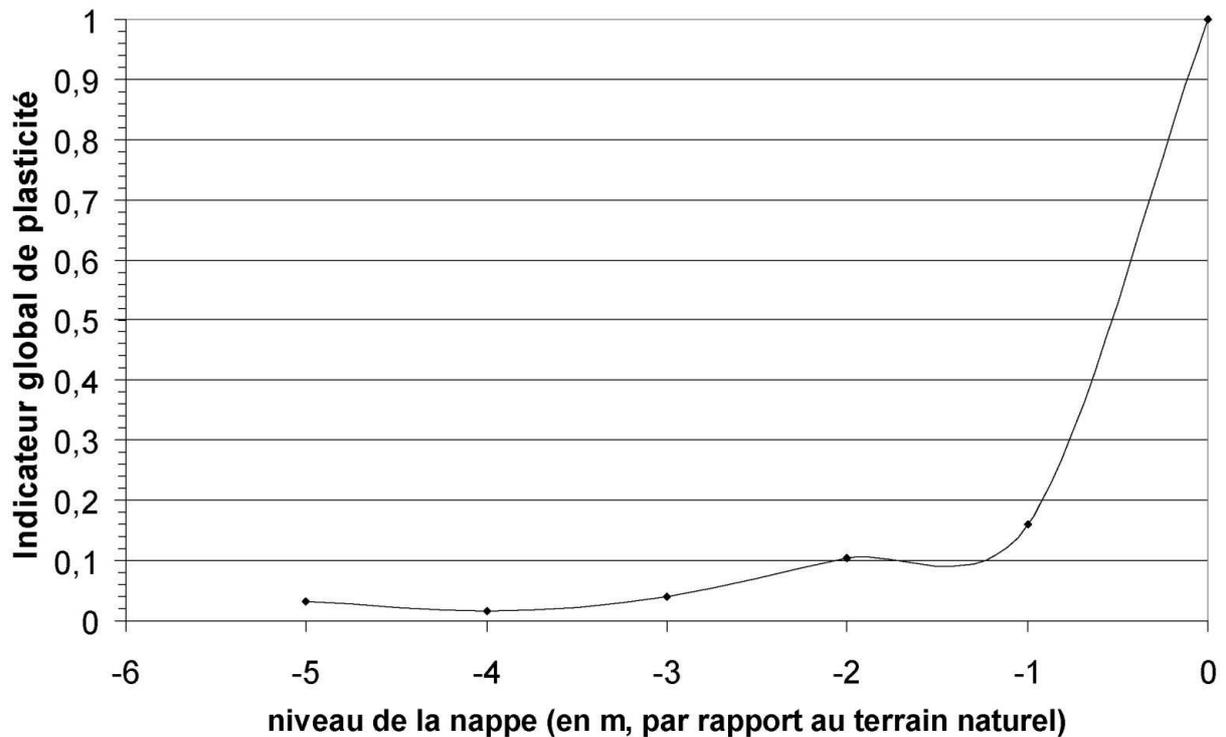


Figure 4-38. Evolution de la plasticité en fonction de la hauteur de la nappe, pour la coulée à sa base.

4.2.3.4. Influence de la descente d'un front d'infiltration

Le principe de simulation reste le même que pour la simulation de la montée d'une nappe. La gestion d'un front d'infiltration, avec une nappe qui ne varie quasiment pas en base de coulée, s'effectue au moyen d'une routine affectant des densités différentes (γ et γ_{sat}) suivant la position du front d'infiltration dont les coordonnées ont été préalablement intégrées dans une table.

Les conséquences de la descente d'un front d'infiltration reposent sur les mêmes principes de déstabilisation. Cependant, la rupture semble atteinte pour une saturation totale, et les effets sont concentrés quasiment uniquement sur les ruptures de pentes et sur la zone de départ de la coulée de 1988. En revanche, comme pour le cas de la montée de nappe, la déstabilisation affecte également les matériaux voisins, proches de ceux de la coulée (cf. Figure 4-40).

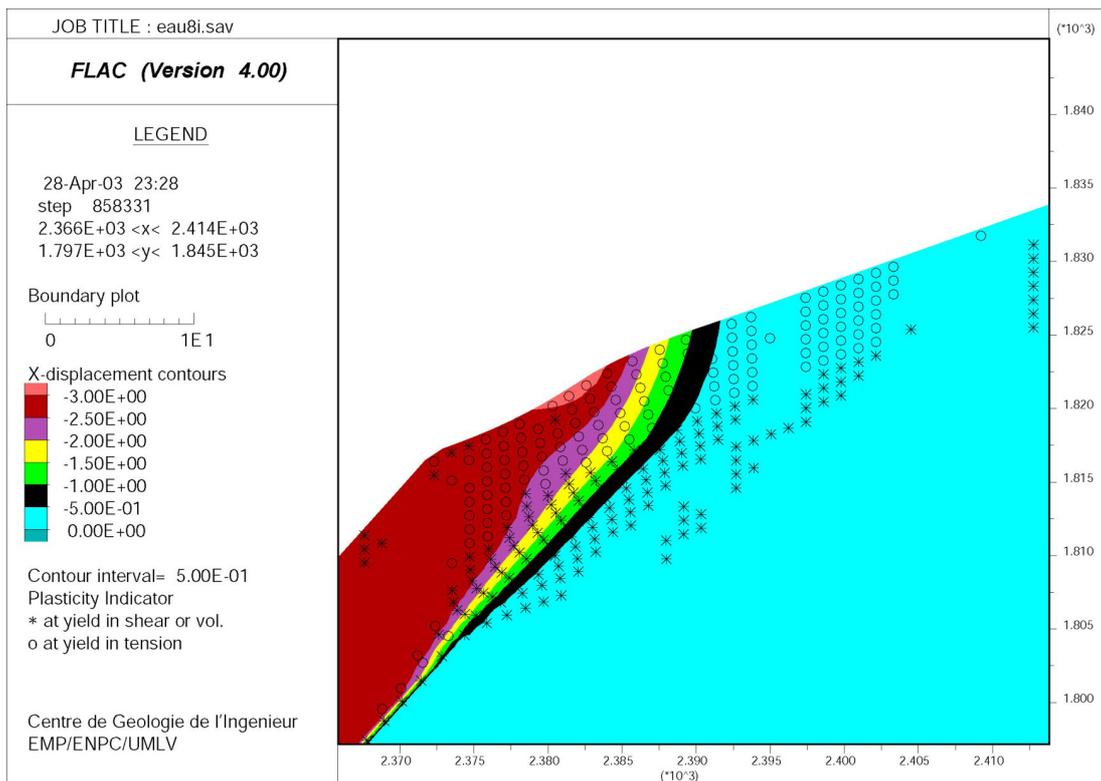


Figure 4-39. Développement d'une rupture progressive dans les flyschs, en amont de la niche d'arrachement (lorsque la coulée commence à être saturée, et que les déplacements s'accélèrent).

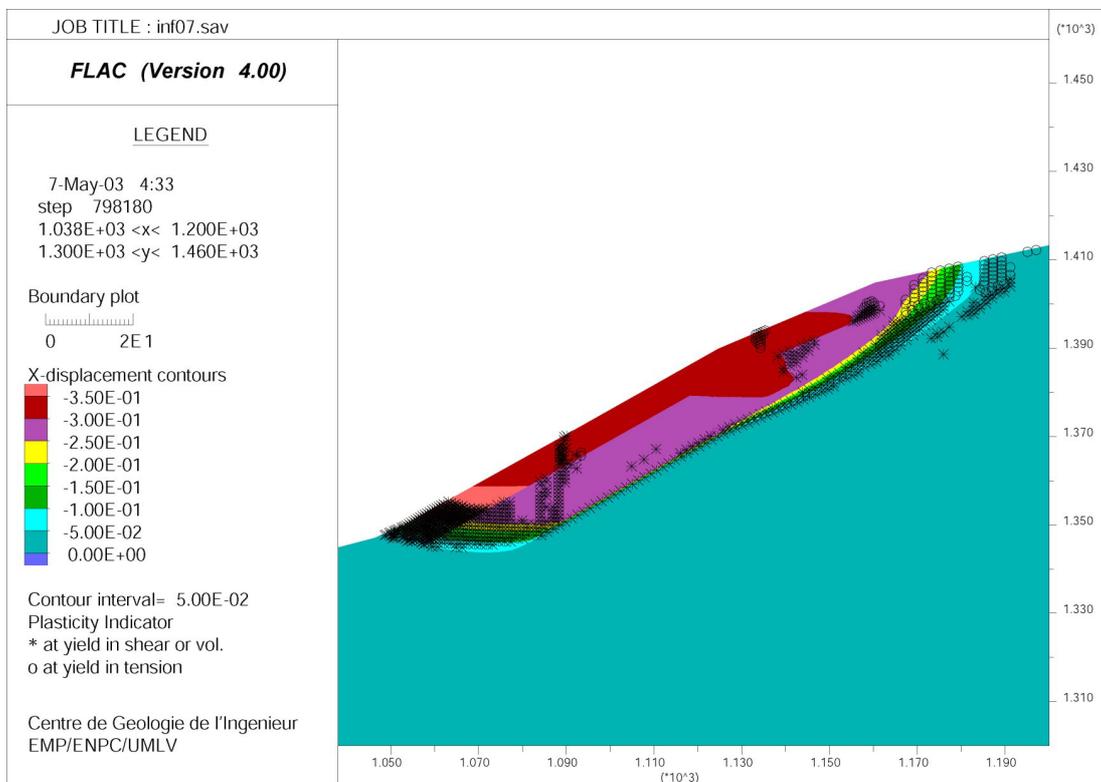


Figure 4-40. Saturation totale des matériaux de la coulée par un front d'infiltration avec une nappe en base de coulée.

La descente d'un front d'infiltration apparaît donc, comme la montée du niveau piézométrique, comme un agent déstabilisateur. Cependant, son influence est plus modérée que celle de la montée de la nappe.

4.2.3.5. Conclusions

Pour le glissement-coulée de la Valette, ces simulations numériques ont permis de confirmer que la montée de la nappe phréatique contenue dans les flyschs et la saturation des matériaux superficiels par la descente d'un front d'infiltration constituaient bien des agents susceptibles de réactiver une coulée boueuse. Etant donné la configuration du site, il est fort probable que son ampleur serait comparable, ou même supérieure, à celle de 1988.

Signalons que la zone d'initiation est de forme concave, ce qui induit des écoulements souterrains latéraux qui viennent alimenter l'instabilité. Dans ce cas, l'effet tridimensionnel provoque une augmentation des charges hydrauliques dans la zone centrale, ce qui n'est pas pris en compte par un modèle numérique bidimensionnel (Tullen, 2002).

Enfin, nous soulignons que ces modélisations doivent être comprises comme une illustration numérique des conditions de déclenchement et d'évolution du glissement-coulée de la Valette.

4.2.4. Evolutions et synthèse sur le glissement-coulée de la Valette

Actuellement, bien que le glissement-coulée soit moins actif, il reste des zones soumises à d'importants efforts de cisaillement. La masse affectée par le glissement semble en mouvement très lent ou en équilibre précaire. C'est pourquoi, étant donné les enjeux en aval du glissement-coulée (zone pavillonnaire et route départementale), les travaux de contrôle et d'alerte sont maintenus. Leurs coûts, par rapport aux enjeux (un peu plus de 700 personnes et de nombreuses infrastructures), restent modérés face aux volumes à considérer sur le site. Les dépenses engagées restent inférieures à 1 million d'Euros depuis le déclenchement du glissement (d'après données O.N.F.-R.T.M.).

L'évolution du glissement-coulée est bien surveillée, mais les volumes déplacés, à long terme, pourront éventuellement poser de nouveaux problèmes pour l'urbanisation en aval. De plus, ce glissement-coulée s'inscrit dans un contexte plus large (l'ensemble du bassin de Barcelonnette) de glissements dans les Terres Noires conduisant à la fissuration de nombreux bâtiments et de routes.

Le déclenchement du glissement-coulée de la Valette est clairement lié à l'eau, mais de nombreux facteurs géologiques et géomorphologiques ont favorisé son déclenchement et son évolution régressive et latérale (cf. Figure 4-41 et Figure 4-42).

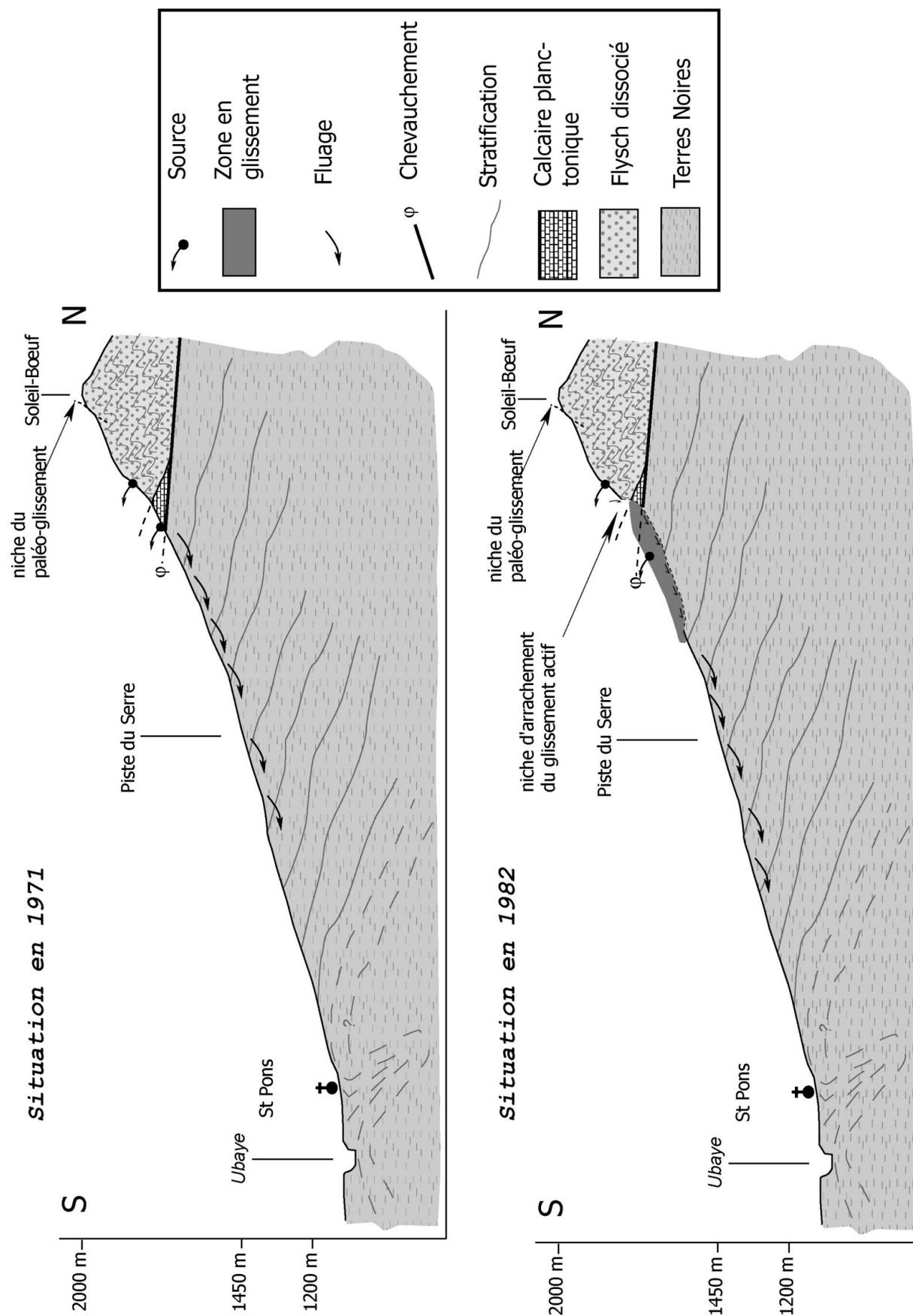


Figure 4-41. Le site de la Valette, en coupe, avant déclenchement du glissement et son initiation en 1982 (la situation en 1971 prend appui sur les photographies aériennes I.G.N.).

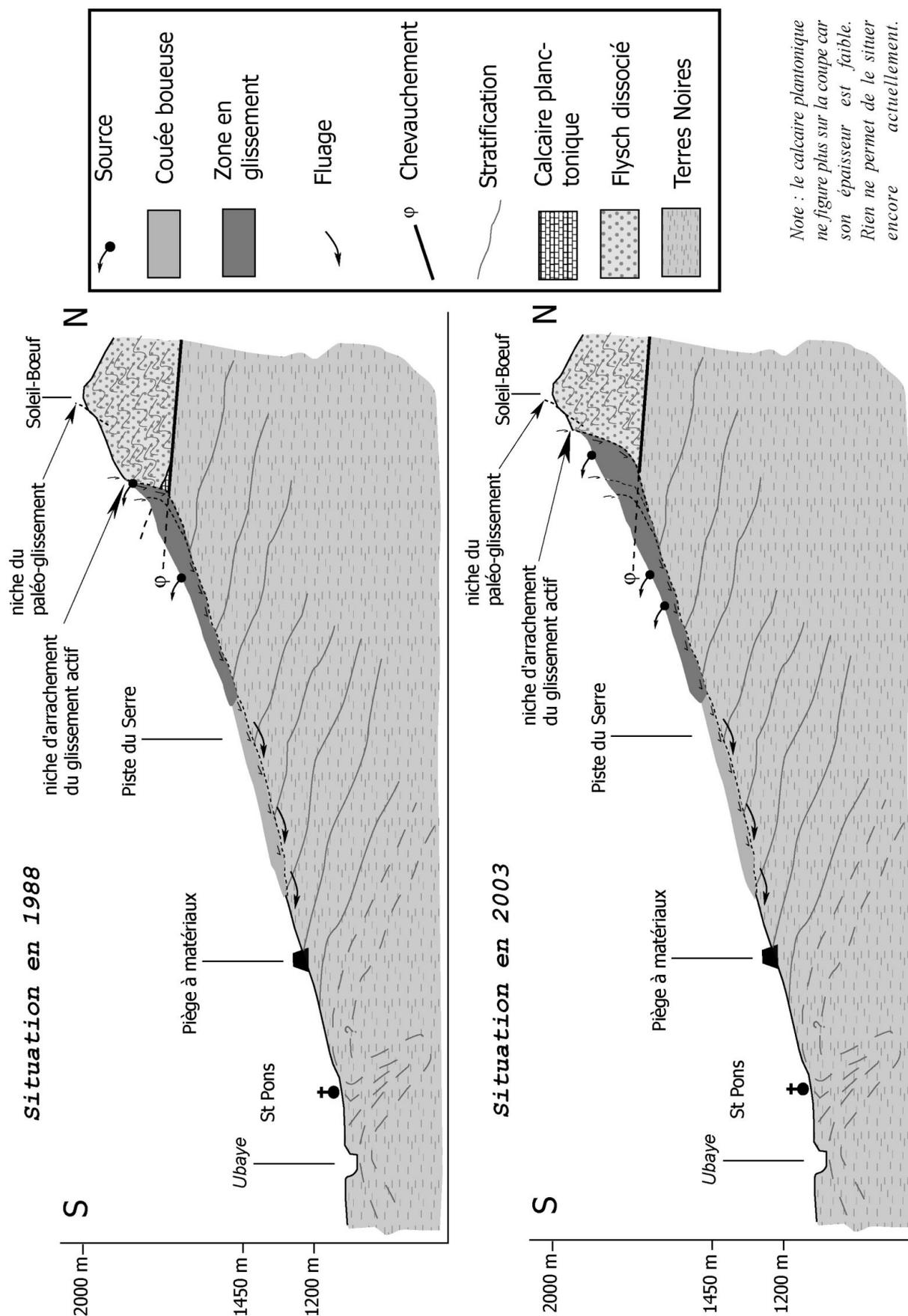


Figure 4-42. Le site de la Valette, vues en coupe, au moment du déclenchement de la coulée boueuse et son évolution à ce jour.

4.3. Les différentes instabilités (sur l'Adroit de Barcelonnette)

L'Adroit de Barcelonnette, c'est à dire l'adret surplombant la ville de Barcelonnette, connaît de nombreux cas d'instabilité et de maisons fissurées dont quelques unes ont été évacuées.

Ce versant présente de nombreux problèmes de stabilité (cf. Figure 4-43) et des phénomènes torrentiels actifs conduisant parfois au déclenchement et aux dépôts de produits de laves torrentielles.

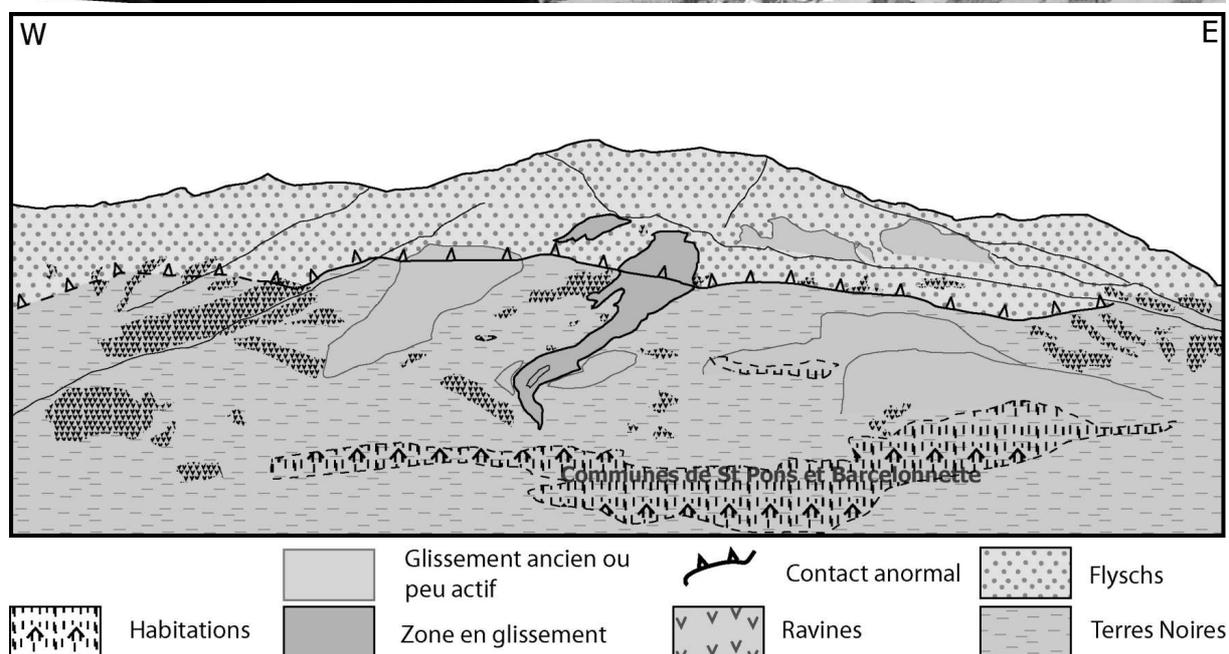


Figure 4-43. Panorama de l'Adroit de Barcelonnette (clichés octobre 2002).

Ces différentes instabilités correspondent à des processus de glissement et de fluage qui restent relativement superficiels, et affectent les Terres Noires altérées et les couvertures morainiques.

Dans certains cas, l'importance de la couverture glaciaire masque une paléo-topographie contrôlant des écoulements d'eau souterraine et des infiltrations à l'origine de ces instabilités localisées (Maquaire et al 2001, et Ducreux 2002).

Ces instabilités semblent donc être liées d'une part à la faiblesse des paramètres mécaniques des formations concernées (moraines et Terres Noires altérées), et d'autre part à l'accumulation d'eau dans certaines zones.

Les circulations d'eau ont plusieurs origines. La première est naturelle avec les pluies et les sources jalonnant le chevauchement marnes/flyschs et infiltrant les formations superficielles. La seconde est liée à la présence d'infrastructures parfois défailtantes, ou non reliées à un système d'évacuation d'eaux usées.

Dans le cas de la ré-infiltration des eaux provenant de la nappe contenue dans les flyschs dissociés, il est à noter qu'au niveau du petit glissement situé entre la piscine et le lycée (cf. Annexe 4-21), des suintements d'eau présentant des conductivités élevées ont pu être mesurées en mai 2001.

En ce qui concerne les problèmes d'infrastructures, ils se manifestent, par exemple, sur le versant avec la présence d'anciens systèmes d'irrigations peu ou pas entretenus, partiellement utilisés par moment, et présentant des pertes qui vont alimenter des micro-instabilités en aval. A ceci, il faut ajouter des infrastructures comme la piscine de Barcelonnette dont le trop-plein n'était pas relié aux eaux usées (Ducreux, 2002).

Il apparaît donc clairement que l'entretien des réseaux de circulation d'eau (fossés, eaux usées, irrigation) doit être traité avec la plus grande rigueur possible afin de ne pas amplifier les phénomènes actuels qui restent, malgré les nombreuses instabilités post-glaciaires existantes, relativement superficielles.

4.4. Rôle de l'eau sur les versants de Terres Noires et conclusions

4.4.1. Importance de la maîtrise de l'eau sur les versants

L'eau apparaît donc sur l'ensemble de la zone étudiée comme un agent fortement décisif dans la gestion des instabilités et autres phénomènes torrentiels. En effet, la relation entre les glissements-coulées (de Poche et de la Valette) et l'eau est largement visible sur le terrain, et est confirmée par les simulations numériques. Outre l'importance des infiltrations des eaux de pluies et des autres eaux superficielles, la prise en compte de la nappe apparaît comme fondamentale dans la gestion des instabilités de la région de Barcelonnette.

L'eau agit à différentes échelles, puisqu'elle affecte des instabilités superficielles. Elle contribue à la mobilité des coulées boueuses, et favorise l'avancée des glissements et de leurs évolutions régressives. Elle est donc un agent influant sur la stabilité de l'ensemble du versant.

En effet, la déstabilisation du glissement-coulée de la Valette commence à concerner la totalité du versant depuis l'Ubaye jusqu'à la crête de Soleil-Bœuf. En outre, la gestion des eaux de ruissellement sur le glissement-coulée de la Valette a nettement permis de diminuer les déplacements des matériaux mobilisés.

4.4.2. Rôle de l'héritage glaciaire et périglaciaire du versant

Sur l'ensemble de la fenêtre de Barcelonnette, l'héritage glaciaire est présent avec les formes et formations corrélatives, en particulier sous la forme d'une couverture morainique souvent superficielle.

Il est probable que durant cette période, des mouvements de versant de faible ou moyenne ampleur se sont réalisés. Par la suite, de nombreuses retouches ont été apportées au paysage lors de la période post glaciaire, avec l'apparition de nouvelles formes d'érosion, la réactivation d'anciens glissements ou le déclenchement de nouveaux.

Ainsi, de nombreuses instabilités actuelles peuvent être interprétées comme des réactivations partielles, ou totales, d'instabilités d'origine glaciaire ou post-glaciaire.

Les instabilités actuelles affectant des matériaux présentant des caractéristiques mécaniques affaiblies ou résiduelles, les contraintes seuils nécessaires à la génération de processus tels que les glissements-coulées s'en trouvent abaissées.

Conclusion générale

Au cours de cette étude, le but a été de présenter une méthode pluridisciplinaire basée sur l'approche de certains types de processus de déstabilisation de versant. Afin d'illustrer la problématique des glissements-coulées, la région de Barcelonnette a été choisie dans le cadre de cette étude.

Dans un premier temps, le processus de glissement-coulée a été défini comme un mode complexe de déstabilisation de versant associant deux ensembles de caractéristiques cinématiques et rhéologiques différentes qui peuvent être considérées séparément, comme deux processus complets de mouvement de versant.

Les glissements-coulées sont donc des processus faisant appel à une phase de glissement qui va évoluer, en aval, de manière relativement rapide en coulée boueuse. Néanmoins, ce type de processus ne peut se mettre en place que dans des conditions relativement particulières. En effet, il s'apparente à un comportement proche de la thixotropie, puisque le passage entre un comportement élastoplastique (le glissement) et la phase viscoplastique (la coulée de boue) est relativement rapide.

Cependant, le phénomène de glissement-coulée semble résulter de plusieurs paramètres essentiels et communs à différents sites affectés par celui-ci. Ces paramètres sont d'ordres géomorphologique (pentes, dans certains cas exposition de la pente) et géologique (nature des formations et granulométrie avec une phase fine importante, teneur en eau importante).

Malgré tout, la connaissance de détail de ces processus est perfectible, étant donné leur complexité et le manque de paramètres nécessaires pour les décrire. Par ailleurs, cette complexité s'exprime aussi dans la détermination des processus par rapport à telle ou telle classification de mouvements de versant. Il apparaît donc aussi souhaitable de rattacher le processus étudié à une classification précise et référencée.

La vallée de Barcelonnette est une région alpine qui présente un contexte particulier puisqu'elle est une vaste zone où affleure des marnes du Callovo-oxfordien (les Terres Noires) ceinturées par deux nappes de Flysch à Helminthoïdes (la nappe de l'Autapie et la nappe du Parpaillon) dont l'érosion est à l'origine de la fenêtre tectonique. C'est au niveau de cette fenêtre que les glissements-coulées ont lieu. Les matériaux impliqués dans ces instabilités présentent des caractéristiques mécaniques faibles. De ce fait, ils sont très sensibles à l'altération. De plus, lorsque les cristaux de pyrite contenus dans les Terres Noires sont soumis à l'altération, ils produisent des sulfates et contribuent à la déstructuration de la roche. Ce processus semble être un point particulier de ces marnes du Callovo-oxfordien, et

s'apparente fortement aux phénomènes des argiles gonflantes. Ceci a pour conséquence de créer des conditions favorables à la génération de coulées boueuses.

Les formations allochtones présentent une minéralogie légèrement différente, mais leur faciès macroscopique et leur résistance mécanique demeurent relativement proches de ceux des Terres Noires.

D'autre part, étant donné le rôle prépondérant de l'eau dans ce type de processus, une analyse hydrogéologique de terrain a été entreprise afin de mieux cerner le fonctionnement de ces versants.

Sur le glissement-coulée de Poche, le fonctionnement des sources a montré que l'alimentation en eau pouvait être de deux ordres. Une alimentation superficielle d'une part, et une alimentation plus profonde marquée par des conductivités élevées d'autre part.

En ce qui concerne le glissement-coulée de la Valette, les analyses hydrogéologiques de terrain ont permis de mettre en évidence la présence sur le site d'un aquifère mutli-couche alimentant les matériaux du glissement. Ce fonctionnement est valable pour l'ensemble du versant avec le paléo-glissement de la Chalanche. Ceci tendrait aussi à confirmer que, malgré l'efficacité non négligeable des drains superficiels, les drains forés sub-horizontalement dans la nappe de l'Autapie pourraient être aussi des voies intéressantes pour limiter la mise en charge hydraulique du glissement-coulée. Des essais de traçage pourraient, dans ce cas précis, permettre de déterminer la zone d'appel dans les flyschs et la comparer avec la zone d'influence de drains. Ceci permettrait de définir l'intérêt réel que pourrait avoir ce genre de dispositifs qui sont relativement coûteux à mettre en œuvre.

De plus, ce type de configuration a aussi été rencontrée sur d'autres versants déstabilisés dans les Alpes. Ceci conforte bien le fait que l'alimentation, ou d'une manière générale, la problématique de l'eau dans un glissement doit s'envisager à plusieurs échelles : une échelle locale traitant les eaux plus superficielles et une échelle beaucoup plus grande au niveau du versant hydrogéologique, afin de limiter les apports des nappes profondes pouvant contribuer à l'alimentation de la zone glissée.

Enfin, une analyse détaillée du contexte géologique et du développement des deux glissements-coulées retenus (celui de Poche et de la Valette) a permis de dégager des scénarios d'évolution possible.

En effet, pour ces deux sites, nous avons identifié deux grands types de scénarios d'évolution. Celui qui présente la menace la moins directe est l'évolution régressive et latérale, cependant ces processus ont tendance à augmenter nettement la surface instable et à perturber l'ensemble du versant. La deuxième grande hypothèse est la réactivation de la coulée de boue. Cette dernière représente une menace importante pour les populations par les volumes importants et leur mobilité importante. Leur possibilité d'étalement ou de formations d'embâcle représentent des situations dangereuses aussi bien pour les populations que pour les infrastructures.

Afin de préciser davantage ces scénarios, nous avons mis en œuvre des techniques de modélisation à l'aide d'un logiciel de calcul en déformation (en différences finies). Ceci a

permis de confirmer certaines hypothèses d'évolution et de réaction face à une montée de nappe ou une descente de front d'infiltration. En outre, l'analyse des résultats de cette modélisation a permis de mettre en évidence l'existence d'un seuil dans la remobilisation des matériaux confirmant ainsi la difficulté d'une prévention basée uniquement sur le niveau piézométrique.

Cependant, le comportement de la coulée et des matériaux susceptibles d'être mobilisés lors d'un tel épisode ont un comportement de type visqueux. C'est pourquoi des calculs faisant intervenir la viscosité seraient souhaitables, afin de pouvoir préciser les scénarios de comportement des matériaux ainsi mobilisés. Cet aspect du calcul devra aussi sans doute s'accompagner de nouveaux essais visant à caractériser plus précisément le comportement mécanique des matériaux.

En outre, un relevé topographique précis, accompagné de modèles permettant une analyse tridimensionnelle, permettrait de mieux appréhender la stabilité du versant.

Au terme de ce travail, il apparaît clairement que les glissements-coulées sont des processus complexes de mouvements de versant. Ils comportent, malgré la multiplicité des cas, des caractéristiques communes qui doivent être approfondies d'un point de vue rhéologique et hydrogéologique. Cependant, la combinaison de moyens d'investigations de terrain sur le plan géologique et hydrogéologique permet une construction rapide et relativement précise de scénarios d'évolution de versant pouvant être utiles à la compréhension des processus et à la prévention. Il apparaît que cette démarche pluridisciplinaire, associant tout spécialement les méthodes de l'hydrogéologie et de l'hydrochimie, avec celles de la géologie, de la géomorphologie et de la géotechnique, peut être appliquée avec succès à l'étude des glissements-coulées, et plus généralement des glissements de terrain.

Références bibliographiques

ANDERSSON J.G. (1906) : Solifluction, a component of subaerial denudation. *Journal of Geology*, vol. 14, pp. 91-112.

ARTRU P. (1972) : Les Terres Noires du bassin rhodanien (Bajocien supérieur à Oxfordien moyen). Stratigraphie, sédimentologie, géochimie. Thèse de Doctorat en Sciences naturelles, Université Claude Bernard de Lyon, 1 vol., 181 pages.

ASCH (VAN) Th. W. J. et BUMA J.T. (1997) : Modelling groundwater fluctuations and the frequency of movement of a landslide in the Terres Noires region of Barcelonnette (France). *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 22, pp. 131-141.

AVENARD J.-M. (1990) : Sensibilité aux mouvements en masse (solifluxion). *Cahier ORSTOM, série Pédologie*, vol. XXV, n°1-2, pp. 119-129.

B.R.G.M. (1974) : Notice et carte géologique de Barcelonnette, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, carte XXXV-39, B.R.G.M.

BRUNSDEN D. (1984) : Mudslides. In *Slope instability*, Eds Brunsten D. et Prior D., Wiley, pp. 363-418.

BRUNSDEN D. et ISBEN M.-L. (1996) : Mudslides. In *Landslide Recognition (Identification, Movement and Causes)*, Eds Dikau R., Brunsten D., Schrott L. et Isben M.-L., Wiley, pp. 105-120.

BUFALO M. (1989) : L'érosion des Terres Noires dans la région de Buech (Hautes – Alpes, France). Thèse de Doctorat de Géologie, Université St. Jérôme d'Aix-Marseille, 1 vol., 230 pages

BUMA J. et VAN ASCH T. (1996) : Slide (Rotational). In *Landslide Recognition (Identification, Movement and Causes)*, Eds Dikau R., Brunsten D., Schrott L. et Isben M.-L., Wiley, pp. 43-62.

CAILLEUX A. et TRICART J. (1950) : Un type de solifluction : les coulées boueuses. *Revue de Géomorphologie dynamique*, vol. 1, pp. 4-46.

CANNON S. H., KIRKHAM R. M., PARISE M. (2001) : Wildfire-related debris-flow initiation processes. Storm King Mountain, Colorado. *Geomorphology*, vol. 39, pp. 171-188.

CHERUBINI C. et GIASI (1997) : The influence of vegetation on slope stability. *Proceedings International Symposium on Engineering Geology and the Environment* (Athènes, Grèce), Ed. Balkema Rotterdam, pp. 67-71.

COJEAN R. et BONNET-STAUB (1998) : Mécanisme d'initiation des laves torrentielles dans les Alpes françaises. *Comptes-rendus du 8^{ème} Congrès de l'AIGI, Vancouver (Canada), September 21-25*, Balkema, vol. 3, pp.2075-2082.

COLAS G. et LOCAT J. (1993) : Glissement et coulée de la Valette dans les Alpes de Hautes – Provence (Présentation générale et modélisation de la coulée). *Bulletin de liaison du Laboratoire des Ponts et Chaussées*, 187, Réf. 3710, pp. 19-28.

COMPAGNON F. (1996) : Approche hydrochimique des vitesses de déplacement d'un grand glissement de terrain : La Clapière (Alpes-Maritimes). *Mémoire de DEA de l'Ecole Supérieure de Géologie de Nancy*, 1 vol., 39 pages.

COMPAGNON F., GUGLIELMI Y., MUDRY J., FOLLACCI J.-P. et IVALDI J.-P. (1997) : Approche chimique et isotopique de l'origine des eaux en transit dans un grand mouvement de terrain : Exemple du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes, France). *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, 325, pp. 565-570.

COROMINAS J. (1995) : Evidence of basal erosion and shearing as mechanisms contributing the development of lateral ridges in mudslides, flow-slides, and other flow-like gravitational movements. *Engineering Geology*, 39, pp. 45-70.

COROMINAS J., REMONDO J., FARIAS P., ESTAVO M., ZÉZERE J., DIAZ DE TERAN J., DIKAU R., SCHROTT L., MOYA J. et GONZALVEZ A. (1996) : Debris Flows. In *Landslide Recognition (Identification, Movement and Causes)*, Eds Dikau R., Brunsten D., Schrott L. et Isben M.-L., Wiley, pp. 161-180.

COTECCHIA V. et DEL PRETE M. (1984) : The reactivation of large flows in parts of Southern Italy affected by the earthquake of November 1980, with reference to the evolution mechanism, *Proceedings of the IVth International Symposium on Landslides Toronto*, vol. 2, pp. 33-38.

COTECCHIA V. et DEL PRETE M. (1986) : Effects of earthquake of 23th November 1980 on pre-existing landslides in the Senerchia area (Southern Italy). *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology in Seismic Areas, Bari*, vol. 4, pp. 177-198.

COUSSOT P. et PIAU J.M. (1993) : L'écoulement des boues. *La Recherche*, 24, N°258, pp. 1084-1091.

CRAIG D. (1981) : Mudslide plug flow within channels. *Engineering Geology*, 17-4, pp. 273-281.

DAI F.C. et LEE C.F. (2001) : Frequency-volume relation and prediction of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, 59, pp. 253-266

DESMARAIS K. et ROJSTACZER S. (2002) : Inferring source waters from measurements of carbonate spring response to storms. *Journal of Hydrology*, 260, pp. 118-134.

DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L. et ISBEN M.L. (1996) : *Landslide Recognition (Identification, movement and causes)*. Ed. Wiley, 1 vol., 247 pages.

DUCREUX G.H. (2002) : Commune de Barcelonnette ; Etude Géotechnique des mesures de prévention vis à vis des phénomènes de glissement de terrain dans le quartier de l'Adroit. *Etude Sol Concept*, 48 pages.

DUPONT M. et TALUY P. (2000) : Hydrogéologie du glissement de la Valette (Barcelonnette, Alpes de Haute Provence). *Mémoire de Maîtrise Université de Savoie*, 1 vol., 33 pages.

DURVILLE J.-L. et LACUBE J. (1989) : Un essai de fichier informatique sur les mouvements de terrain, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n°161, pp. 86-89.

EVIN M. (1997) : Géologie de l'Ubaye. *Association Sabença de la Valeia*, 1 vol., 32 pages.

FOURCAULT J.M. (1997) : Saint Pons, un gisement exceptionnel de sulfosels de Pb-Cu (Alpes-de-Haute-Provence). *Le Règne Minéral*, 15, pp. 7-20.

GERVREAU E. (1991) : Etude et prévision de l'évolution des versants naturels en mouvement. *Bull. Liaison Laboratoire Central des ponts et chaussées, série géotechniques*, GT47, 194 pages.

GOVI M., MORTARA G. et SORZANA P.F. (1985) : Eventi idrologici e frane. *Geologica Applicata e Idrogeologica*, vol. XX, Parte II, pp. 359-375.

GUGLIELMI Y., BERTRAND C., COMPAGNON F., FOLLACCI J.P., MUDRY J. (2000) : Acquisition of water chemistry in a mobile fissured basement massif : its role in the hydrogeological knowledge of La Clapière landslide (Mercantour massif, southern Alps, France). *Journal of Hydrology*, 229, pp. 133-148.

GUGLIELMI Y., MUDRY J., BLAVOUX B. (1998) : Estimation of the water balance of alluvial aquifers in region of high. isotopic contrast: an example from southeastern France. *Journal of Hydrology*, 210, pp. 106-115.

GUGLIELMI Y., VENGEON J.M., BERTRAND C., MUDRY J., FOLLACCI J.P., GIRAUD A. (2002) : Hydrogeochemistry : an investigation tool to evaluate infiltration into large moving rock masses (case study of La Clapière and Séchilienne alpine landslides). *Bull. of Eng. Geol. And Env.*, 61, pp. 311-324.

HUNGR O., EVANS S.G., BOVIS M.J. et HUTCHINSON J.N. (2001) : A review of the Classification of Landslides of Flow Type. *Environmental & Engineering Geoscience*, VII – 3, pp.221-238.

HUTCHINSON J.N. (1970) : A costal mudflow on the London Clay cliffs at Beltinge, north Kent. *Géotechnique*, 20-4, pp. 412-438.

HUTCHINSON J.N. (1986) : A sliding-consolidation model for flow slides. *Canadian Geotech. Journal*, 23, pp. 115-126.

HUTCHINSON J.N. (1988) : General report : Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In *Landslides, Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides*, Ed. Bonnard C., Balkema, vol. 1, pp. 3-35.

HUTCHINSON J.N. et BHANDARI R. (1971) : Undrained loading, a fundamental mechanism of mudflows and other mass movements. *Géotechnique*, 21-4, pp. 353-358

IAEG COMMISSION ON LANDSLIDES (1990) : Suggested nomenclature for landslides. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 41, pp. 13-16.

ISBEN M.-L., BRUNSDEN D., BROMHEAD E. et COLLINSON A. (1996) : Flow slide. In *Landslide Recognition (Identification, Movement and Causes)*, Eds Dikau R., Brunsdan D., Schrott L. et Isben M.-L., Wiley, pp. 202-211.

KERCKHOVE C. (1969) : La "zone du flysch" dans les nappes de l'Embrunais-Ubaye (Alpes Occidentales). *Géologie Alpine*, 45, pp. 5-204.

KERCKHOVE C., CARON C., CHAROLLAIS J., PAIRIS J.-L. (1980) : Evolutions géologiques de la France (Panorama des séries synorogéniques des Alpes occidentales). *Mémoire du BRGM*, n°107, pp. 234-255.

LAMBE T.W. et WHITMAN R.V. (1979) : Soil mechanics. Ed. John Wiley & Sons, New York, 553 pages.

LAUGIER P. (2002) : Contribution à l'analyse des risques naturels en montagne par l'étude géologique et géotechnique des scénarios de .mouvements de versants et laves torrentielles : application à la région de Bourg-Saint-Maurice (Savoie, France). Thèse de Doctorat en Géologie de l'Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 333 pages.

LAUTRIN D. (1989) : Utilisation pratique des paramètres de l'essai au bleu de méthylène dans les projets de génie civil. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 160, pp. 53-65.

LEGIER A. (1977) : Mouvements de terrain et évolution récente du relief dans la région de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence). Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 1 vol., 163 pages.

MALET J.-P., HARTIG S., CALAIS E., MAQUAIRE O. (2000) : Apport du GPS au suivi en continu des mouvements de terrain. Application au glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France). C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes, 331, pp. 175–182.

MALET J.-P., MAQUAIRE O., CALAIS E. (2002) : 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*, 43, pp. 43-54.

MAQUAIRE O., ALBOUY Y., DIETRICH M., SCHMUTZ M., SCHOTT J.-J. et al (2001) : Une approche multidisciplinaire pour la connaissance d'un glissement-coulée dans les marnes noires du Callovo-Oxfordien (Super-Sauze, Alpes-de-Haute-Provence, France). *Revue Française de Géotechnique*, n°95-96, pp. 15-31.

MAQUAIRE O., MALET J.-P., REMAÎTRE A., LOCAT J., KLOTZ S., GUILLON J. (2003) : Instability conditions of marly hillslopes :towards landsliding or gullying ? The case of the Barcelonnette Basin, South East France. *Engineering Geology*, 70, pp. 109-130.

MEUNIER M. (1994) : Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels. *Houille Blanche*, 3, pp. 25-31.

PHAN T.S.H. (1993) : Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres Noires du Sud-Est de la France. Thèse de Doctorat de Sciences de la Terre, Université Joseph Fourier Grenoble I, 1vol., 246 pages.

PLAN J. (1968) : La "fenêtre" de Barcelonnette. Bulletin du Service de la Carte Géologique de la France, Ed. Dunod, N° 280, tome LXI, pp. 437-529.

POLLET N., COJEAN R. et SCHNEIDER J.-L. (2002) : Les critères de mobilité des mouvements gravitaires rapides de grande ampleur. In Landslides : Proceedings of the first European Conference on Landslides, Prague 24-26 juin 2002 ; édité par J. Rybář, J. Stemberg et P. Wagner, Balkema publishers, pp. 275-280.

SAURET B. (1987) : Coulées boueuses. Laves torrentielles. In Risques naturels. Bulletin de liaison des Laboratoires des Pont et Chaussées, 150-151, pp. 65-77.

SIDDLE H.J., WRIGHT M.D., HUTCHINSON J.N. (1996) : Rapid failures of colliery spoil heaps in the South Wales Coalfield. Quaterly Journal of Engineering Geology, 29, pp. 103-132.

SONG W.K. (1996) : Modélisation de la rupture progressive de pentes instables contrôlées par infiltration d'eau – Application au glissement de Vadoncello (Italie). Thèse de Doctorat en Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1 vol., 182 pages.

SQUARZONI C., DELACOURT C. et ALLEMAND P. (2003) : Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry. Engineering Geology, 68, pp. 53-66.

SQUARZONI C. (2003) : Mesures des champs de déplacements de surface et modélisation des glissement de terrain. Thèse de Doctorat en Géologie de l'Université de Lyon I et de l'Université de Padoue, 1 vol., 212 pages.

TULLEN P. (2002) : Méthode d'analyse du fonctionnement hydrogéologique des versants instables. Thèse EPFL (Département Génie Civil), 1 vol., 192 pages.

VARNES D.J. (1978) : Slope Movement / Types and Processes. In Landslides Analysis and Control, Special report 176, Schuster R.L., Krizek R.J. editors, National Academy of Sciences, pp. 11-33.

WRIGHT H. (2001) : Rôle de la minéralogie de la texture et de la structure dans la déformation et la rupture des argilites de l'Est. Thèse de Doctorat en Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1 vol., 176 pages.

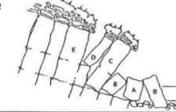
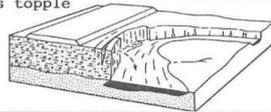
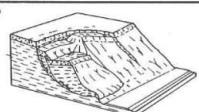
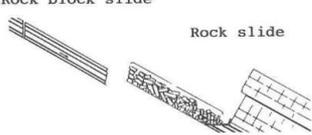
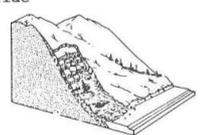
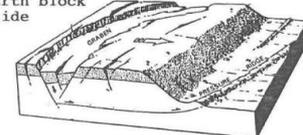
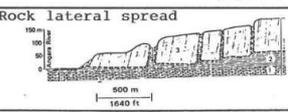
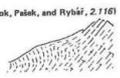
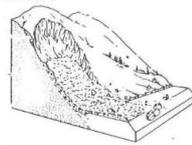
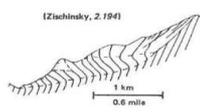
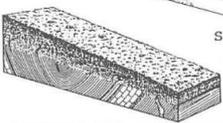
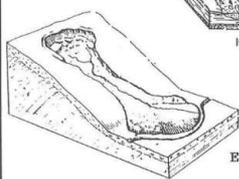
ZABURA Q. et MENCL V. (1969) : Landslides and their control. Elsevier, 214 pages.

ANNEXES

- Annexe 1 : documents relatifs au Chapitre 1
- Annexe 2 : figures et tableaux relatifs au Chapitre 2
- Annexe 3 : documents relatifs au Chapitre 3
- Annexe 4 : figures relatives au Chapitre 4

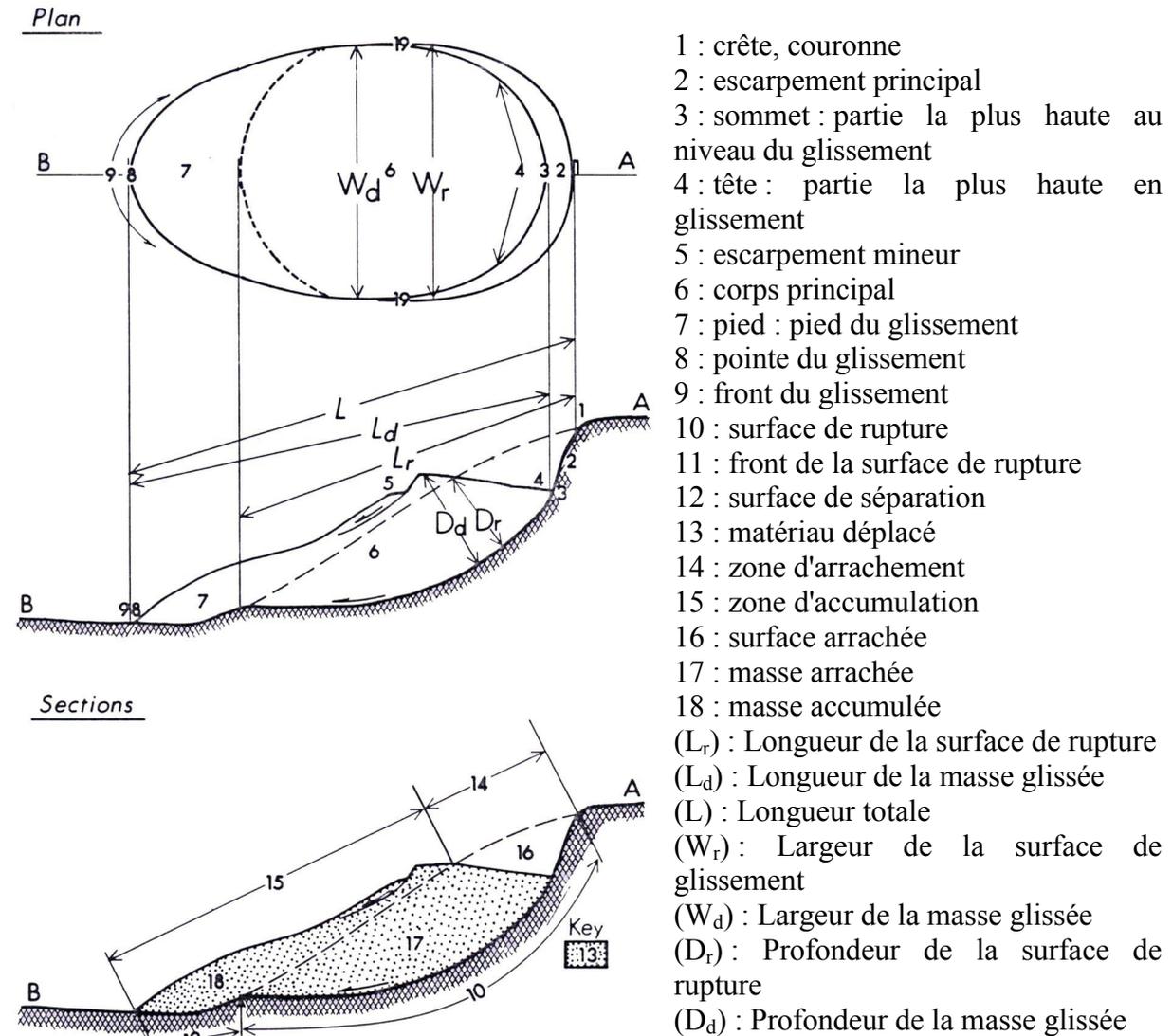
Annexe 1 documents relatifs au Chapitre 1

Annexe 1-1. Classification de Varnes (1978).

TYPE OF MOVEMENT	TYPE OF MATERIAL		
	BED ROCK	ENGINEERING SOIL	
		DEBRIS	EARTH
I. FALLS	Rock fall 	Debris fall	Earth fall
II. TOPPLES	Rock topple 	Debris topple 	Earth topple
III. SLIDES	A. ROTATIONAL Rock slump 	Debris slump	Earth slump 
	B. TRANSLATIONAL Rock block slide Rock slide 	Debris slide 	Earth block slide 
IV. LATERAL SPREADS	Rock lateral spread 		Earth lateral spread 
V. FLOWS	Gravitational sagging (Nemecok, Pašek, and Rybíř, 2.116) 	Debris avalanche 	Rapid earth flow (Quick clay flow) 
	(Zischinsky, 2.194) 	Soil creep 	Earth flow 

<i>Type of movement</i>	Type of material		
	Bedrock	Engineering soils	
		Predominantly coarse	Predominantly fine
Falls	Rock fall	Debris fall	Earth fall
Topples	Rock slope	Debris slope	Earth topple
Slides	Rotational few units	Rock slump	Debris slump
	Translational many units	Rock block slide	Debris block slide
		Rock slide	Debris slide
Lateral spreads	Rock spread	Debris spread	Earth spreads
Flows	Rock flow	Debris flow	Earth flow
	(deep creep)		(soil creep)
Complex	Combination of two or more principal types of movement		

Annexe 1-2. Nomenclature descriptive d'un glissement de terrain (IAEG, 1990).



Couronne : Zone située au-dessus de l'escarpement principal (2), souvent peu affectée par les désordres. Seules quelques fissures ou crevasses témoignent de la mise en traction des terrains dans cette zone.

Escarpement principal : Surface inclinée ou verticale souvent concave, limitant le glissement à son extrémité supérieure.

Sommet : Limite amont du glissement, point le plus élevé où le matériau glissé (13) se trouve en contact avec l'escarpement principal (2).

Tête : Partie amont de la masse glissée sur l'escarpement principal (2).

Escarpement secondaire : Cicatrice semblable à l'escarpement principal (2) mais visible dans la masse glissée.

Corps : Partie du matériau glissée (13) au-dessus de la surface de glissement (10) en amont du pied de la surface de glissement (11).

Pied : Partie de la masse glissée (13) en aval du pied de la surface de glissement (11).

Extrémité aval : Extrémité aval du matériau glissé (13).

Front : Partie la plus aval du matériau glissé (13), en général de forme convexe.

Surface de glissement : Prolongation en profondeur de l'escarpement principal (2) au-dessous de la masse glissée (13).

Pied de la surface de glissement : L'intersection aval de la surface topographique initiale et la surface de glissement (10).

Surface de séparation : Surface séparant la masse glissée (13) des terrains en place, partie de la surface de glissement (10).

Matériau glissé : Matériau qui a glissé, partie d'un glissement de terrain.

Zone d'affaissement : Zone d'un glissement de terrain où la masse glissée (13) est au-dessous de la surface topographique originale.

Zone d'accumulation : Zone d'un glissement de terrain où la masse glissée (13) est au-dessus de la surface topographique originale.

Niche d'arrachement : Volume situé au-dessus de l'escarpement principal et la masse affaissée (17) et au-dessous de la surface topographique originale.

Masse affaissée : Partie de la masse glissée (13) recouvrant la surface de glissement (11), qui est située au-dessous de la surface topographique originale.

Accumulation : Partie de la masse glissée (13) qui est située au-dessus de la surface de la surface topographique originale.

Flanc : Limite latérale du glissement prolongeant l'escarpement principal (2). Le flanc droit est à droite quand les flancs sont vus de la couronne.

(L_r) : Longueur de la surface de rupture : distance entre le front de la surface de rupture et la couronne.

(L_d) : Longueur de la masse glissée : distance entre le sommet et l'extrémité aval.

(L) : Longueur totale : distance entre la couronne et le front de la masse glissée.

(W_r) : Largeur de la surface de glissement : distance maximum entre les flancs.

(W_d) : Largeur de la masse glissée : largeur maximum de la masse glissée dans une direction perpendiculaire à la longueur L_d .

(D_r) : Profondeur de la surface de rupture : distance entre la surface de rupture et la surface topographique originale.

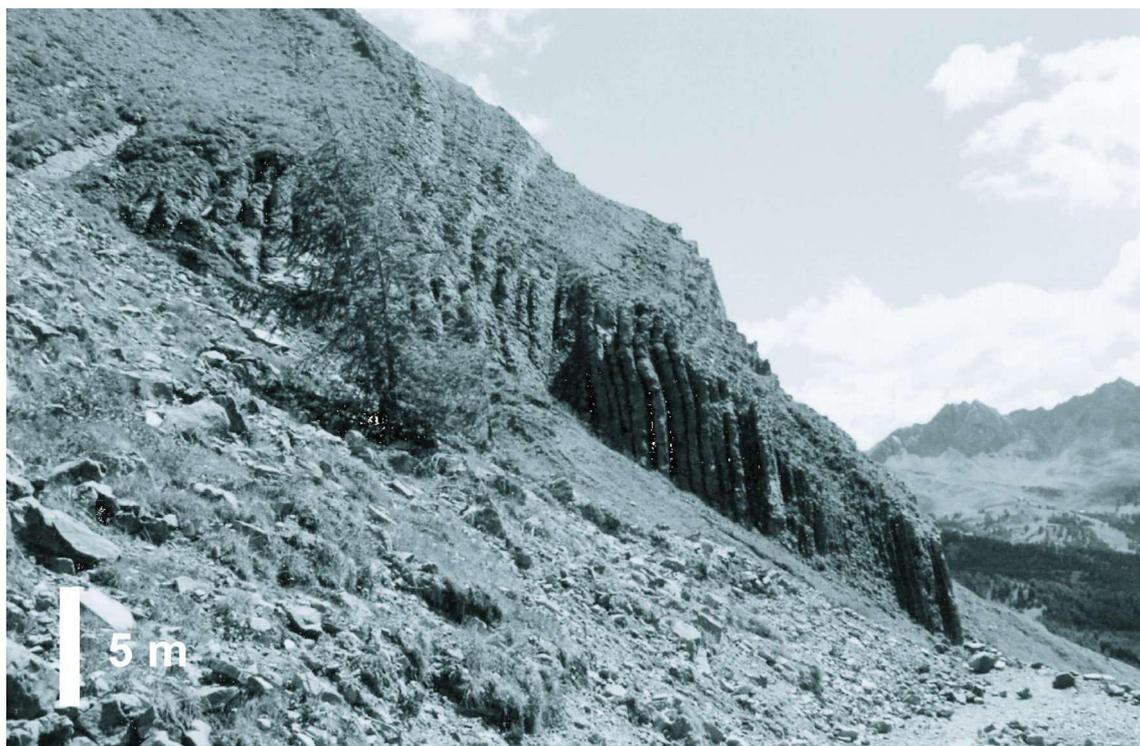
(D_d) : Profondeur de la masse glissée : profondeur de la masse glissée dans une direction perpendiculaire à la longueur L_d .

Annexe 2 figures et tableaux relatifs au Chapitre 2

Annexe 2-1 Extrait de la carte géologique édité par le BRGM, Feuille de Barcelonnette XXXV-39 (1974).



Annexe 2-2. Photographie (juillet 2000) : affleurement marno-calcaire de l'Argovien.



Annexe 2-3. Vue de seuils dans le ravin de l'Eglise dans le Riou Bourdoux (cliché octobre 2002).



Annexe 2-4. Vue de seuils dans le torrent de la Valette (cliché RTM, 1887).



Annexe 2-5. Exemple de site de prélèvement d'un échantillon remanié (c'est à dire prélevé au marteau et écrêté à 20 mm).



Annexe 2-6. Exemple de prélèvement d'échantillons dits intacts à la pelle mécanique et au marteau.



Annexe 2-7. Synthèse des résultats d'essais géotechniques réalisés sur les échantillons de Poche.

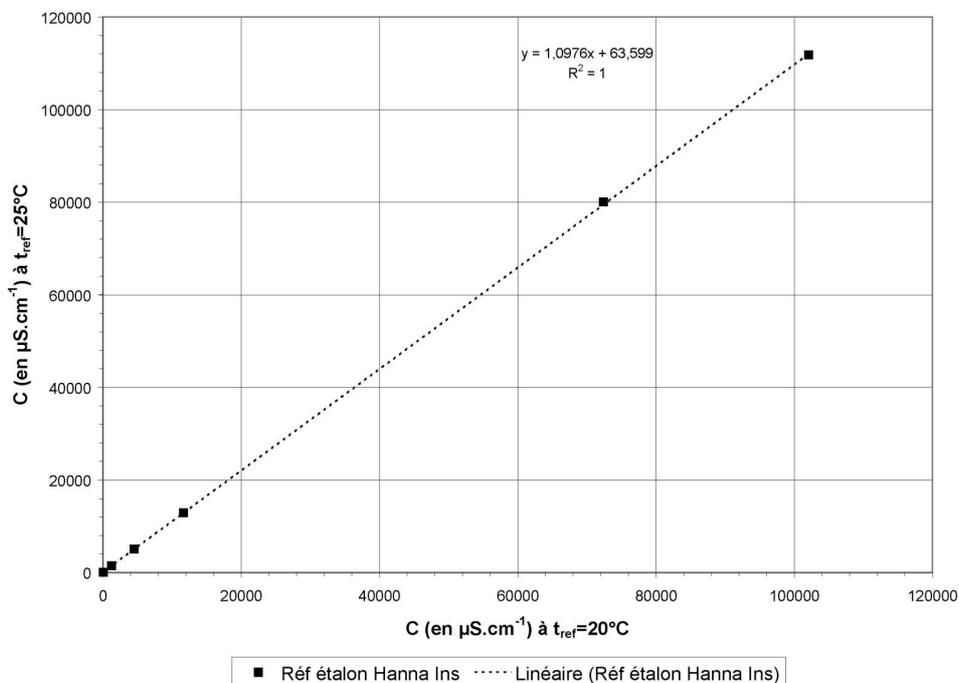
Echantillons	Nature du matériau	Altitude	Teneur en eau (%)	Granulométrie	Sédimentométrie	Atterberg			Cisaillement boîte		Ess. Bleu (pour 100g)	RX	Calculmétrie (%)	Matière Organique (%)
						W _L (%)	W _P (%)	I _P	I _C	C (kPa)				
Tpo-1	coulée	1275 m	2,3	+	+	35,2	20,2	15,0	1,2	16	30	+	34,6	1,5
Tpo-2	coulée	1280 m	0,8	-	-	33,0	15,6	17,4	0,9	26	28	-	23,4	2,7
Tpo-3	coulée	1310 m	1,1	+	+	32,6	23,0	9,6	2,3	52	28	+	40,0	1,2
Tpo-4	coulée	1310 m	0,5	-	-	30,4	17,5	12,9	1,3	31	35	-	39,9	1,2
Tpo-5	coulée	1315 m	5,3	+	+	34,2	17,1	17,1	0,7	33	30	+	29,6	1,8
Tpo-6	coulée	1360 m	11,8	+	+	34,7	18,3	16,4	0,4	8	34	+	32,3	2,3
Tpo-7	coulée	1380 m	14,4	+	+	36,5	15,6	20,9	0,1	21	34	+	31,8	2,6
Tpo-8	matériau à mouvement rapide	1415 m	11,8	+	+	34,4	16,9	17,5	0,3	25	32	+	30,2	2,9
Tpo-9	coulée	1240 m	10,6	+	+	37,1	23,6	13,5	1,0	18	32	+	20,6	2,2
Tpo-10	matériau à mouvement rapide	1480 m	10,0	+	+	31,9	16,2	15,7	0,4	48	21	+	32,4	3,1
Tpo-11	matériau à mouvement rapide	1485 m	9,3	+	+	33,7	23,6	10,1	1,4	23	33	+	37,1	2,0
Tpo-12	coulée	1240 m	7,3	+	+	31,1	17,3	13,8	0,7	36	35	+	36,8	2,0

Annexe 2-8. Synthèse des résultats d'essais géotechniques réalisés sur les échantillons de la Valette.

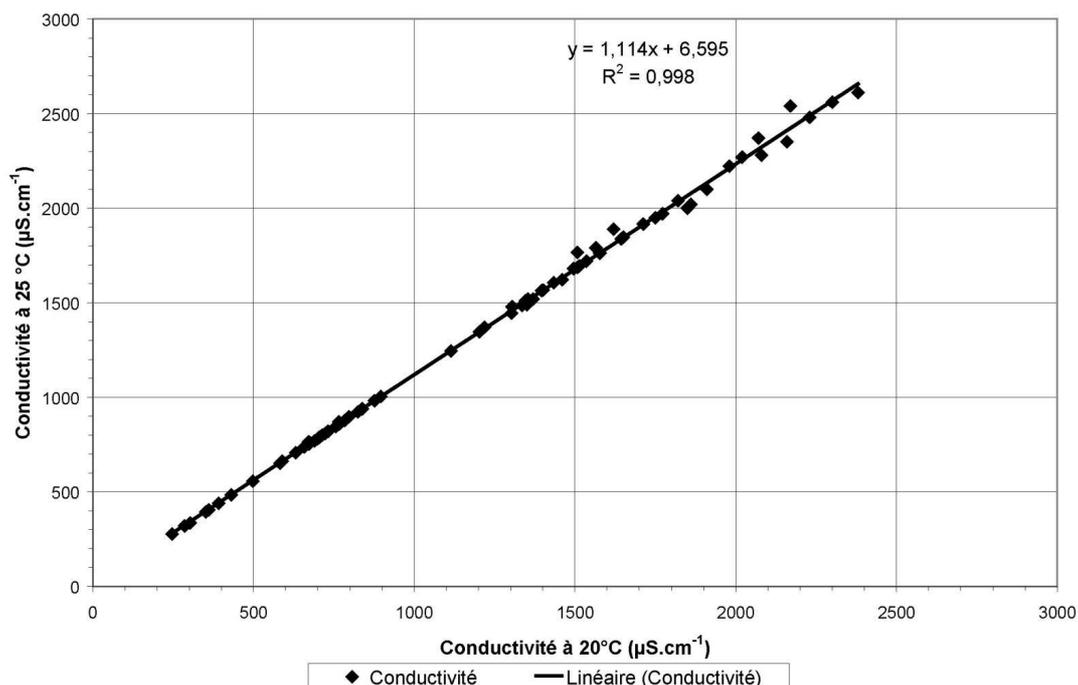
Echantillons	Nature du matériau	Altitude	Teneur en eau (%)	Granulométrie	Sédimentométrie	Atterberg			Cisaillement boîte			Ess. Bleu (pour 100g)	RX	Calcimétrie (%)	Matière Organique (%)
						W _L (%)	W _P (%)	I _p	I _c	I _p	I _c				
VA-1	Marnes remaniées	1450 m	10,6	+	+	25,3	16,7	8,6	1,7	13	29	2,0	+	29,5	2,1
VA-2	coulée	1305 m	12,1	+	+	24,9	20,7	4,2	3,0	31	24	2,7	+	20,8	0,7
VA-3	coulée	1305 m	11,9	+	+	26,7	21,2	5,5	2,7	39	21	2,7	+	21,1	0,7
VA-4	Marnes en place	1305 m	15,3	+	+	24,6	17,0	7,6	1,2	20	27	2,7	+	35,1	1,0
VA-5	Matériau à mvt rapide	1490 m	7,0	+	+	33,1	21,8	11,2	1,3	34	31	2,7	+	21,0	1,5
VA-6	Matériau à mvt rapide	1430 m	11,1	+	+	35,9	22,5	13,4	0,9	47	25	2,3	+	30,2	0,5
VA-7	Matériau à mvt rapide	1430 m	10,5	+	+	32,9	18,6	14,3	0,6	26	29	2,7	+	20,0	1,1
VA-8	Matériau à mvt rapide	1320 m	13,2	+	+	38,9	22,1	16,8	0,5	27	27	2,0	+	29,7	1,6
VA-9	coulée	1250 m	14,2	+	+	36,4	21,5	14,9	0,5	10	34	4,0	+	26,1	1,4
VA-10	Marnes remaniées	1240 m	7,2	+	+	31,5	17,3	14,1	0,7	59	27	1,7	+	40,6	1,6
VA-11	Matériau remanié	1770 m	8,2	+	+	32,6	21,9	10,7	1,3	28	31	2,7	+	22,8	1,5
VA-12	Matériau à mvt rapide	1470 m	11,0	+	+	36,5	19,1	17,4	0,4	18	30	2,7	+	23,1	0,8
VA-13	Matériau à mvt rapide	1500 m	7,4	+	+	31,9	21,7	10,3	1,4	20	36	2,0	+	27,9	1,5
VA-14	Matériau remanié	1780 m	8,8	+	+	33,7	18,0	15,7	0,6	16	31	2,0	+	24,6	1,9
VA-15	coulée	1300 m	10,4	+	+	34,7	19,4	15,4	0,6	21	31	4,0	+	29,3	1,1
VA-16	Matériau à mvt rapide, intact	1530 m	10,4	-	-	35,5	16,8	18,7	0,3	18	33	3,3	-	-	-
VA-17	Matériau à mvt rapide, intact	1530 m	-	-	-	-	-	-	-	57	33	-	-	-	-
VA-18	Matériau à mvt rapide, intact	1530 m	-	-	-	-	-	-	-	73	36	-	-	-	-
VA-19	Matériau à mvt rapide, intact	1530 m	9,9	-	-	-	-	-	-	25	34	1,0	-	18,6	2,1
VA-20	coulée, intact	1470 m	-	-	-	-	-	-	-	6	31	-	-	23,4	0,2
VA-21	coulée, intact	1470 m	-	-	-	-	-	-	-	78	27	-	-	-	-
VA-22	coulée, intact	1470 m	-	-	-	-	-	-	-	46	35	-	-	-	-
VA-23	coulée, intact	1470 m	-	-	-	-	-	-	-	15	40	-	-	-	-
VA-24	Matériau remanié	1730 m	6,4	+	+	30,6	15,5	15,1	0,6	35	34	2,7	+	19,2	1,6
VA-25	Matériau remanié	1730 m	8,2	+	+	34,3	19,4	15,0	0,8	41	33	2,3	+	18,2	0,7
VA-26	coulée	1230 m	13,2	+	+	36,4	20,2	16,2	0,4	18	30	2,7	+	33,0	1,1
VA-27	coulée	1340 m	9,8	+	+	32,6	18,2	14,4	0,6	33	45	1,3	+	25,4	1,6
VA-28	Marnes en place	1260 m	10,4	+	+	31,5	17,0	14,4	0,5	32	33	1,7	+	34,6	2,0
VA-29	Marnes en place	1310 m	6,7	+	+	29,1	17,8	11,2	1,0	49	36	0,7	+	39,8	1,8
VA-30	Efflorescences	1310 m	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-

Annexe 3 documents relatifs au Chapitre 3

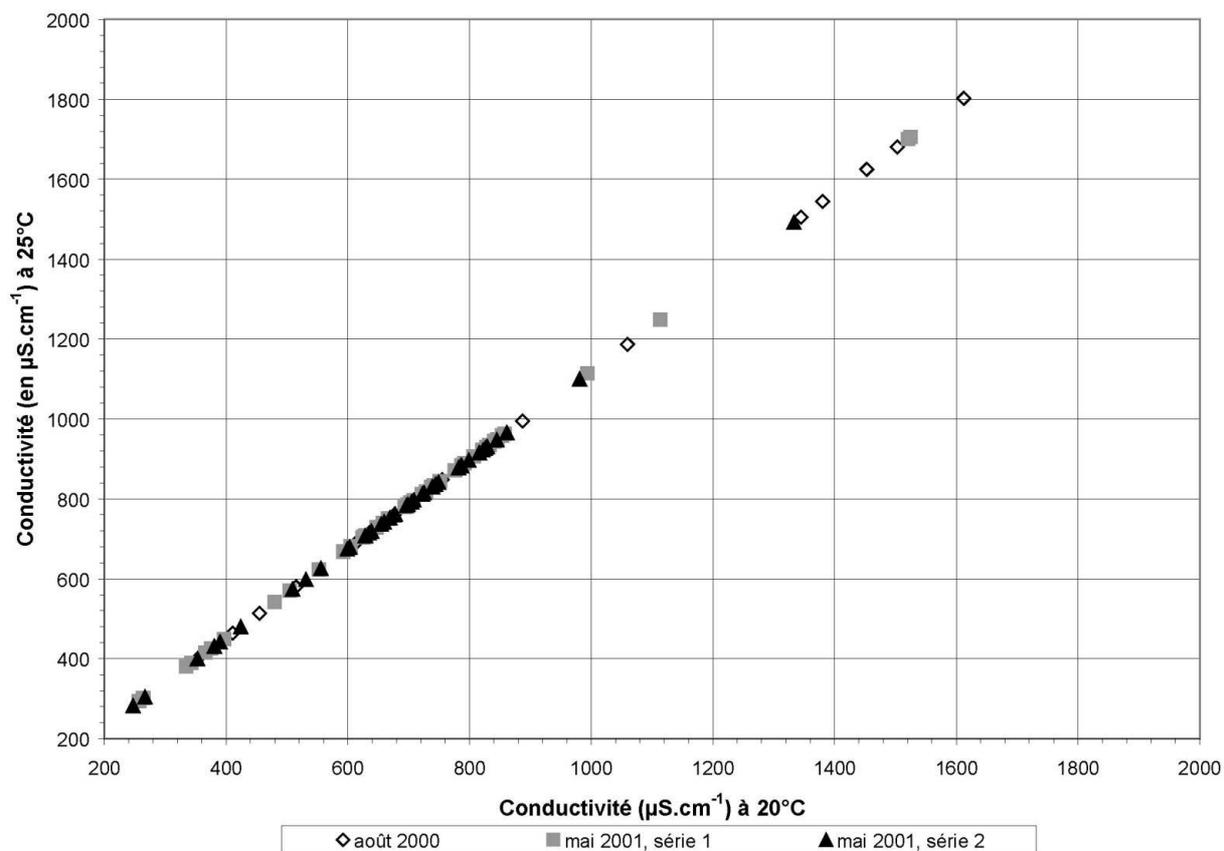
Annexe 3-1. Correspondance des valeurs de conductivités en fonction de deux températures 25°C et 20°C (d'après les valeurs d'étalonnage "Hanna – Instrument").



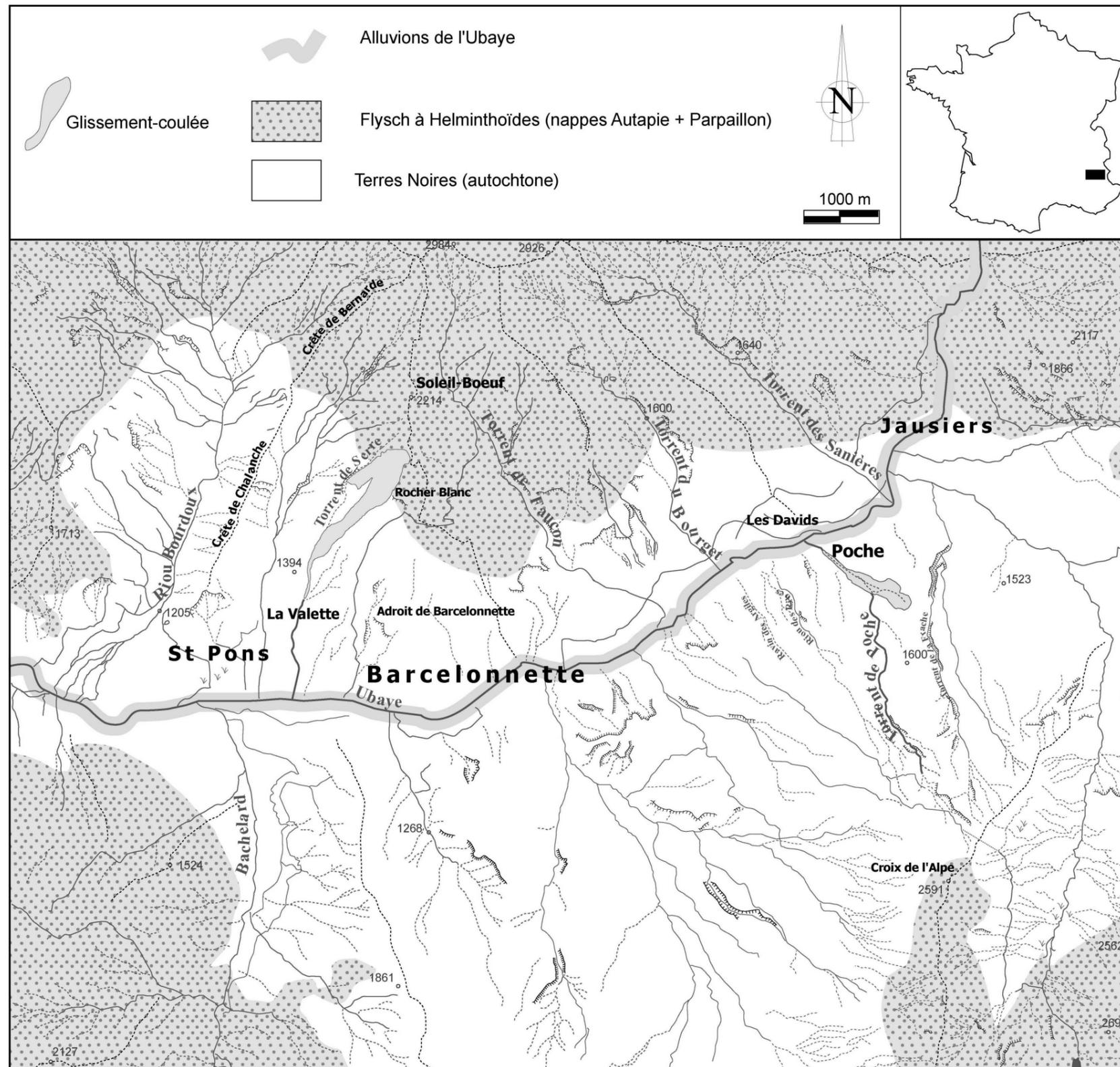
Annexe 3-2. Courbe de conversion de la conductivité à 20 °C vers la référence à 25°C, à partir des mesures réalisées en octobre 2001 avec l'appareil (EDYTEM de l'Université de Chambéry) ayant servi à toutes les mesures antérieures.



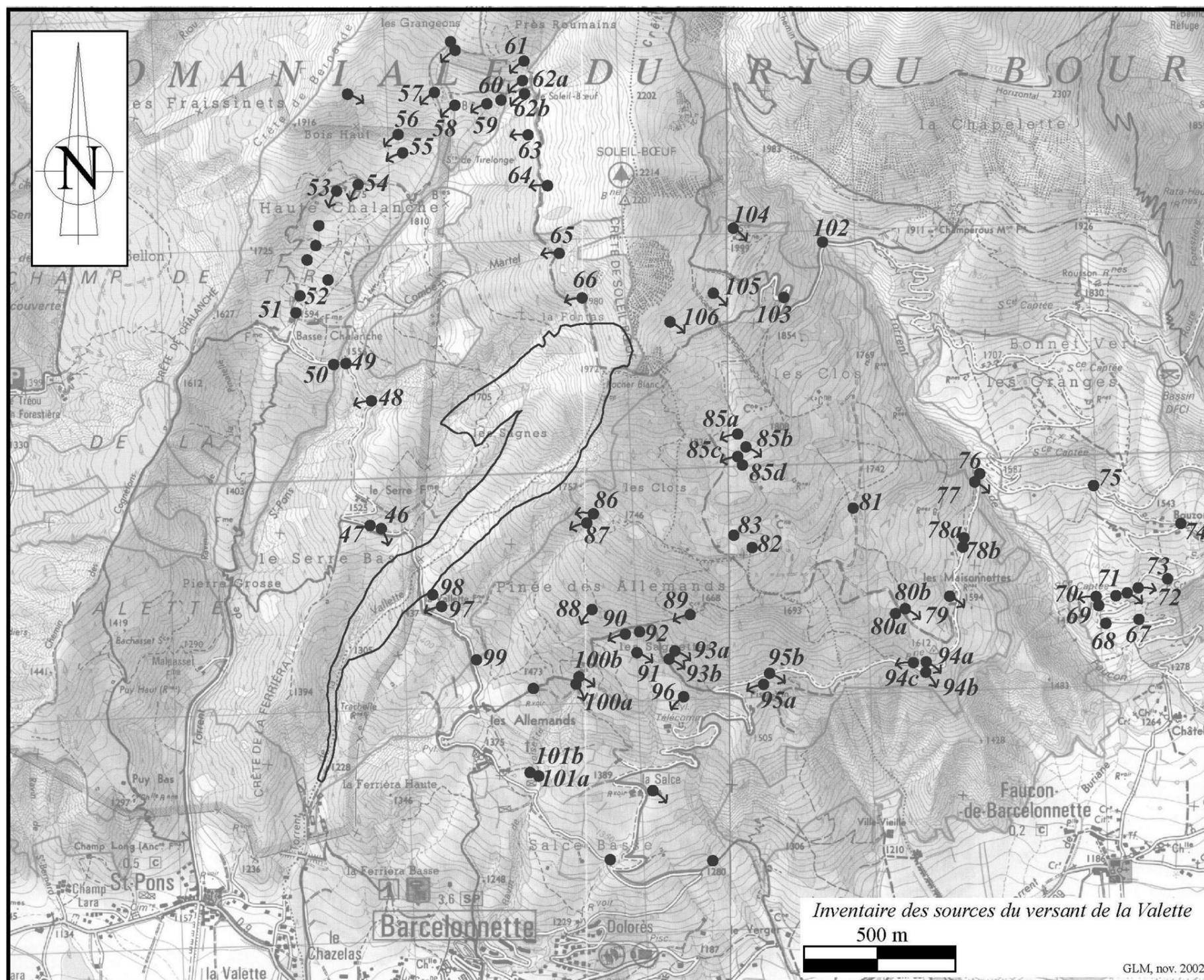
Annexe 3-3. Conversion des mesures antérieures à octobre 2001, avec les données de la régression précédente (en Annexe 3-2).



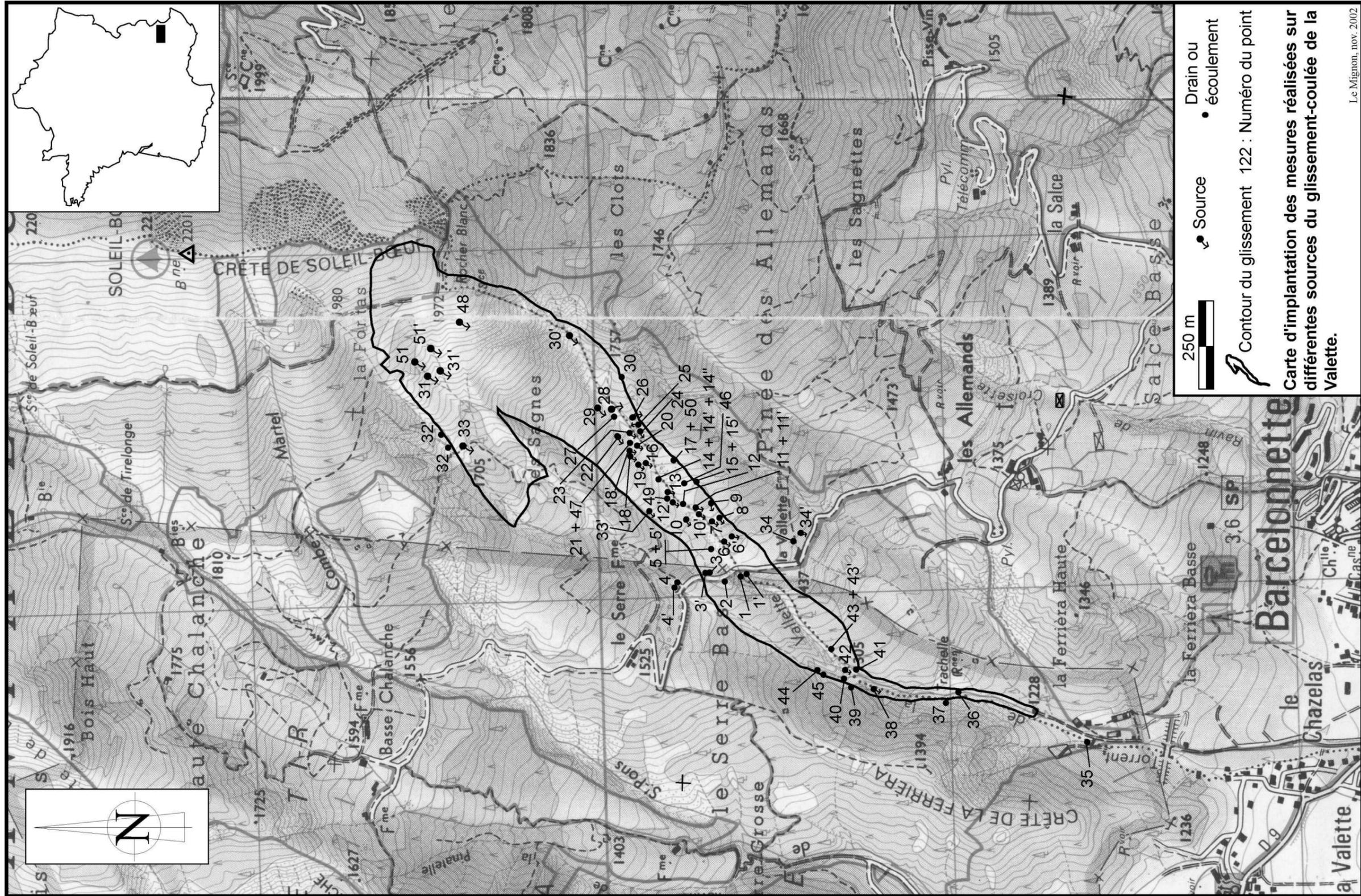
Annexe 3-4. Carte hydrographique de la fenêtre de Barcelonnette.



Annexe 3-5. Carte des différentes sources et résurgences repérées sur le "versant" de la Valette.



Annexe 3-6. Carte des différentes sources et résurgences repérées sur le corps du glissement-coulée de la Valette.



Annexe 3-7. Calculs de l'ETP sur Barcelonnette

	janvier	février	mars	avril	mai	juin	juillet	août	septembre	octobre	novembre	décembre
température (°C)	-0,2	1,5	4,9	6,5	11,7	14,3	17,3	17,0	12,7	8,5	3,1	-0,1
ETP	0,0	7,0	25,2	37,4	73,9	94,6	111,7	102,0	68,0	40,4	13,1	0,0
précipitation	58,1	46,4	54,6	60,8	59,5	67,7	47,8	54,6	67,7	87,8	81,2	53,6
RFU	100,0	100,0	100,0	100,0	85,6	58,7	0,0	0,0	0,0	47,4	100,0	100,0
infiltration	58,1	39,4	29,5	23,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	68,1	53,6
ETR	0,0	7,0	25,2	37,4	73,9	94,6	106,5	54,6	67,7	40,4	13,1	0,0

avec :

Température : températures moyennes mensuelles sous abri à la station Météo-France de Barcelonnette – Le Verger ; pour la période de 1988 à 1999.

L'évapotranspiration potentielle mensuelle est notée ETP et calculée selon la formule de

Thorntwaite : $ETP = 1,6 \times \left(\frac{10 \times T_m}{I} \right)^a \times F(\lambda)$, avec T_m température moyenne du

mois "m" en °C, $a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,79 \cdot 10^{-2} I + 0,49239$, I indice thermique

annuel $\sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5} \right)^{1,514}$ et $F(\lambda)$ coefficient de correction dépendant de la latitude et du

mois considéré.

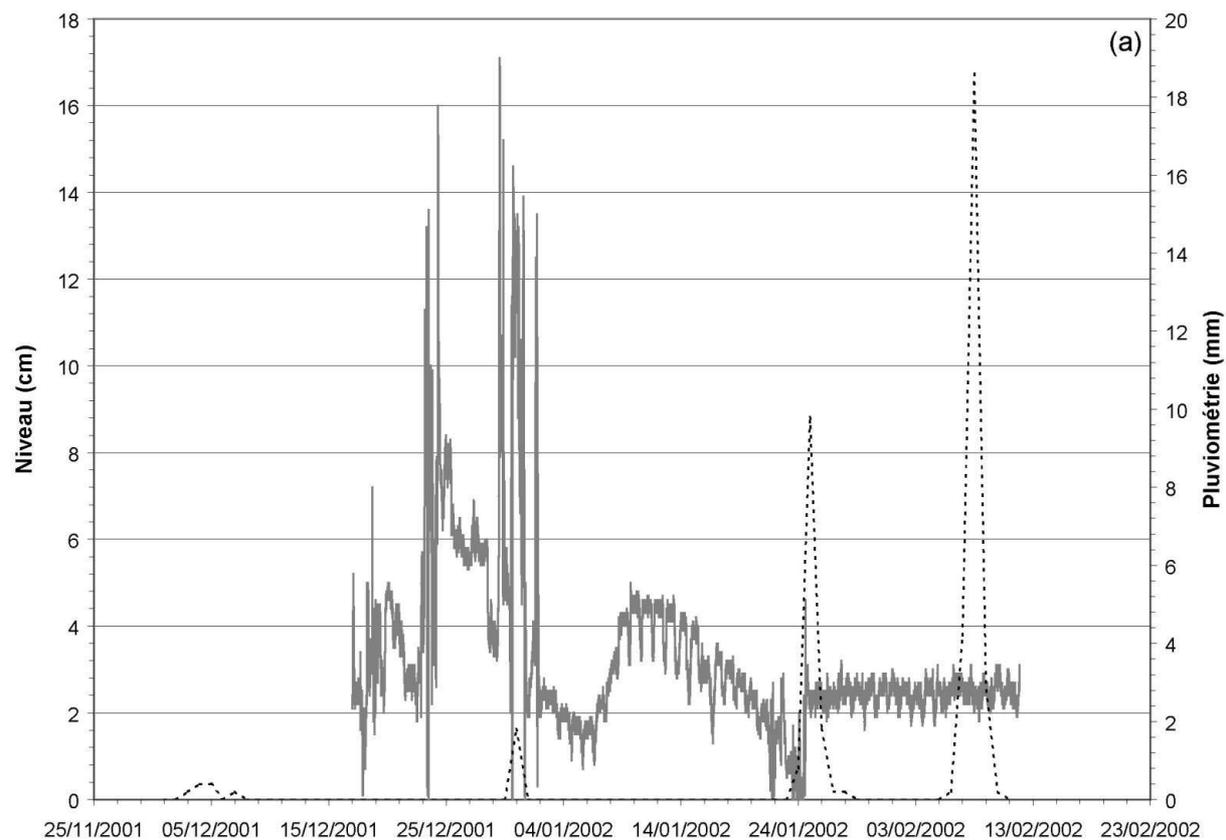
Précipitations moyennes mensuelles exprimées en mm pour la période 1961 à 2000 (station Météo-France Barcelonnette – Le Verger).

RFU : Réserve facilement utilisable généralement estimée à 100 mm. $RFU_m = RFU_{m-1} + P_m - ETP_m$; si $RFU_m > 100$ alors $RFU_m = 100$ et si $RFU_m < 0$ alors $RFU_m = 0$.

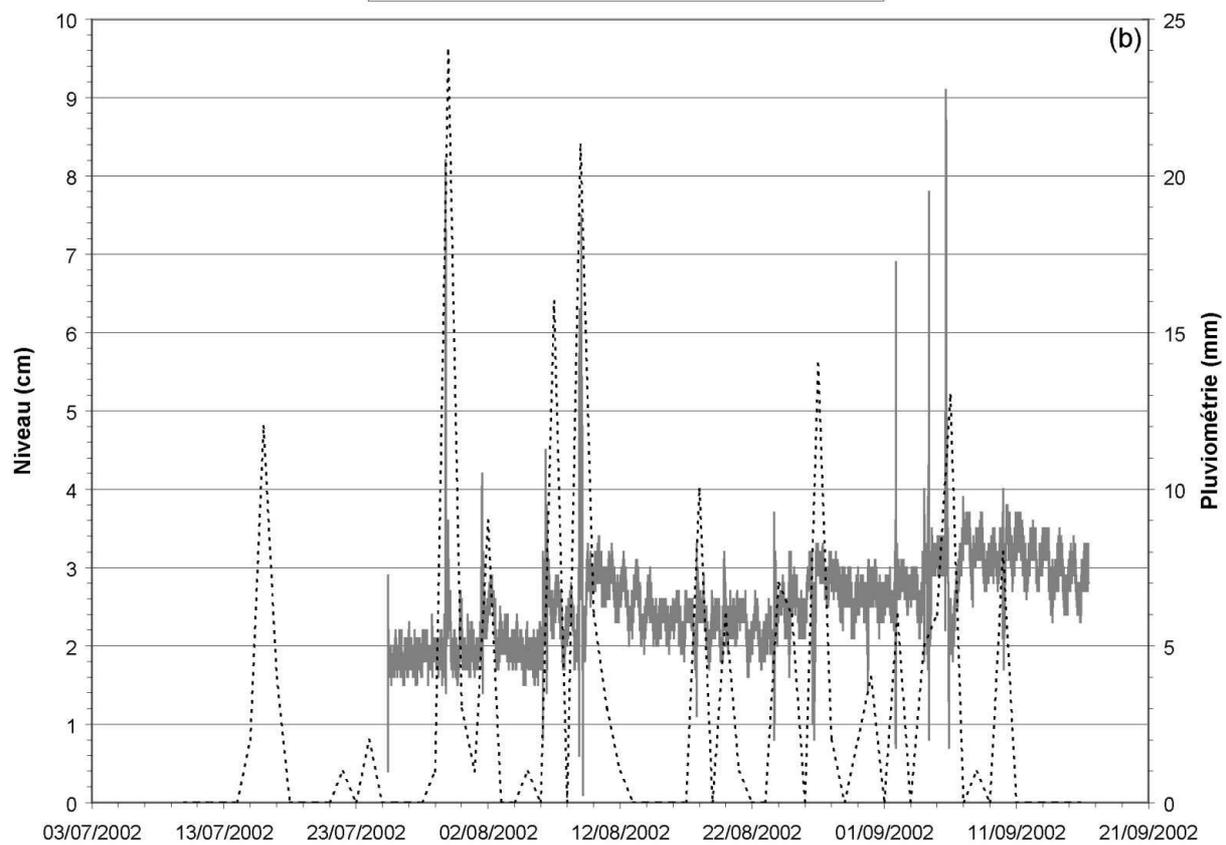
ETR : évapotranspiration réelle. $ETR = \min(RFU_{m-1} + P_m ; ETP_m)$

Inf : infiltration : $Inf_m = RFU_{m-1} + P_m - ETR_m - 100$.

Annexe 3-8. Données du limnigraphe du torrent de la Valette (d'après données O.N.F.-R.T.M.).



— niveau (torrent de la Valette - 1185 m) pluie



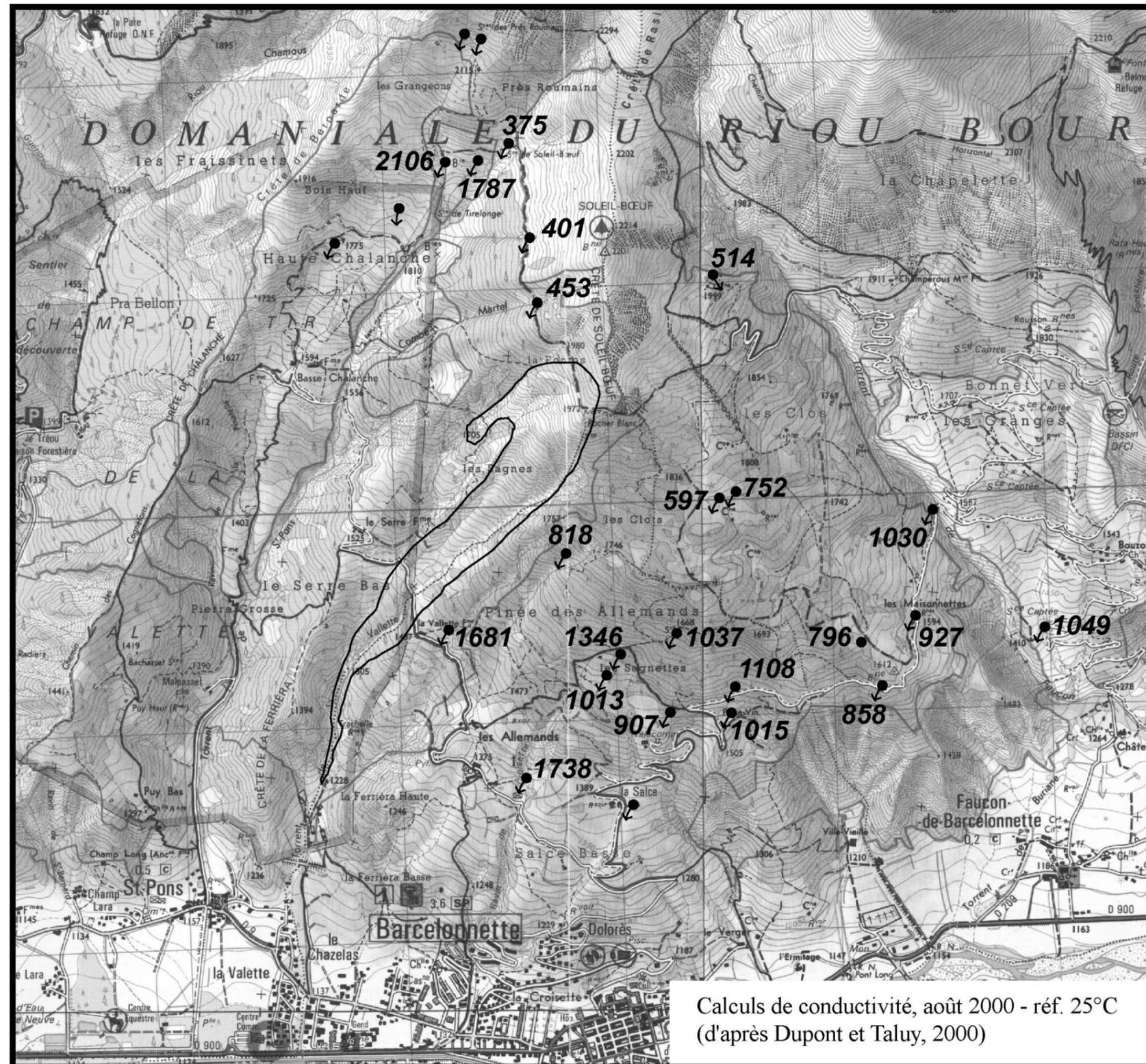
— niveau (torrent de la Valette - 1185 m) pluies

Annexe 3-9. Tableau des valeurs hydrochimiques mesurées sur le glissement-coulée de Poche (les cases grisées représentent des mesures non réalisables lors du passage).

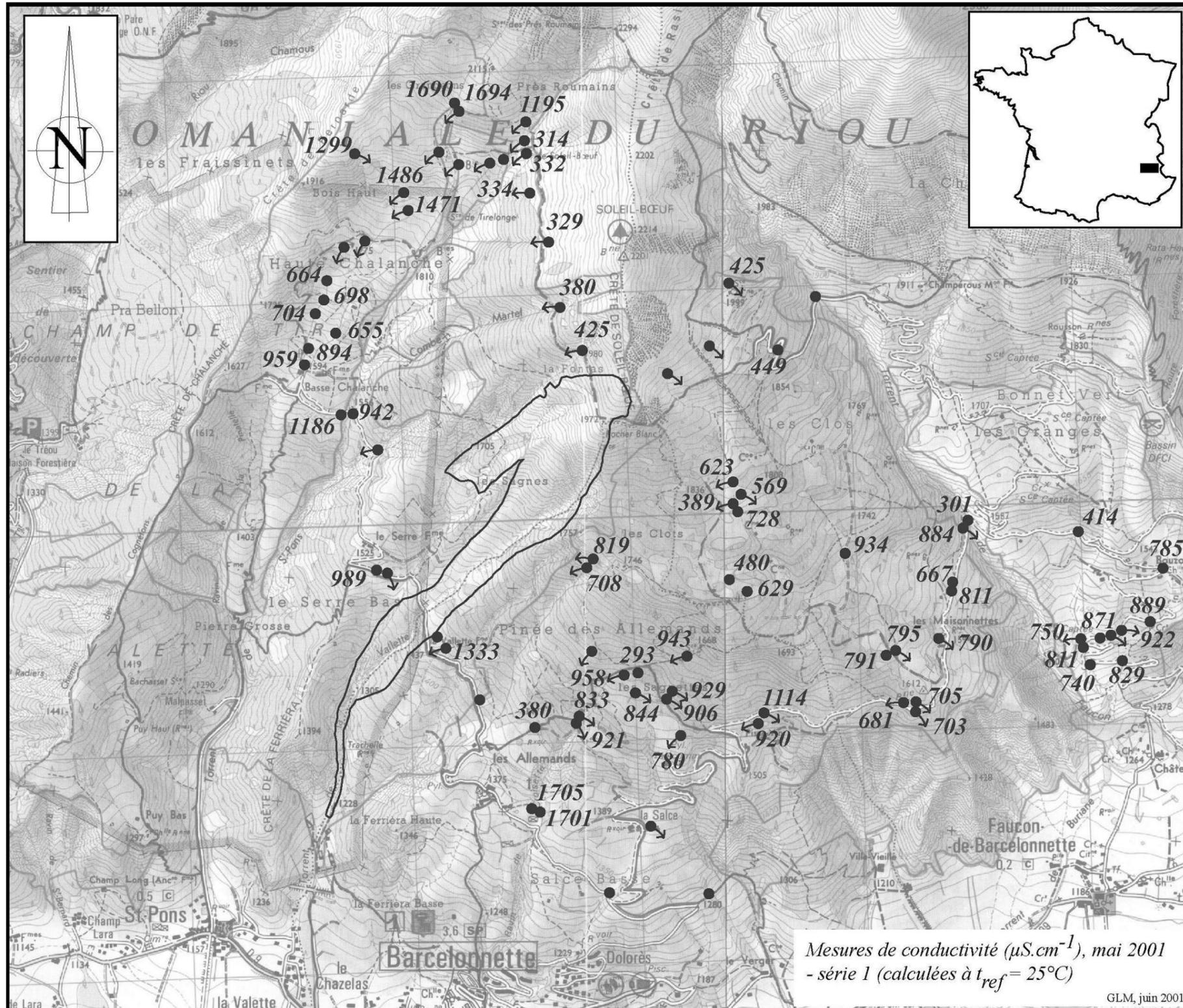
Mesure N°	Altitude en m	Conductivité en $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (à $t_{\text{ref}} = 25^\circ\text{C}$)				t° en $^\circ\text{C}$				Débit				Localisation	Remarques
		Mai 2001, 1ère série	Mai 2001, 2ème série	Octobre 2001	Octobre 2002	Mai 2001, 1ère série	Mai 2001, 2ème série	Octobre 2001	Octobre 2002	Mai 2001, 1ère série	Mai 2001, 2ème série	Octobre 2001	Octobre 2002		
1	1196	294	259	372	362	5,5	5,7	9,0	6,5	--	--	--	--	après le pont des Davids	Ubaye
2	1198	951	996			9,9	14,1			très faible	très faible			après le pont des Davids sur chemin	ruissellement gauche
2'	1198	1599	1906			7,4	8,7			très faible	très faible			après le pont des Davids sur chemin	ruissellement droit
3	1228	676	545	1285	670	7,5	8,4	14,8	6,8	--	--	--	--	torrent de Poche allant	
4	1270	2814	3215	3950		14,3	15,5	13,8		0,2 L.min ⁻¹	0,3 L.min ⁻¹	suintements		dans glissement rive droite	écoulement
5	1285	2769	3137	4070		15,2	16,5	18,1		1 L.min ⁻¹	1 L.min ⁻¹	suintements		20 m intérieur / rive droite	flaque
6	1297	2747	3126	3490		16,8	19	14,7		très faible	très faible	très faible		rive droite du glissement	flaque d'eau
7	1300	571	452		778	9,7	10,8		6,8	--	--	--	--	torrent rive gauche	charrie bcp de Terres Noires
8	1305	3159	3159	4590	3970	24,1	20,6	18,3	9,3	très faible	très faible	très faible	très faible	5 m au-dessus du point 7	flaque alimentée par eau du glissement
8'	1310				4300				9,2				très faible	milieu du glissement	marre
9	1315	2546	3103		3670	15,2	14,8		9,0	2 L.min ⁻¹	1 L.min ⁻¹		très faible	50 m / rive droite	ruissellement
10	1323	2446	2747			18,2	17,5			très faible	très faible			drain nat rive gauche	ruissellement
10'	1323	2869	3092	4610		16,7	15,5	16,2		très faible	très faible	très faible		drain nat rive gauche	ruissellement
11	1340	2836	2680			18,4	20,3			très faible	très faible			15 m / rive gauche	ruissellement
11'	1345	2424	2680			18,5	19,8			très faible	0,7 L.s ⁻¹			5 m plus haut que précédent	ruissellement
11''	1340		3170				20,7				très faible			juste à côté de 11	flaque
12	1359	1176	1185			12,1	14			très faible	0,8 L.min ⁻¹			rive droite du torrent	petit ruissellement
12'	1359	518	401	795	723	10,9	11,2	10,9	7,4	--	--	--	--	torrent de Poche	plage naturelle de dépôt de laves torrentielles
13	1382	3393	3850	4370		24,2	27,4	11,1		très faible	très faible	très faible		rive gauche du glissement	
14	1390	2324	2647	3900		17,7	17,7	12,9		30 mL.s ⁻¹	20 mL.s ⁻¹	13 mL.s ⁻¹		au centre du glissement	ruissellement
14'	1375			4160				13,9				très faible		au centre du glissement	ruissellement
15	1420	851	975			15	18,6			très faible	très faible			début escarp côté gauche	
16	1425	3326	3404		3810	7,5	9		11,4	1 L.min ⁻¹	0,5 L.min ⁻¹		0,1 L.min ⁻¹	au milieu du gliss	double résurgence (1ère)
16'	1425	3304	3092			7,6	10,5			1 L.min ⁻¹	0,5 L.min ⁻¹			au milieu du gliss	double résurgence (2ème)
17	1440	3281	3337			8,4	11			0,6 L.min ⁻¹	0,5 L.min ⁻¹			25 m / escarpement gauche	petite résurgence diffuse
18	1458	2390	2160			14,5	9,4			0,5 L.min ⁻¹	0,3 L.min ⁻¹			à 30 m escarpement gauche	petite résurgence
19	1458	2045	1998			19,4	21,9			très faible	très faible			20 m / escarpement droit	zone diffuse de suintements
20	1238		3337	3950			13,6	13,8			très faible	suintements		front princip coulée	branche du riu
20'	1238		505	1234			9	10,9		--	--	--	--	front princip coulée	torrent de Poche lui même (rive gauche)
21	1290		3504	3290			11	10,9			très faible	très faible		+ 5 m / à la 20	ruissellement dans ravine
22	1291		3437				13,8				très faible			dans ravine rive droite	ruissellement
23	1345		2602				23,2				0,7 L.s ⁻¹			juste à côté de 14	flaque, "eau rouillée"
24	1348		404				11,8				--			Torrent de Poche	
25	1402		2725		4530		20		11,9		très faible		très faible	au centre du glissement	ruissellement
26	1412		1556	3950	3700		10,9	16,7	11,8		1 L.min ⁻¹	très faible	très faible	20 m / rive gauche	émergence
27	1495		1303				15,7				très faible			escarpement	suintement léger
28	1502		1270	1804			14,9	9,5			très faible	très faible		sagne au-dessus de l'escarpement	zone humide entre les deux émergences et odeur de H ₂ S
29	1510		1454				6,6				0,1 L.min ⁻¹			sagne au-dessus de l'escarpement	
30	1393			4970				14,6				très faible		flaque au centre du glissement	
31	1420				5200				10,8				très faible	milieu du glissement en-dessous de la niche	

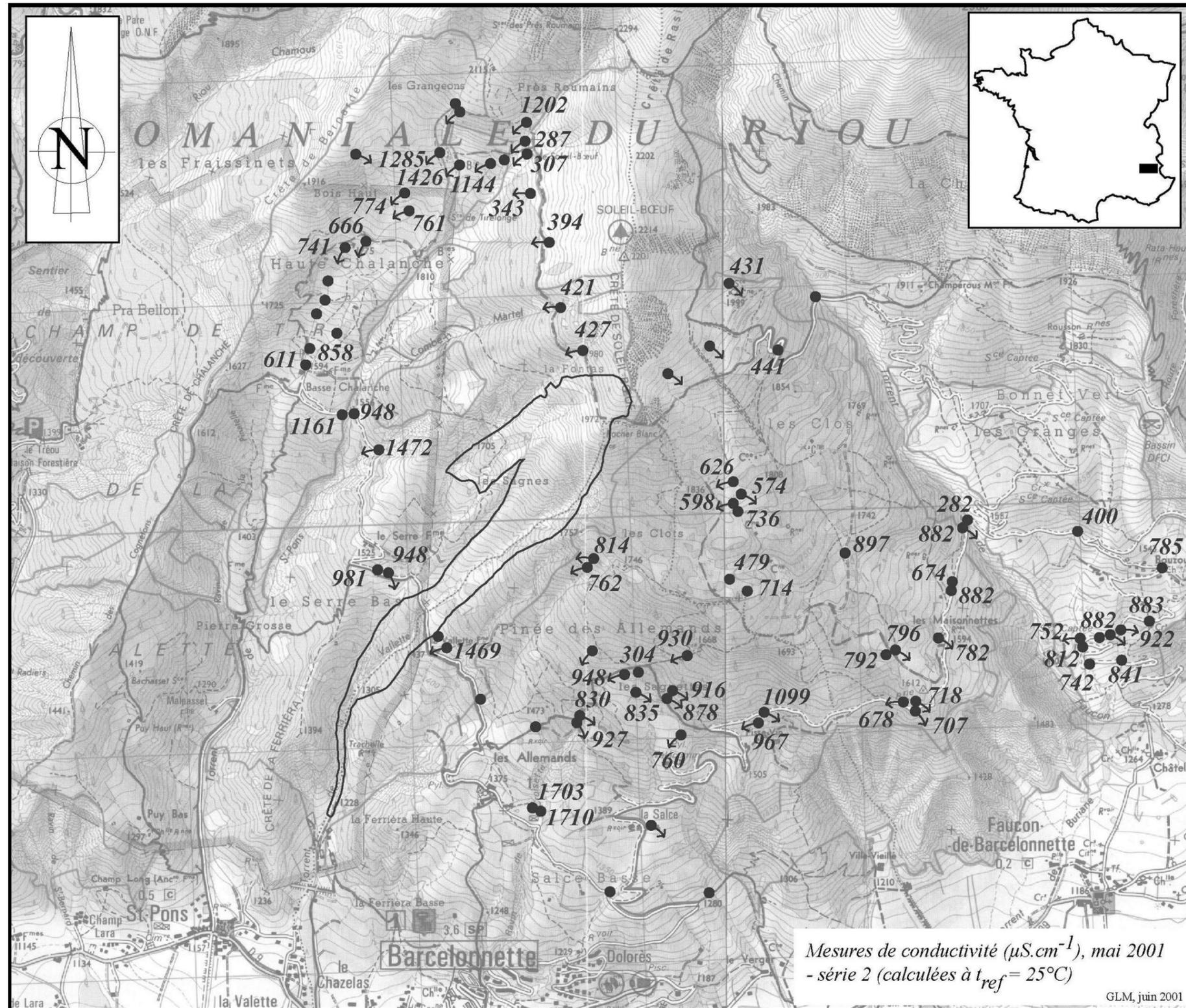
Annexe 3-10. Tableau des valeurs hydrochimiques mesurées sur le glissement-coulée de la Valette (les cases grisées représentent des mesures non réalisables lors du passage).

Mesure N°	Altitude en m	Conductivité en µS/cm calc à 25°C					t° en °C					pH		Débit				Localisation	Remarques		
		Mai 2001, 1ère série	Mai 2001, 2ème série	Octobre 2001	Mai 2002	Octobre 2002	Mai 2001, 1ère série	Mai 2001, 2ème série	Octobre 2001	Mai 2002	Octobre 2002	Mai 2002	Octobre 2002	Mai 2001, 1ère série	Mai 2001, 2ème série	Octobre 2001	Mai 2002			Octobre 2002	
0	1400		795					8,2										"ravine" après hameau des Allemands	écoulement		
1	1450	2137	2546	2756		2428	16,2	10,0	9,3		4,3		8,4	0,30	0,50	très faible		drain principal au niveau de la piste			
1'	1450	1483	1696	2981		2030	17,5	11,9	10,8		7,5		8,1	0,4 L.min ⁻¹	0,4 L/min	très faible		petit drain à côté de 1			
2	1450	1724	1839				15,1	10,9						1 L.min ⁻¹	0,4 L/min			sur la piste après 1 vers le Serre			
3	1450	1004	1074	2706		2170	10,8	9,4	9,2		6,4		8,3	0,2 L.s ⁻¹	0,1 L.s ⁻¹	très faible		juste avant la fin du corps du glissement en allant vers le Serre	branche droite		
3'	1450	1067	1123				15,0	11,5						0,2 L.s ⁻¹	0,1 L.s ⁻¹			juste avant la fin du corps du glissement en allant vers le Serre	branche gauche		
4	1460	2892	3036	2940		2790	13,1	9,8	10,6		9,1		8,1	--	4 L.s ⁻¹	1 L.s ⁻¹		drain noir provenant du glissement au niveau du torrent de Serre			
4'	1460	1241	1319			1616	10,4	8,0			5,8		8,4	--	--			torrent de Serre	au niveau du seuil en bordure de la piste (TVA-63)		
5	1461	2424	2491				21,4	12,4						--	--			flaque (gauche)	(en regardant vers l'aval)		
5'	1461	2401	2635				15,2	10,5						--	--			flaque (droite)	(en regardant vers l'aval)		
6	1461	1082	997				14,0	11,2						--	--			grande flaque			
6'	1461	867					14,6							--	--			flaque à côté de 6			
7	1472	2580	2780				12,8	13,4						très faible	très faible				zone diffuse (ordre du mètre)		
7'	1476		3103					13,7						très faible	très faible				8 non trouvé ?		
8	1470	1322					21,1							--	--			flaque semblant être alimentée par une ravine au-dessus			
9	1482	2836	3092				15,1	13,7						très faible	très faible			au pied d'un bloc oblique	suintements		
10	1493	2424	2613			2456	14	13,7			7,4		8,2	--	--			drain pelle méca	branche droite (en regardant vers l'aval)		
10'	1493	2182	2658			2184	19	12,6			4,8		8,3	--	--			drain pelle méca	branche gauche (en regardant vers l'aval)		
11	1500	1967	2290			2799	13,2	12,1			14,8		8,0	faible	faible			à côté de roseaux	suintement diffus (TVA-51)		
11'	1500		2635					13,2							très faible				suintement	à côté de 11	
12	1509	2624	2769				14,5	14,5						--	--			drain pelle méca	drain à gauche du drain principal		
12'	1514	2647	2780	2735		2481	9,4	9,9	11,8		11,1		8,0	très faible	très faible	très faible		en remontant le drain / à 12	grosse flaque au pied d'un bloc (TVA-10)		
13	1515	2635	2502	3160		2654	10,4	11,2	13,1		16,0		8,1	<<1 L.min ⁻¹	<<1 L.min ⁻¹	très faible		au niveau d'une toile rouillée	suintement (TVA-52)		
14	1522	2702	2825	2814	2875	2016	9,3	10,3	12,8	14,5	15,7	8,07	8,0	<<1 L.min ⁻¹	<<1 L.min ⁻¹	très faible	0,1 L/min	0,1 L.min ⁻¹	suintement ; zone diffuse	branche 1 drain (gauche)	
14'	1522	2725	2836	2895		2158	8,7	9,4	11,9		16,5		7,8	très faible	très faible	2 L.min ⁻¹		très faible	suintement ; zone diffuse	branche drain 2	
14''	1522		2892					11,5						très faible	très faible						
15	1515	1950	2802	2064		2764	8,4	11,0	13,0		12,8		7,7	1 L.min ⁻¹	1 L.min ⁻¹	40 mL.s ⁻¹		0,5 L.s ⁻¹	suintement au pied d'un bloc 20 m / rive gauche	partie droite (en regardant vers aval) (TVA-11 et TVA-55)	
15'	1515	1931	2802	2122			8,3	12,5	13,1					1 L.min ⁻¹	1 L.min ⁻¹	250 mL.s ⁻¹			suintement au pied d'un bloc 20 m / rive gauche	partie gauche	
16	1543	1870	2791	2108	2810	2894	8,4	7,7	13,0	9,9	13,2	7,34	7,6	<<1 L.min ⁻¹	<<1 L.min ⁻¹	très faible	0,5 L/min	0,1 L.min ⁻¹	source à 70 m -/ rive gauche	suintement (TVA-53)	
17	1546	1284	1393	1808	1744	1628	7,9	7,1	9,1	6,3	9,9	7,41	7,8	2 L.min ⁻¹	4 L.min ⁻¹	0,7 L.s ⁻¹	1 L/min	très faible	à côté de 16, en bordure du glissement	Q régulier en mai 2001 (TVA-23 et TVA-54)	
18	1553	1501	2133		2709		12,7	8,8		12,1		7,53		<<1 L.min ⁻¹	<<1 L.min ⁻¹			très faible	zone diffuse de suintement		
18'	1556	2246	2246	2116	3480		8,5	10,2	16,9	5,8		7,53		0,1 L.s ⁻¹	0,1 L.s ⁻¹	9 mL.s ⁻¹	très faible		3 m au-dessus / à 18 au départ d'un drain	suintement	
19	1545	2379	2457				13,7	11,8						0,1 L.s ⁻¹	0,2 L.s ⁻¹				sortie de drain PVC		
20	1566	1897	2413	2240		2490	10,8	9,1	11,9		12,1		7,8	0,1 L.s ⁻¹	0,1 L.s ⁻¹	0,1 L.s ⁻¹		40 mL.s ⁻¹	au milieu de qqes blocs (20 m / rive gauche)	réurgence	
21	1570	1946					7,4							1 L.min ⁻¹					juste en aval de 22		
22	1575	2368	2379	2825		2429	9,2	9,2	13,9		13,0		7,9	1,5 L.min ⁻¹	1,5 L.min ⁻¹	0,1 L.s ⁻¹		très faible	drain naturel au milieu de blocs et troncs, en amont du drain principal	réurgence	
23	1585	2301	2368	2470		2409	8,3	8,7	12,0		10,7		7,8	très faible	très faible	très faible		très faible	décalle vers bordure gauche / 22	flaque d'accumulation	
24	1590	2182	2335				10,9	9,4						<<1 L.min ⁻¹	<<1 L.min ⁻¹				début zone à gros blocs à côté de drains noirs, à 20 m de la bordure gauche	suintement	
25	1600	2357	2424				8,2	8,5						1 L.min ⁻¹	1 L.min ⁻¹				derrière gros blocs du 24	réurgence	
26	1605	1993	2033	2031	2914		9,0	8,8	11,8	13,7		7,7		0,25 L.min ⁻¹	0,5 L.min ⁻¹	27 mL.s ⁻¹	très faible		à 10 m de la bordure gauche, en face du piquet rouge et blanc	zone de petites émergence étalée	
27	1610	2215	2279	2008	2729	2336	8,4	8,9	11,7	8,8	9,4	7,33	7,8	0,5 L.min ⁻¹	0,5 L.min ⁻¹	très faible	très faible	très faible	au pied d'un bloc et d'un PVC debout	petite réurgence (TVA-22)	
28	1613	2324	2390	2392		2442	8,7	8,9	10,4		9,2		7,6	1 L.min ⁻¹	1 L.min ⁻¹	très faible		0,5 L.min ⁻¹	3 m au-dessus / à 27 en partant vers la gauche	zone diffuse ; réurgence (TVA-56)	
29	1615	2379	2457				8,3	8,4						1 L.min ⁻¹	1 L.min ⁻¹				au niveau du PVC		
30	1665	2198	2219	2183	2038		9,4	9,7	10,6	9,8		7,35		3,5 L.s ⁻¹	3 L.s ⁻¹	1 L.s ⁻¹	3 L.s ⁻¹		drain déboîté sur rive gauche	(TVA-12 et TVA-21)	
30'	1705		1809					12,8			7,0		8,3		très faible			très faible	flaque bord des ravines rive gauche		
31	1833	519	538			523	7,5	8,8			10,3		7,9	0,1 L.s ⁻¹	0,1 L.s ⁻¹			très faible	en dessous escarp rive droite, au-dessus embranchement du Serre		
31'	1833		3059	2856	2744			12,0	10,6	15,6		7,7			très faible	très faible	très faible		plus intérieur du glissement	(TVA-13)	
32	1720	577	716				10,4	11,7						--	--				dans le torrent du Serre	le débit semble plus faible qu'au niveau du seuil	
32'	1790		441					13,2													
33	1710	1545	1720				10	9,8						très faible	très faible				à côté du Serre dans le glissement		
33'	1510		936	3370				12,8	15,2						faible	20 mL.s ⁻¹			+50 m au-dessus de la piste, côté Serre	ruissellement (TVA-14)	
34	1440	1983		1751			10,9		10,9					4 L.s ⁻¹					drain déboîté à la Fme de la Valette	drain réparé rapidement	
34'	1440		1491	1701	1551	1707			12,3	13,3	11,2	7,1	7,3		très faible	très faible		très faible	Source Fme de la Valette		
35	1190	1636	1837	2441	2398	2290	12,6	13,5	13,2	14,0	10,3	8,25	8,3	--	--	--	--	--	torrent de la Valette au niveau du piège	(TVA-62)	
36	1260	1696	2053	1670	1753	1955	16,7	13,2	15,0	16,5	11,8	8,06	8,1	3 L.min ⁻¹	6 L.s ⁻¹	125 mL.s ⁻¹	très faible	15 L.s ⁻¹	fin de dérivation de la Valette	rive gauche ; PVC gris (TVA-59)	
37	1266	1887	2086	2746	2954	2359	11,6	11,3	13,4	14,9	10,2	7,96	8,2	--	--	--			fin de dérivation du Serre	(TVA-60)	
38	1299	3103	3382				11,5	13,3						1 L.min ⁻¹	1 L.min ⁻¹				à côté de la cabane RTM-CODIS		
39	1320	1888	2007				12	11,9						--	--					au niveau de la confluence	
40	1330	1329	1628	2129			13,9	13,6	13,2					--	--	--			torrent de Serre	au niveau de la confluence	
41	1320	2175	2168				13,9	14,2						--	--	--			torrent de la Valette	au niveau de la confluence	
42	1330	5097	5064				11,3	15,2						très faible	très faible				au niveau des efflorescences la Valette		
43	1355	1417	1331				15,3	15,6						très faible	très faible				ruissellement un peu plus haut que 42		
43'	1355		1077					11,2						très faible	très faible				un peu à côté en remontant		
44	1330	1494	1965	3020	2435		12,3	12,0	13,4	8,3		--	--	--	--	--	--	--	torrent de Serre		
45	1335	1223	1369	2075	2427	2263	12,7	14,1	12,4	13,6	10,3	8,3	8,3	2,5 L.s ⁻¹	2,5 L.s ⁻¹	1,25 L.s ⁻¹	2 L.s ⁻¹	20 L.s ⁻¹	sortie de 2 drains PVC gris (les 2 sont équiv.)	(TVA-61)	
46	1495		1987			2220			10,1		5,1								drain le + en bordure gauche du glissement		
47	1560		3150	3290					10,7	7,3		7,52			très faible	très faible			au milieu du glissement en haut drain principal		
48	1900			1323						16,8		7,98				très faible			niche d'arrachement (au centre)	mesuré à 1870 m (TVA-20)	
49	1522					1186					9		8,18						marre un peu au-dessus de 12'		
50	1538					1718					12,1		8,14						rive gauche		
51	1863					2921					10,9		7,14						niche côté Serre	(TVA-57)	
51'	1860					2735					9,1		7,46						niche côté Serre	odeur mat orga (TVA-58)	

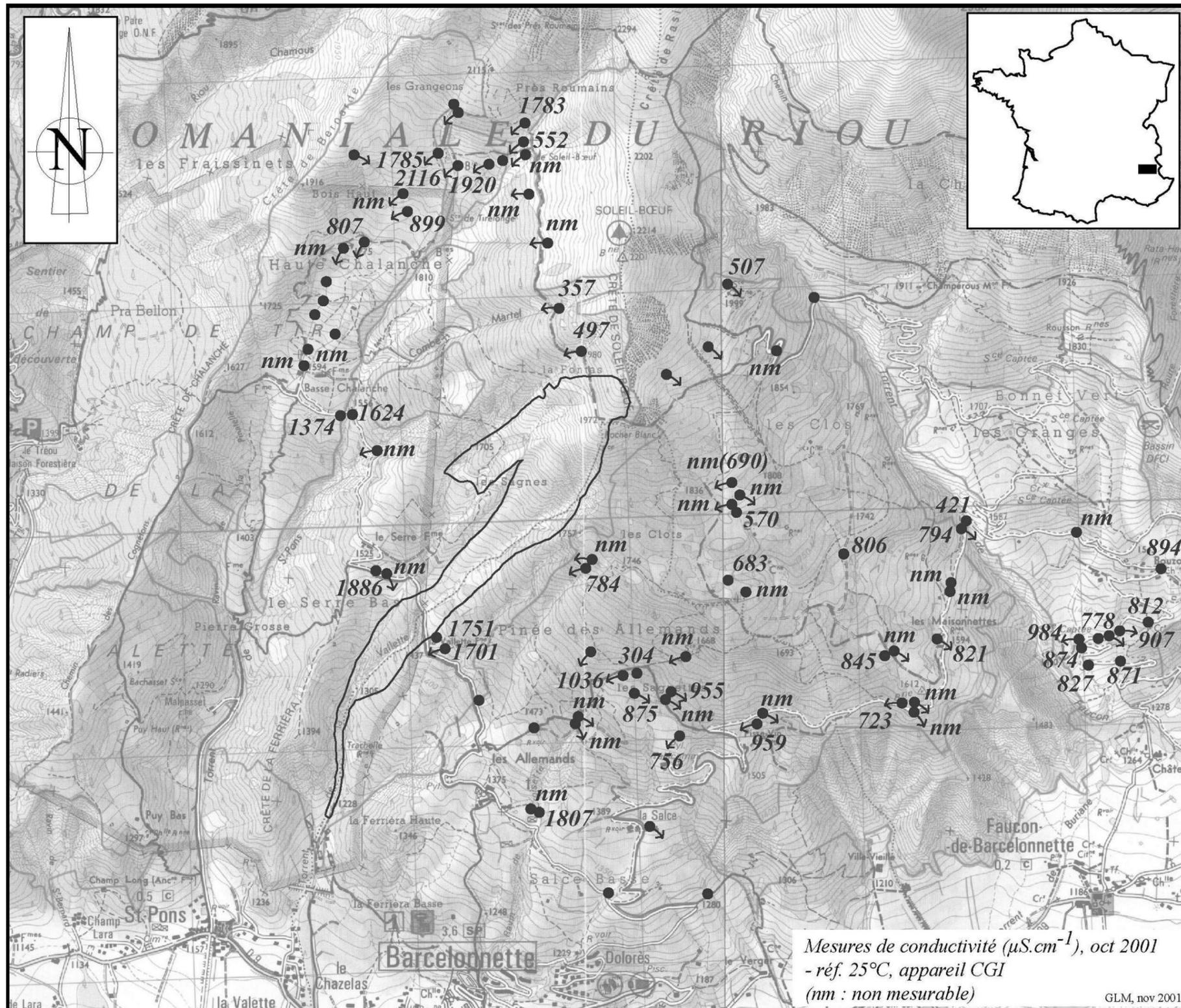
Annexe 3-11. Carte de conductivités (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) mesurées sur l'Adroit lors de la mission d'août 2000 ; les valeurs ont été recalculées de manière à être à une température de référence de 25°C.

Annexe 3-12. Carte de conductivités (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) mesurées sur l'Adroit lors de la mission de mai 2001 (1^{ère} série) ; les valeurs ont été recalculées de manière à être à une température de référence de 25°C.

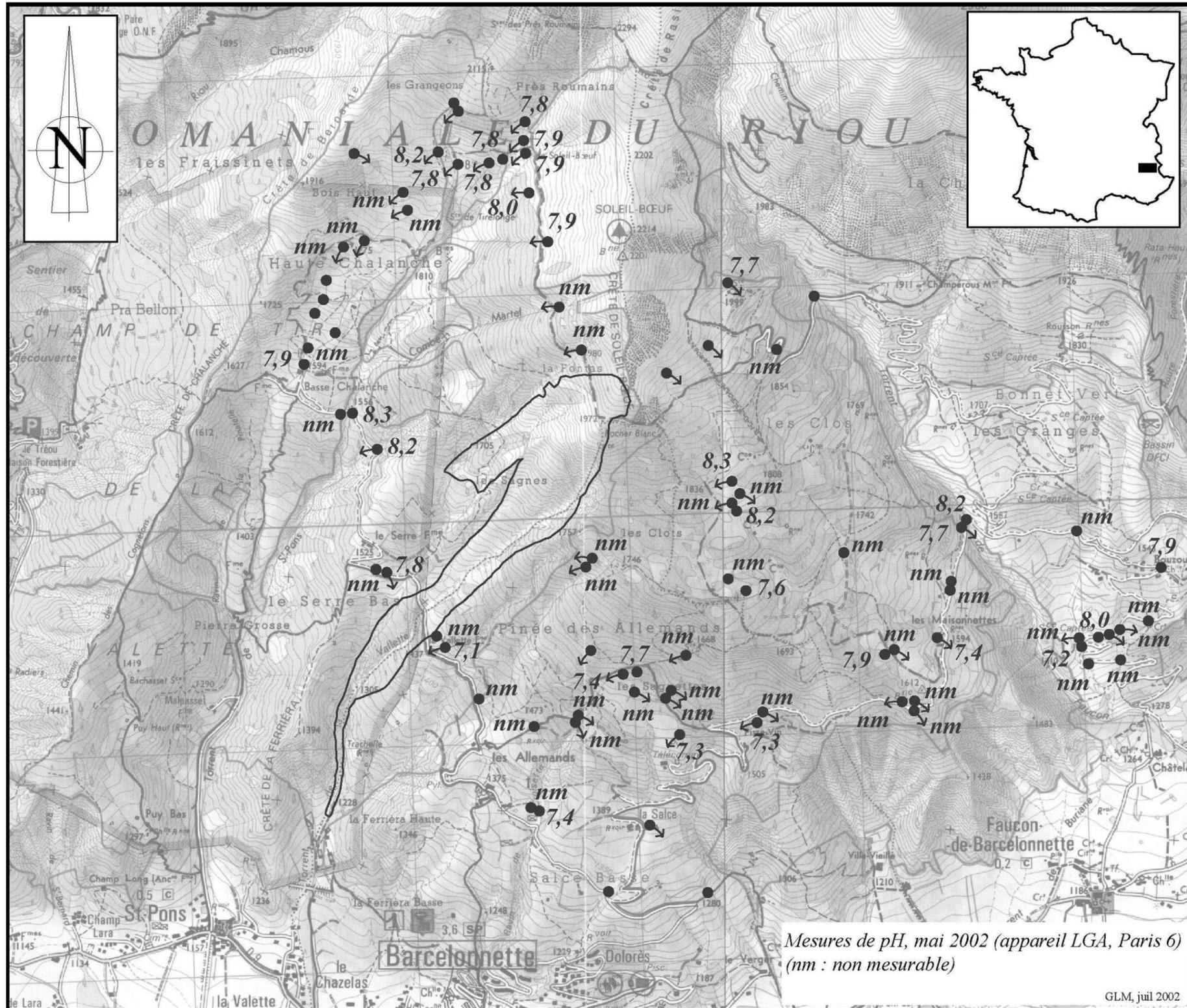


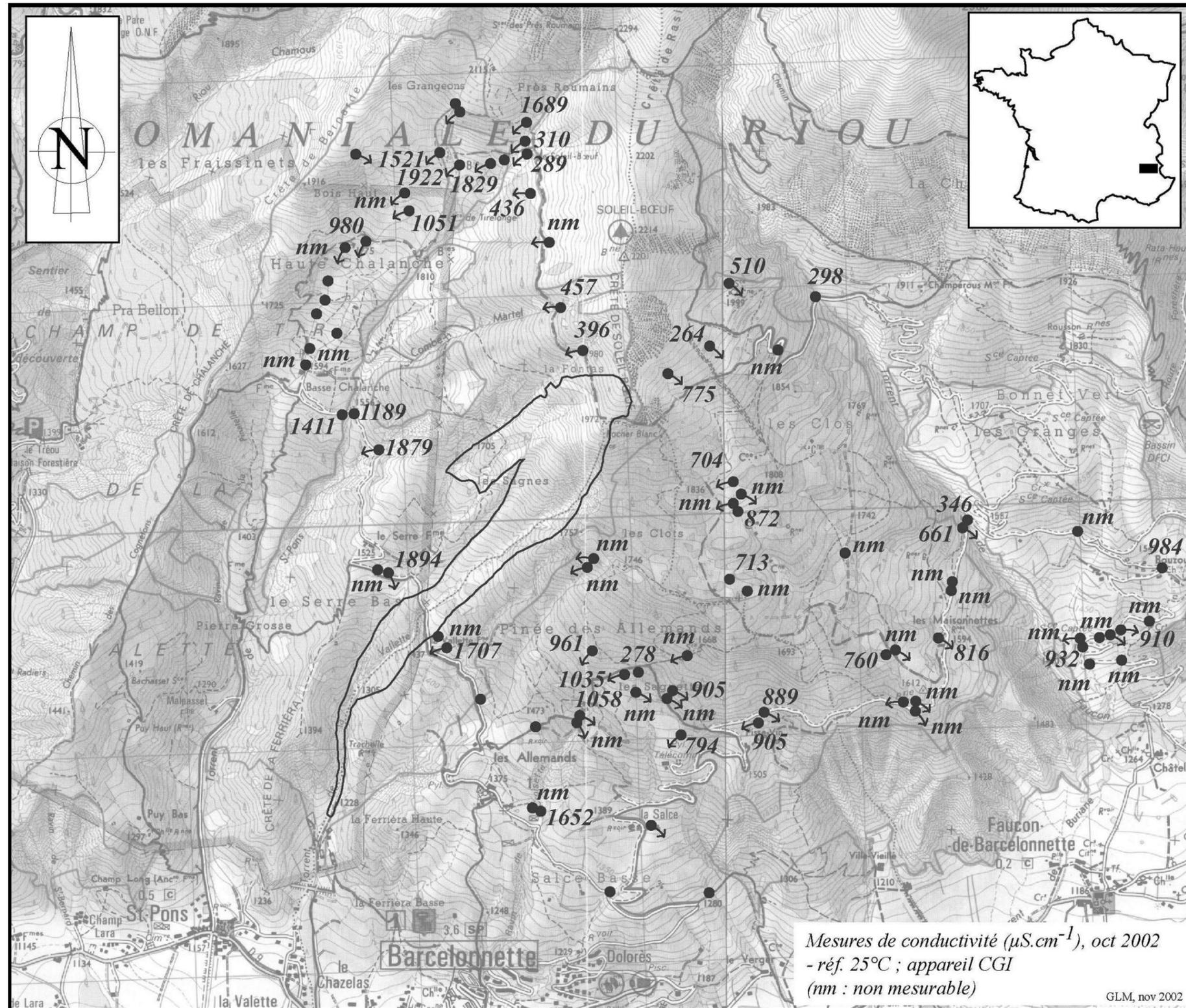
Annexe 3-13. Carte de conductivités (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) mesurées sur l'Adroit lors de la mission de mai 2001 (2^{ème} série) ; les valeurs ont été recalculées de manière à être à une température de référence de 25°C.

Annexe 3-14. Carte de conductivités (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) mesurées sur l'Adroit lors de la mission d'octobre 2001.

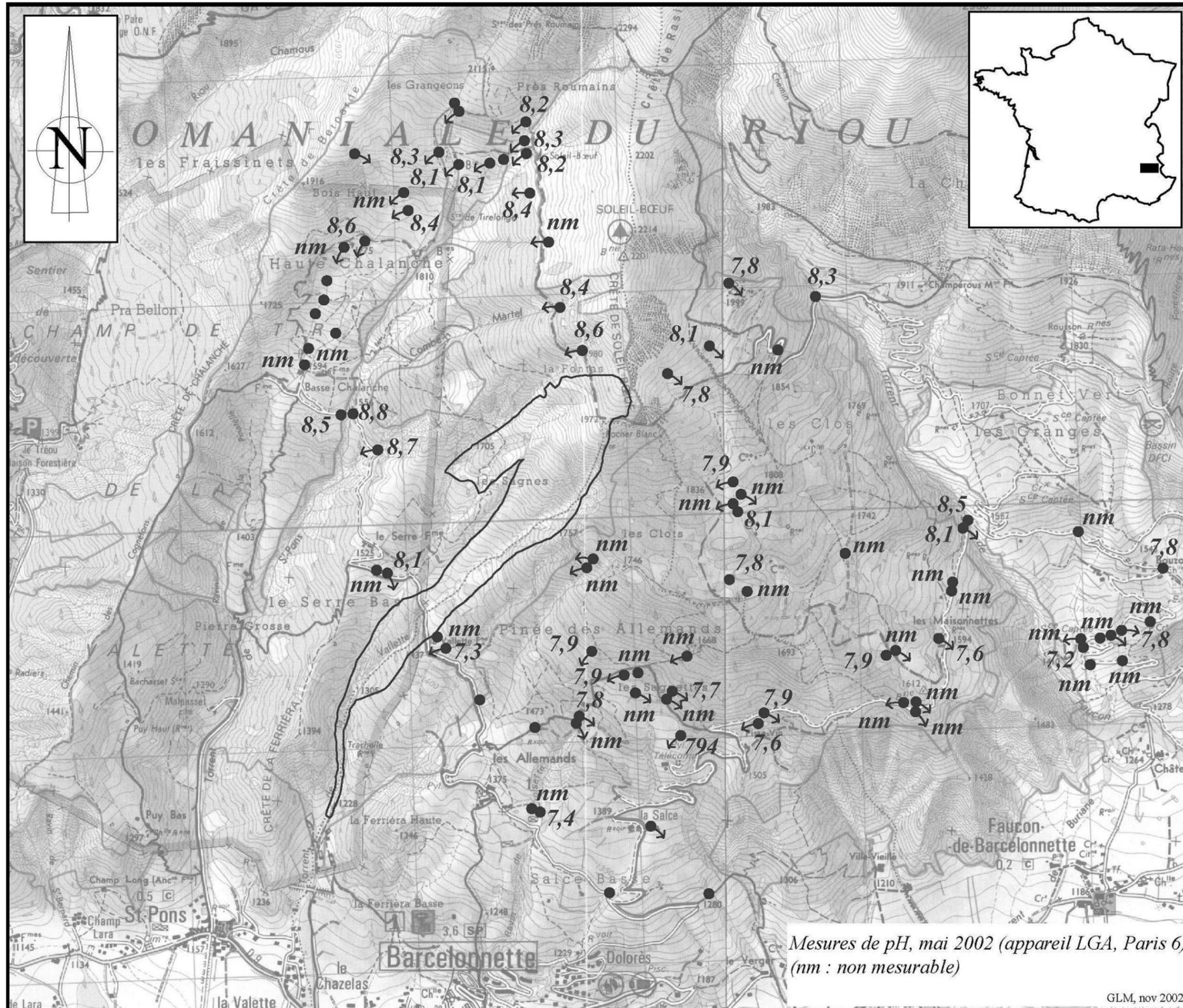


Annexe 3-16. Carte de pH mesurés sur l'Adroit lors de la mission de mai 2002.

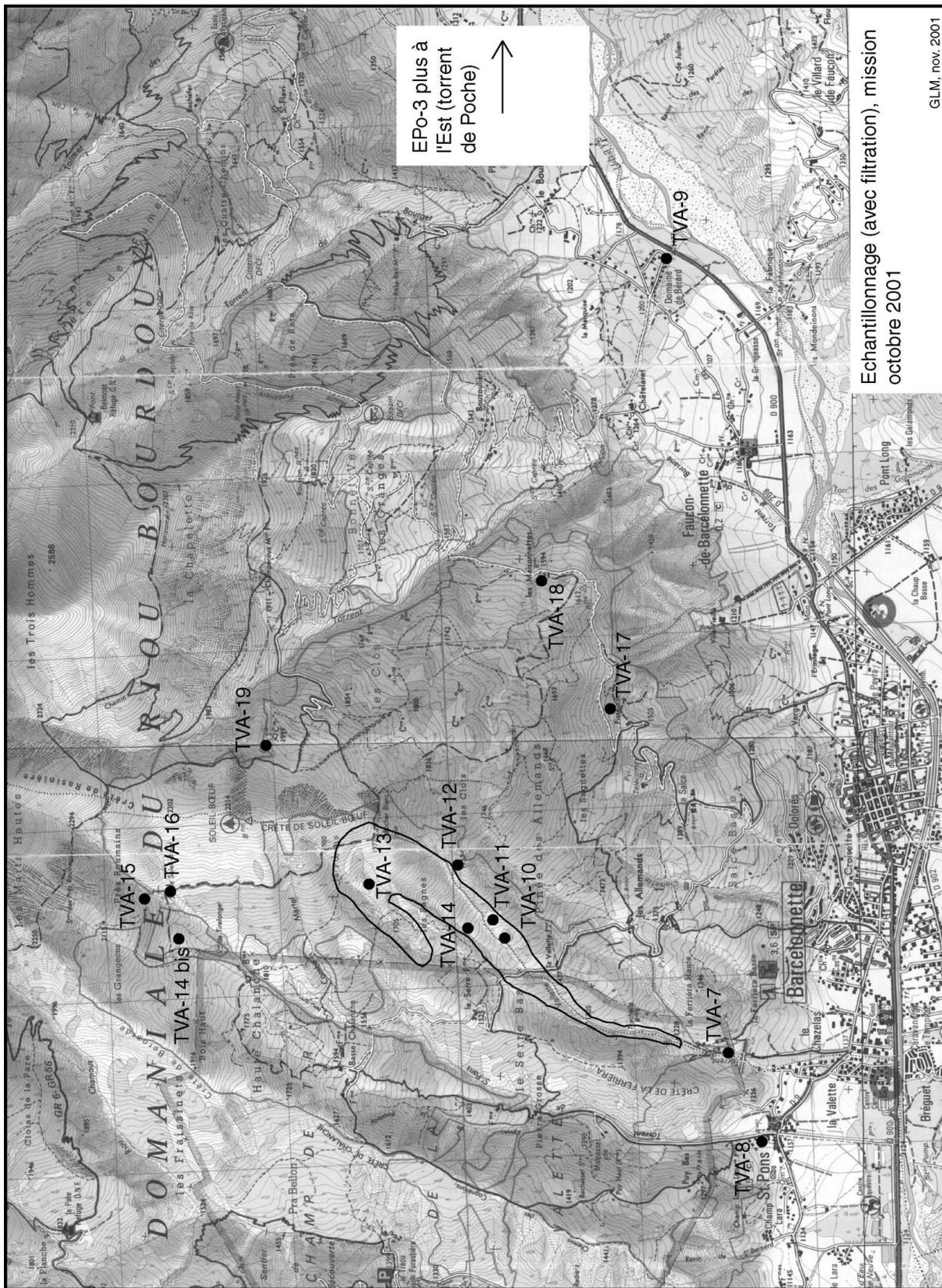


Annexe 3-17. Carte de conductivités (en $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) mesurées sur l'Adroit lors de la mission d'octobre 2002.

Annexe 3-18. Carte de pH mesurés sur l'Adroit lors de la mission de octobre 2002.



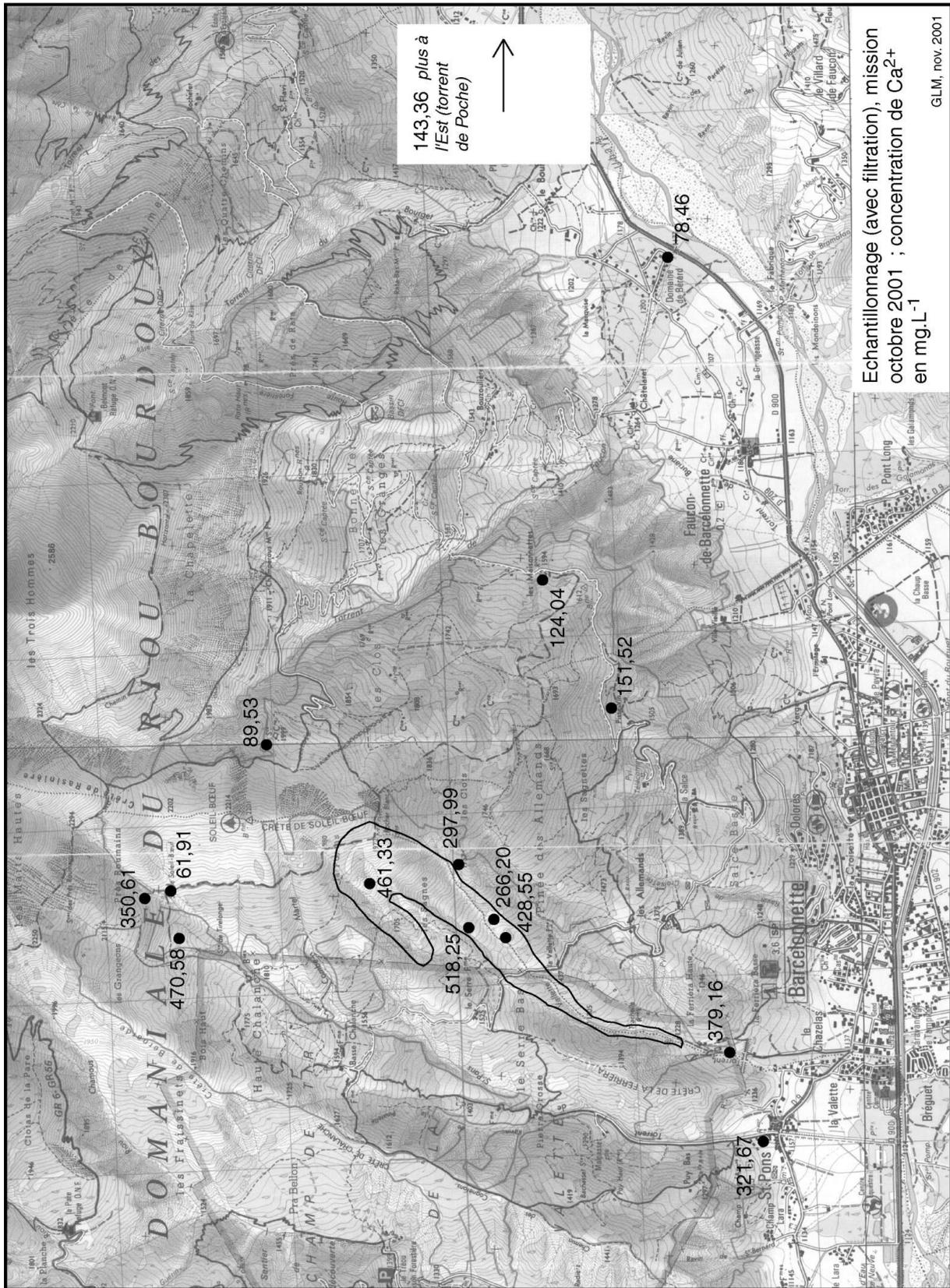
Annexe 3-19. Carte des échantillons prélevés en octobre 2001.



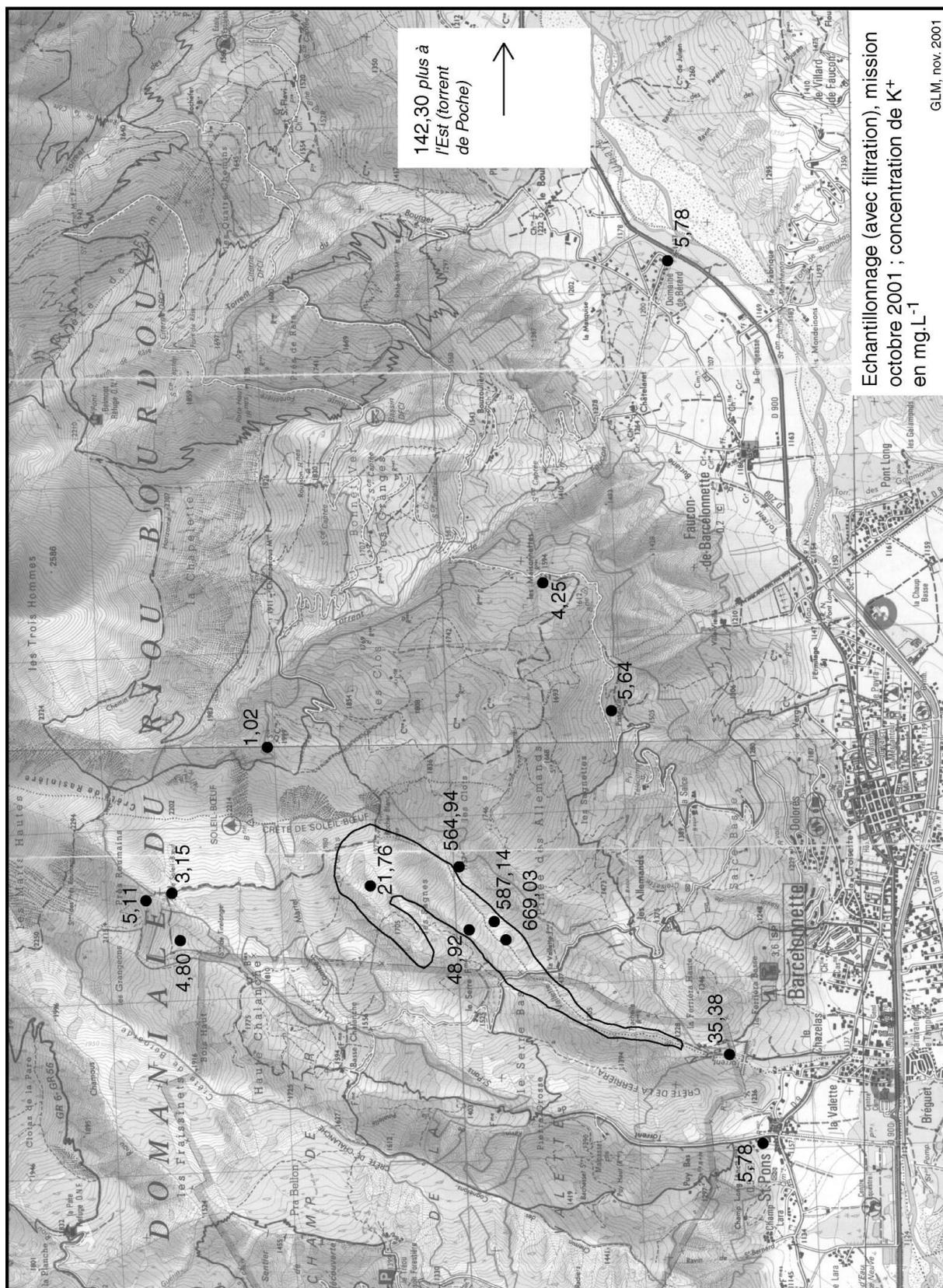
Echantillonnage (avec filtration), mission octobre 2001

GLM, nov. 2001

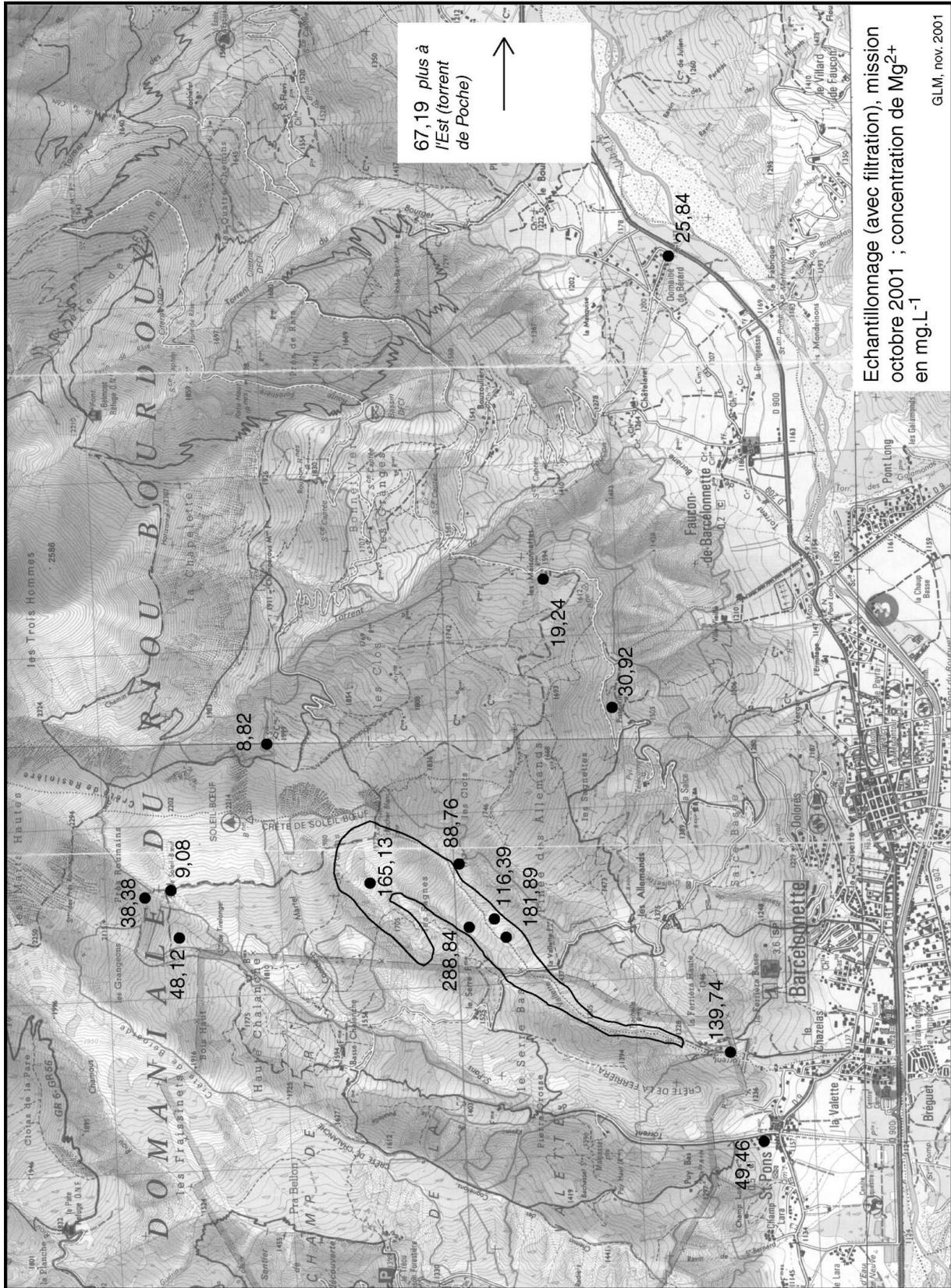
Annexe 3-20. Carte des concentrations de Ca²⁺ relevées en octobre 2001.



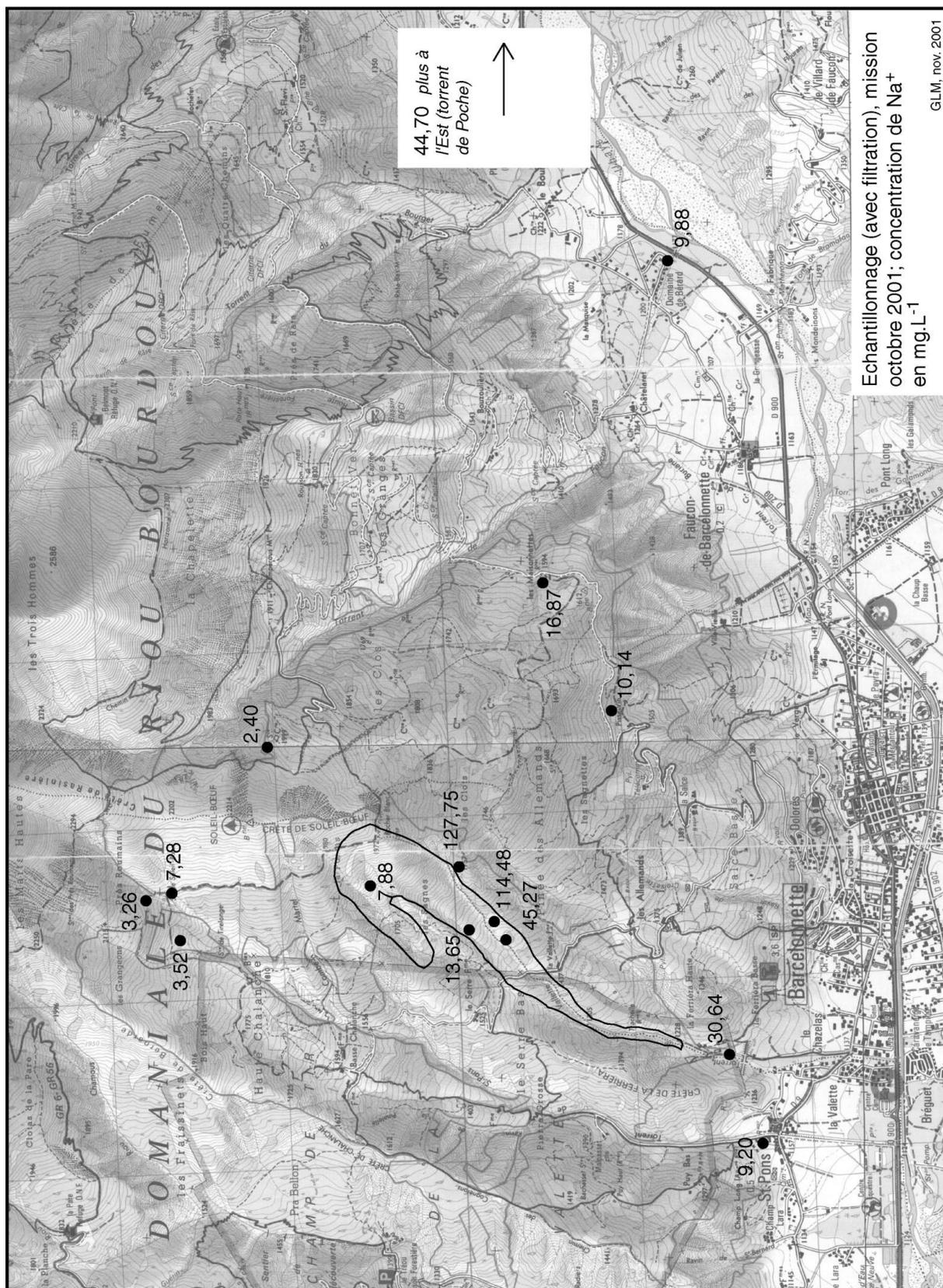
Annexe 3-21. Carte des concentrations de K⁺ relevées en octobre 2001.



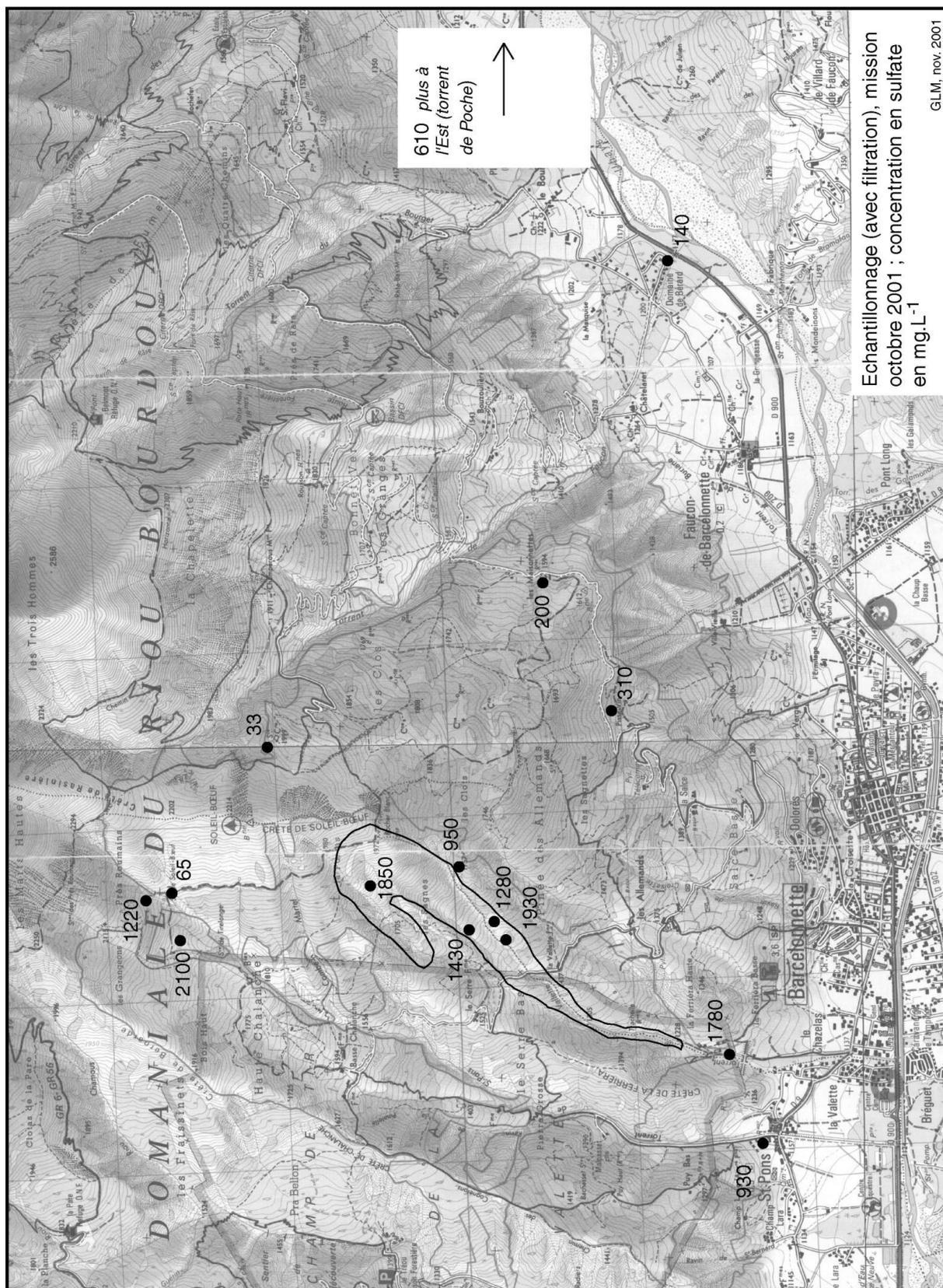
Annexe 3-22. Carte des concentrations de Mg^{2+} relevées en octobre 2001.



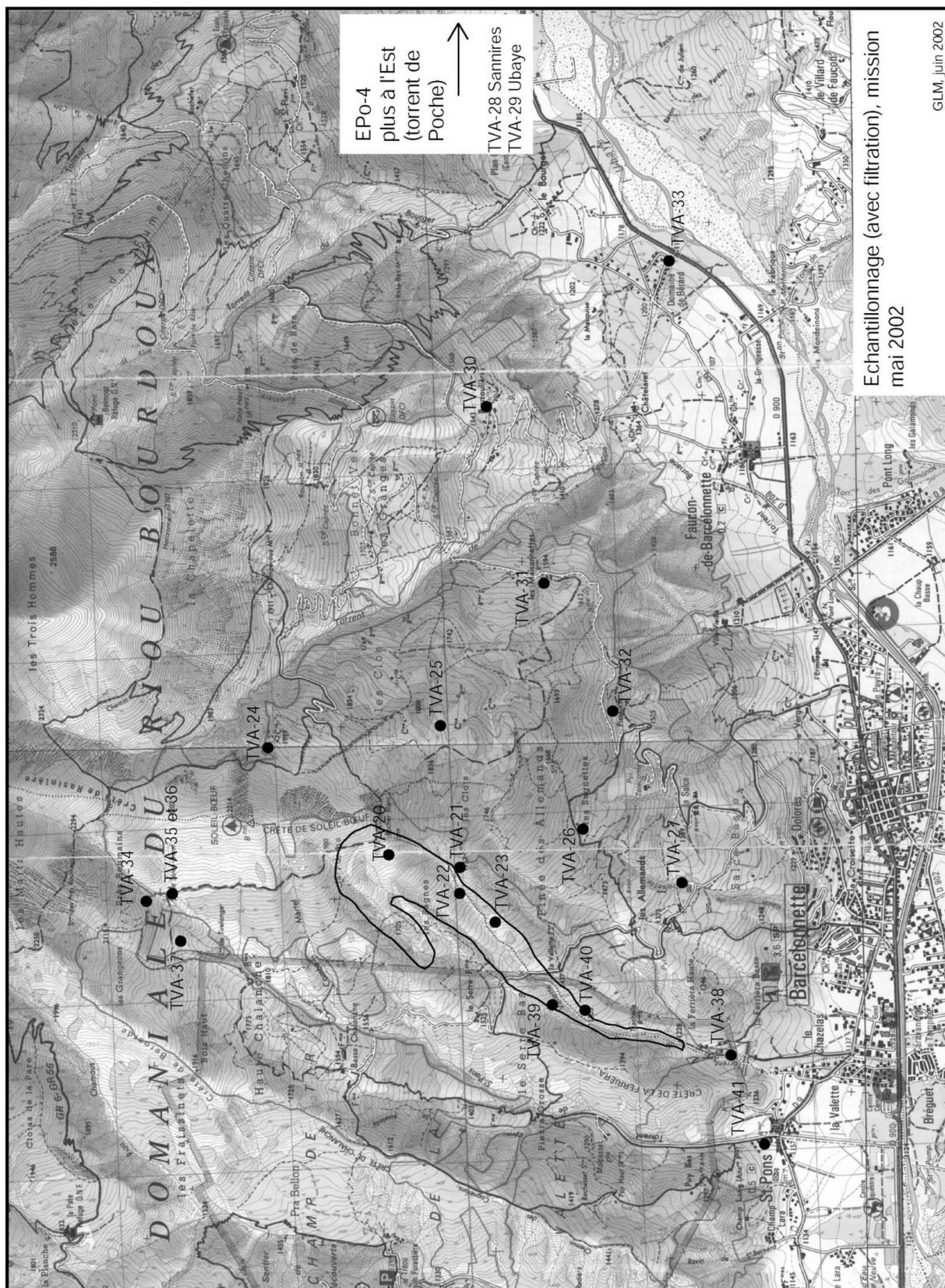
Annexe 3-23. Carte des concentrations de Na⁺ relevées en octobre 2001.



Annexe 3-24. Carte des concentrations de SO_4^{2-} relevées en octobre 2001.

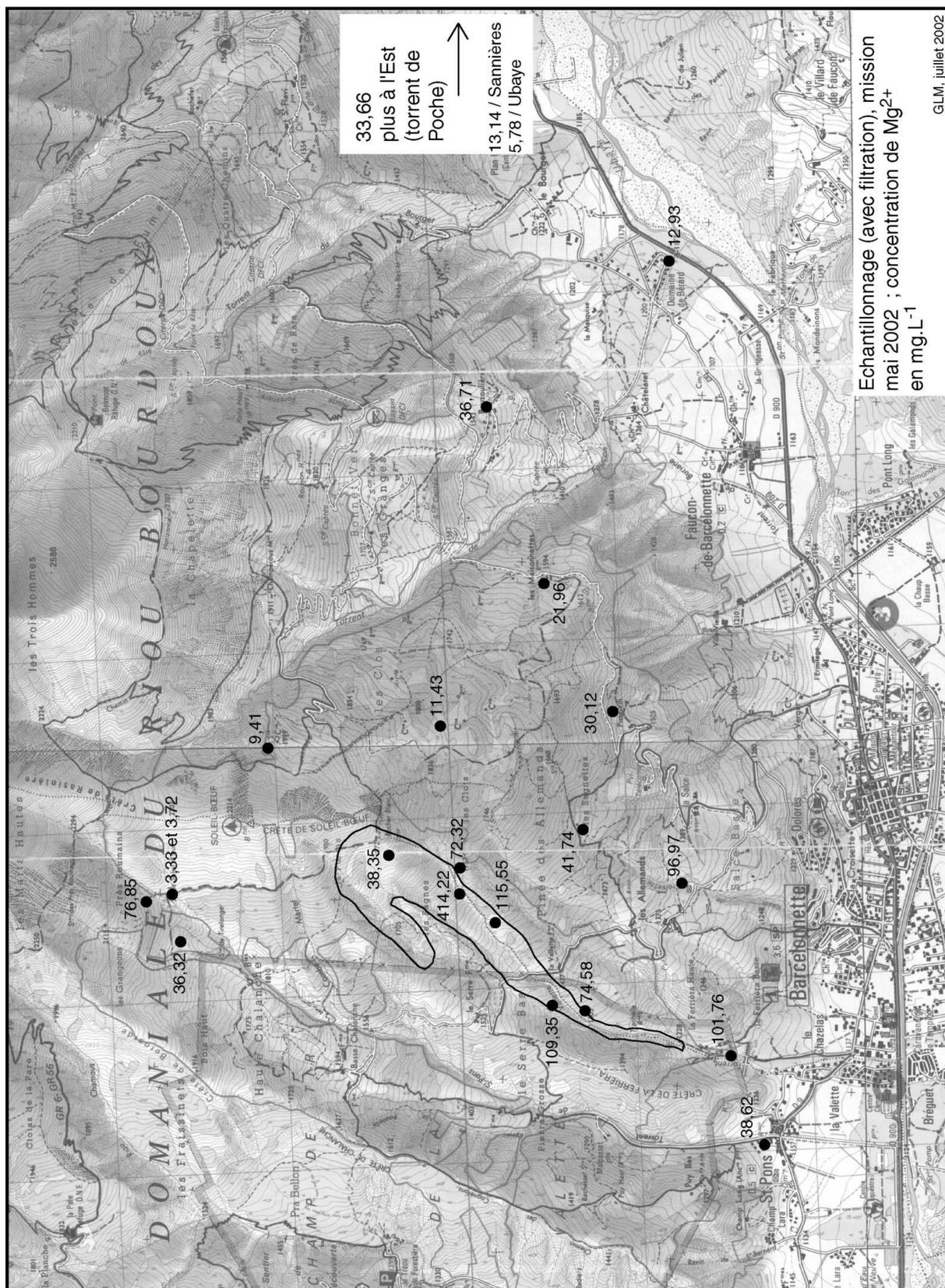


Annexe 3-25. Carte des échantillons prélevés en mai 2002.

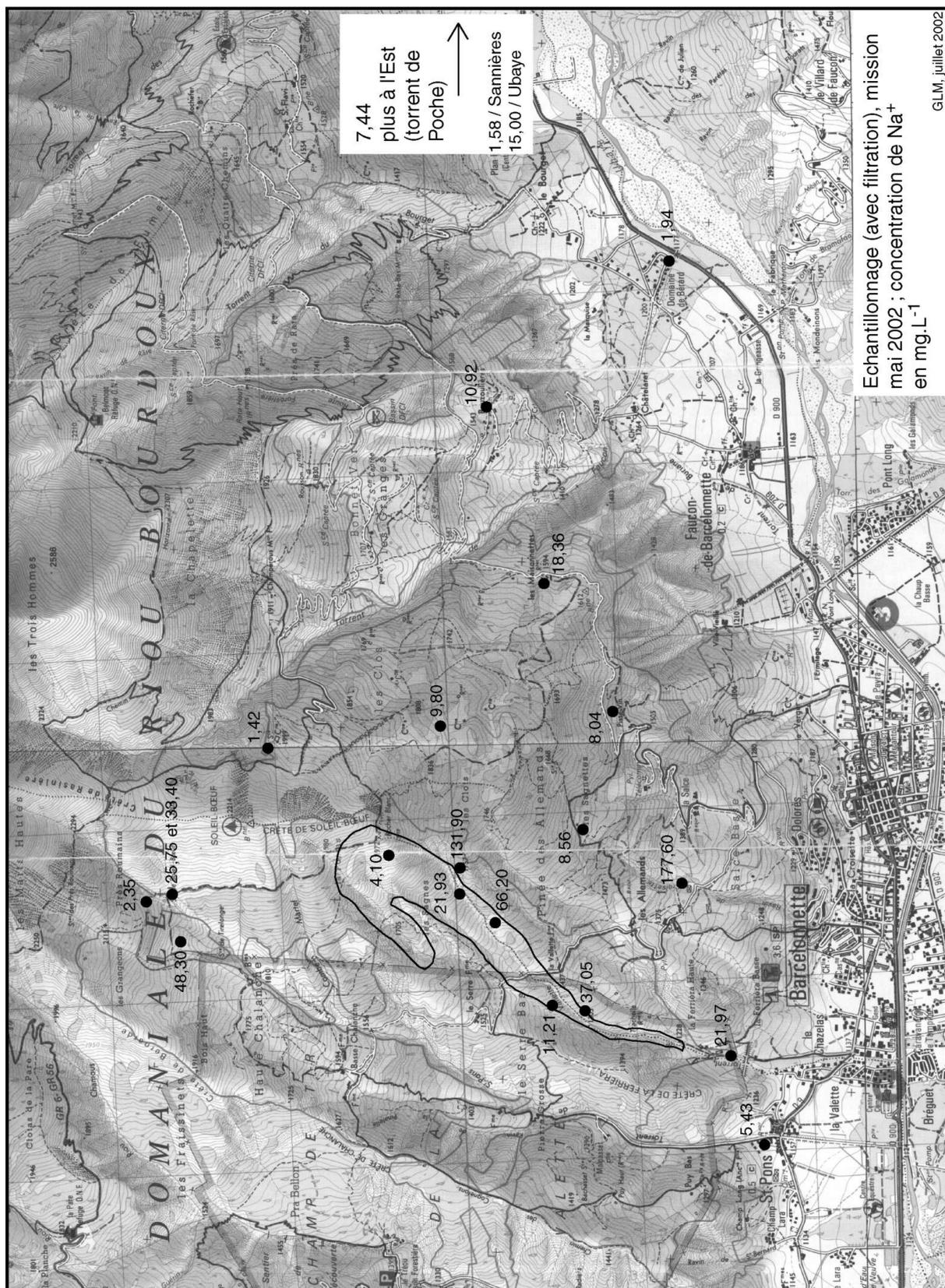


GLM, juin 2002

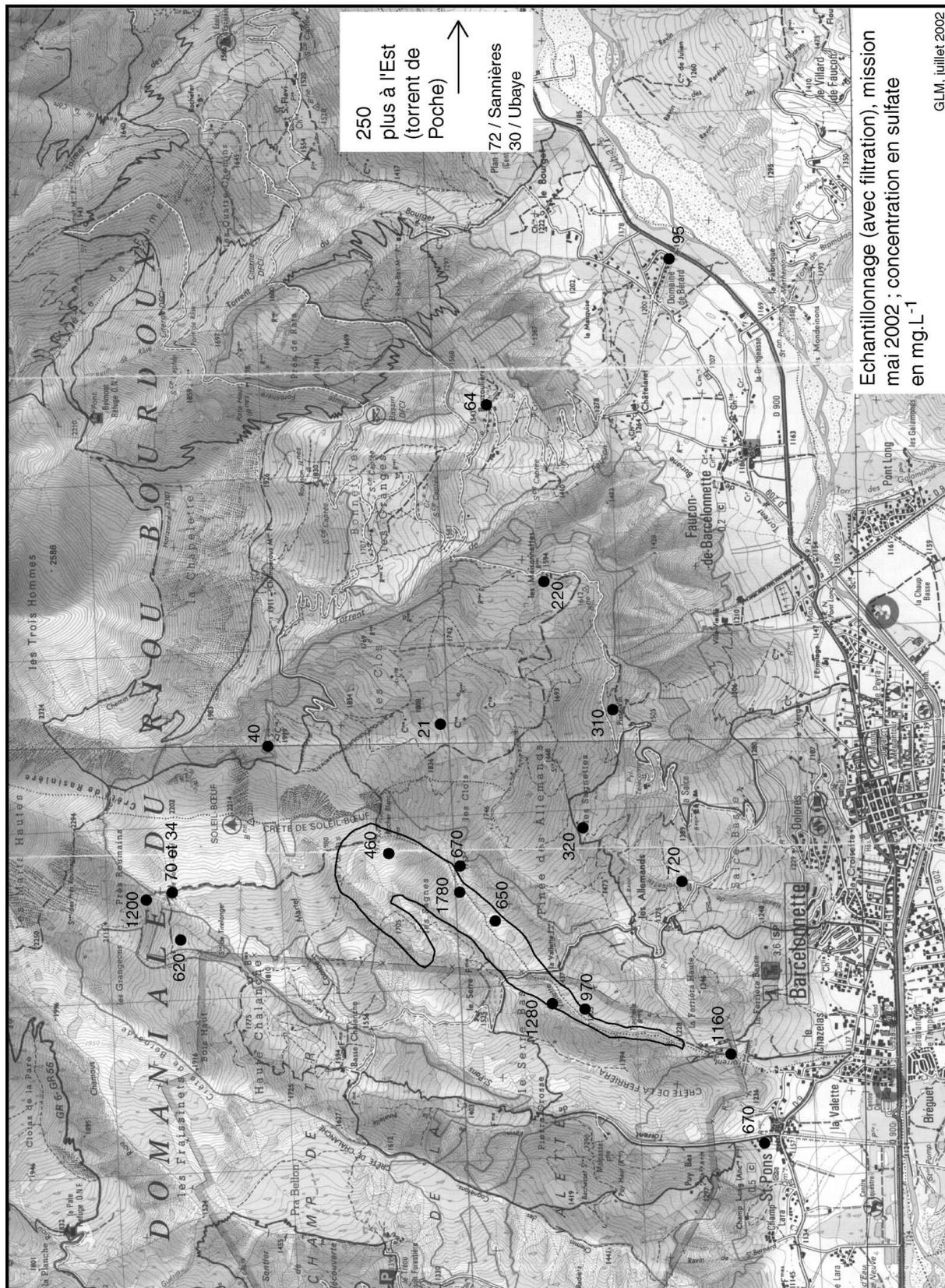
Annexe 3-29. Carte des concentrations de Mg^{2+} relevées en mai 2002.



Annexe 3-30. Carte des concentrations de Na⁺ relevées en mai 2002.

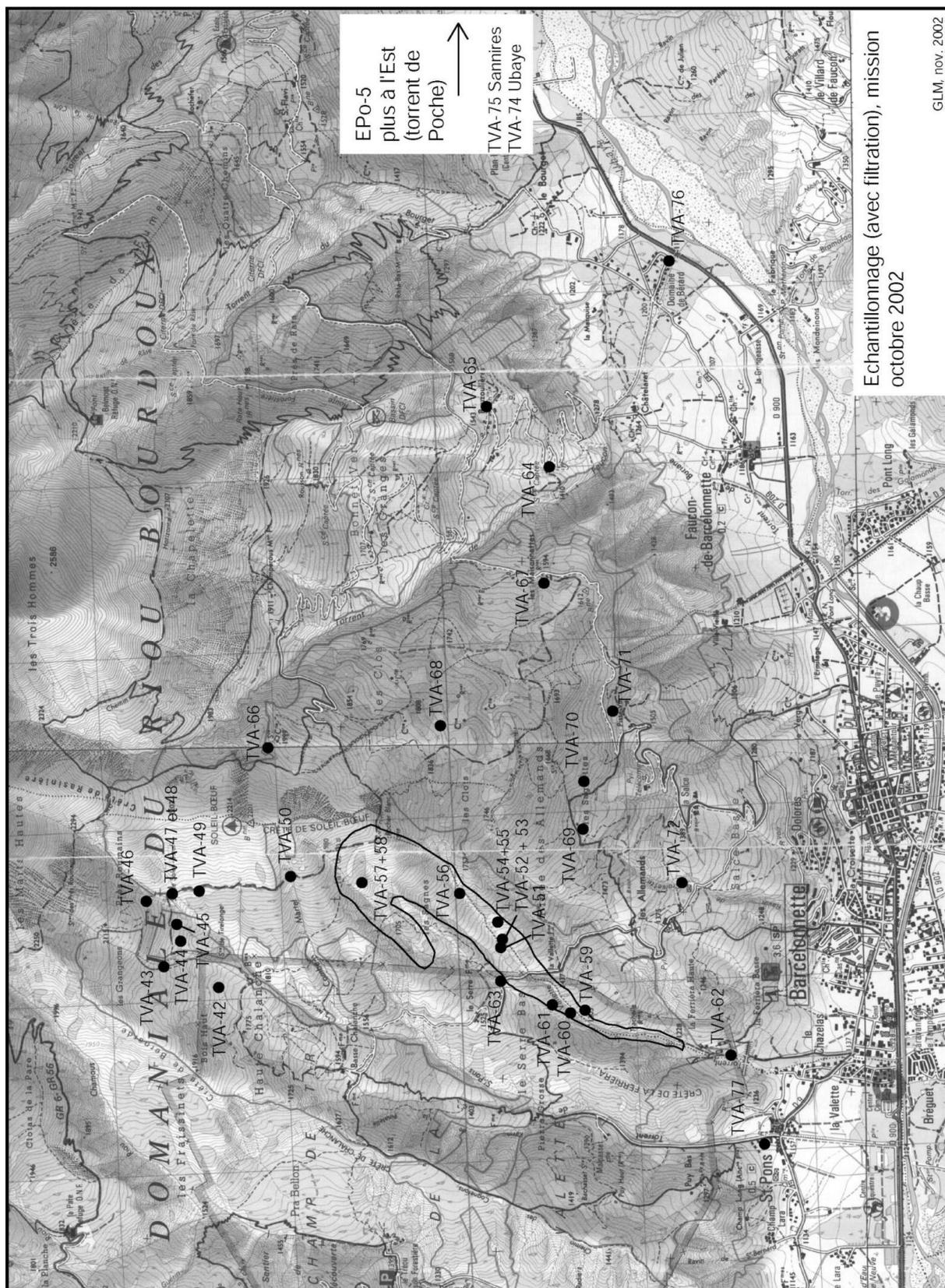


Annexe 3-31. Carte des concentrations de SO_4^{2-} relevées en mai 2002.



GLM, juillet 2002

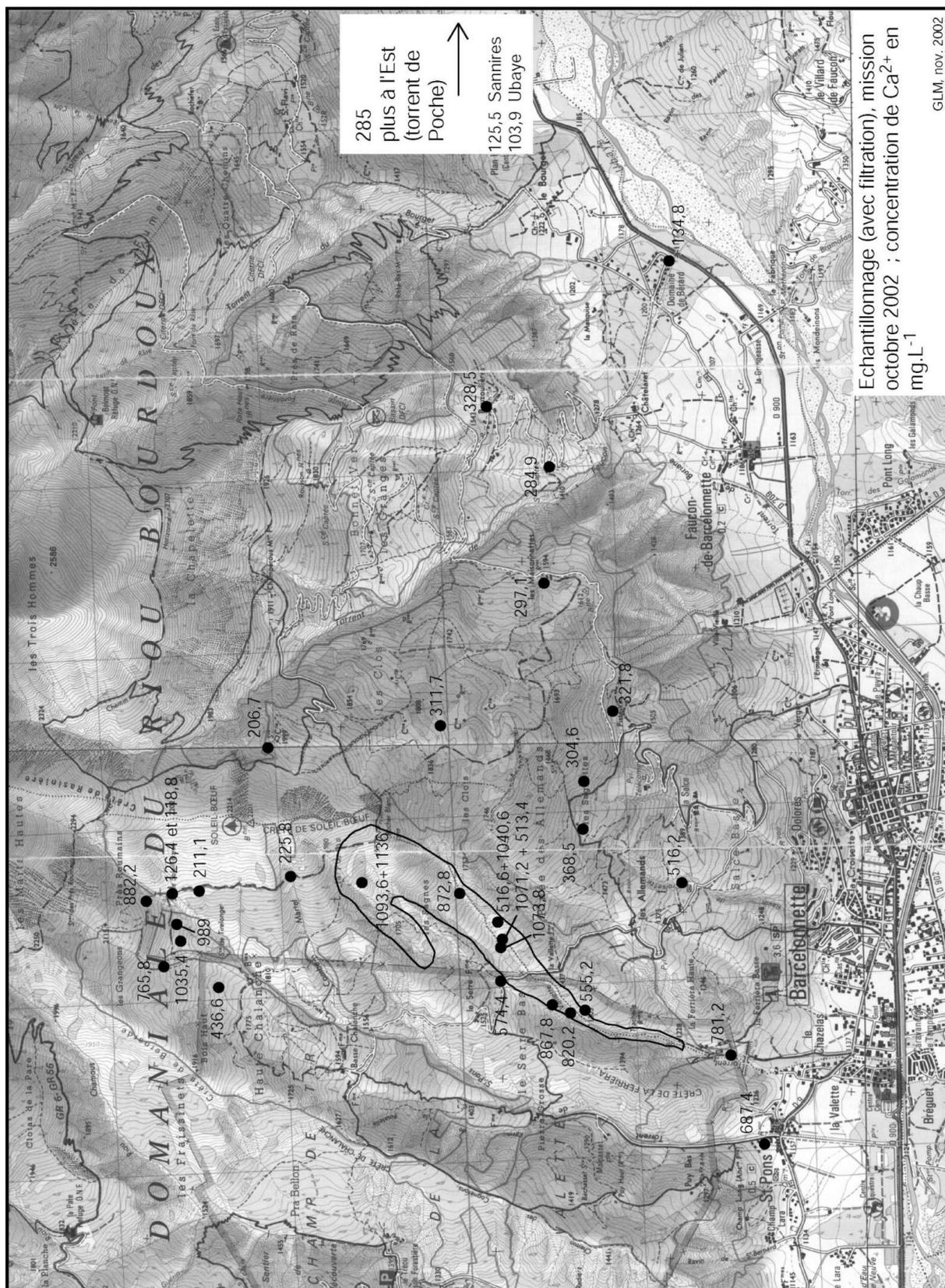
Annexe 3-34. Carte des échantillons prélevés en octobre 2002.



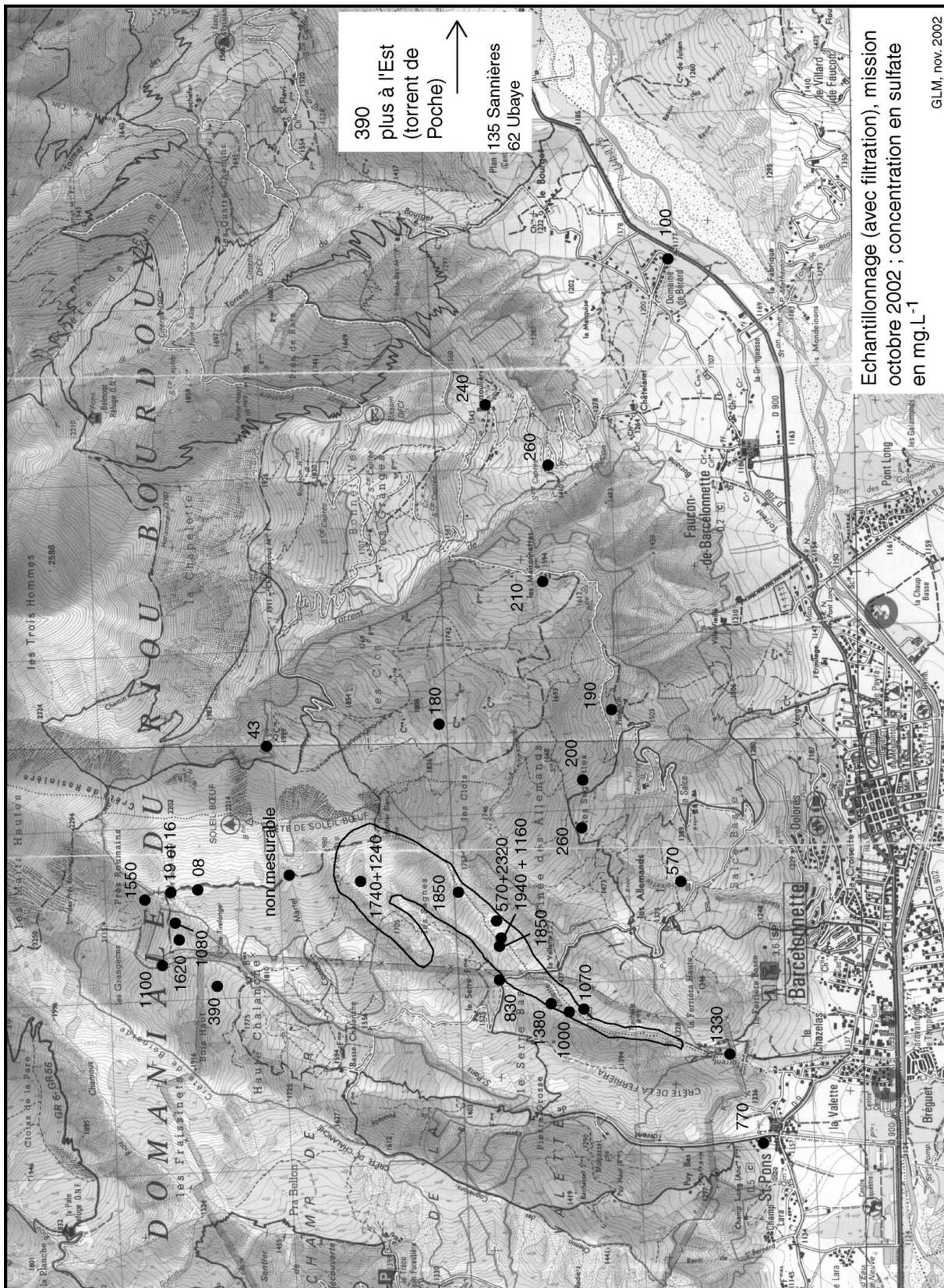
Echantillonnage (avec filtration), mission
octobre 2002

GLM, nov. 2002

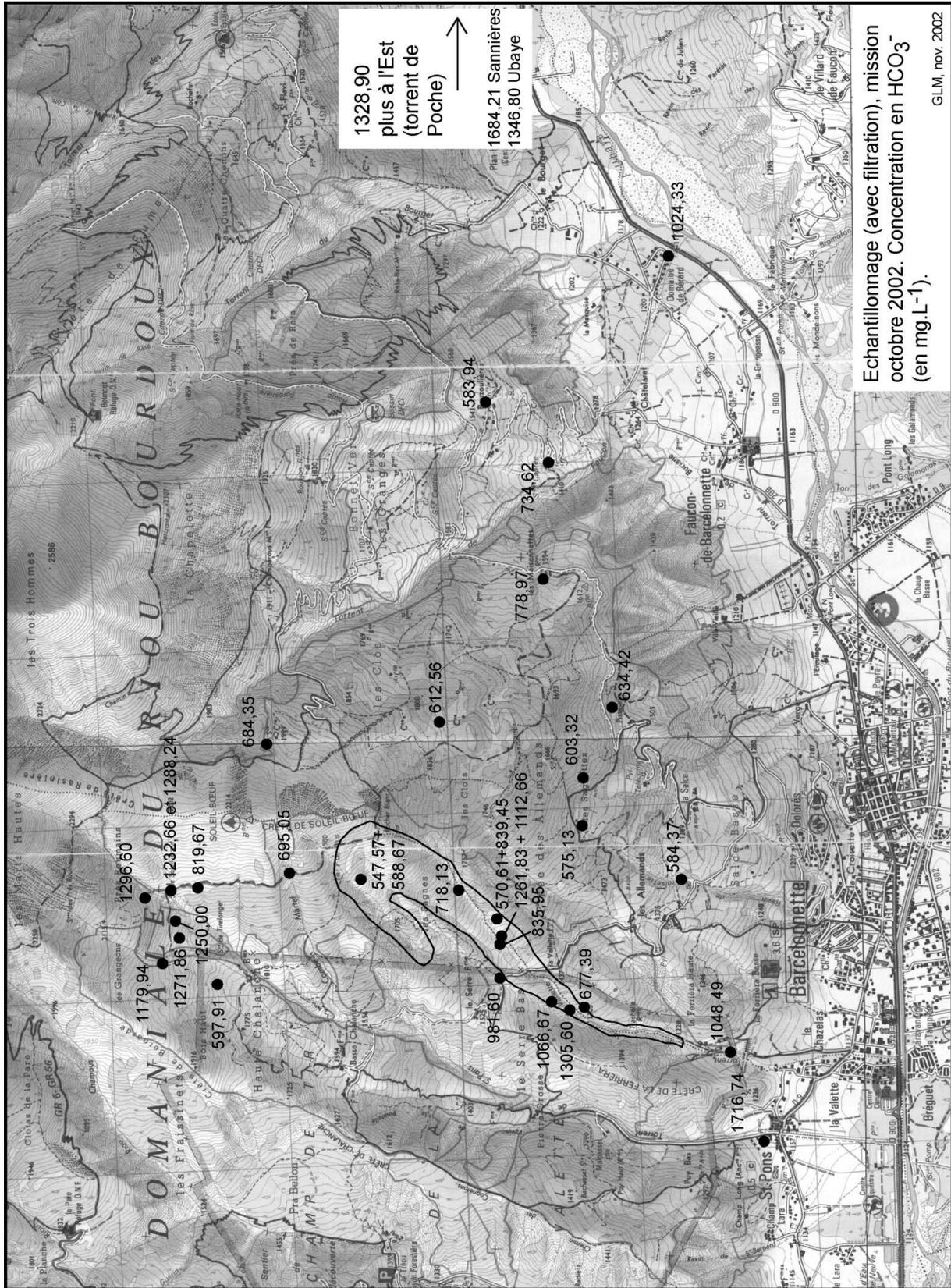
Annexe 3-35. Carte des concentrations en Ca²⁺ (octobre 2002).



Annexe 3-39. Carte des concentrations en sulfates (octobre 2002).

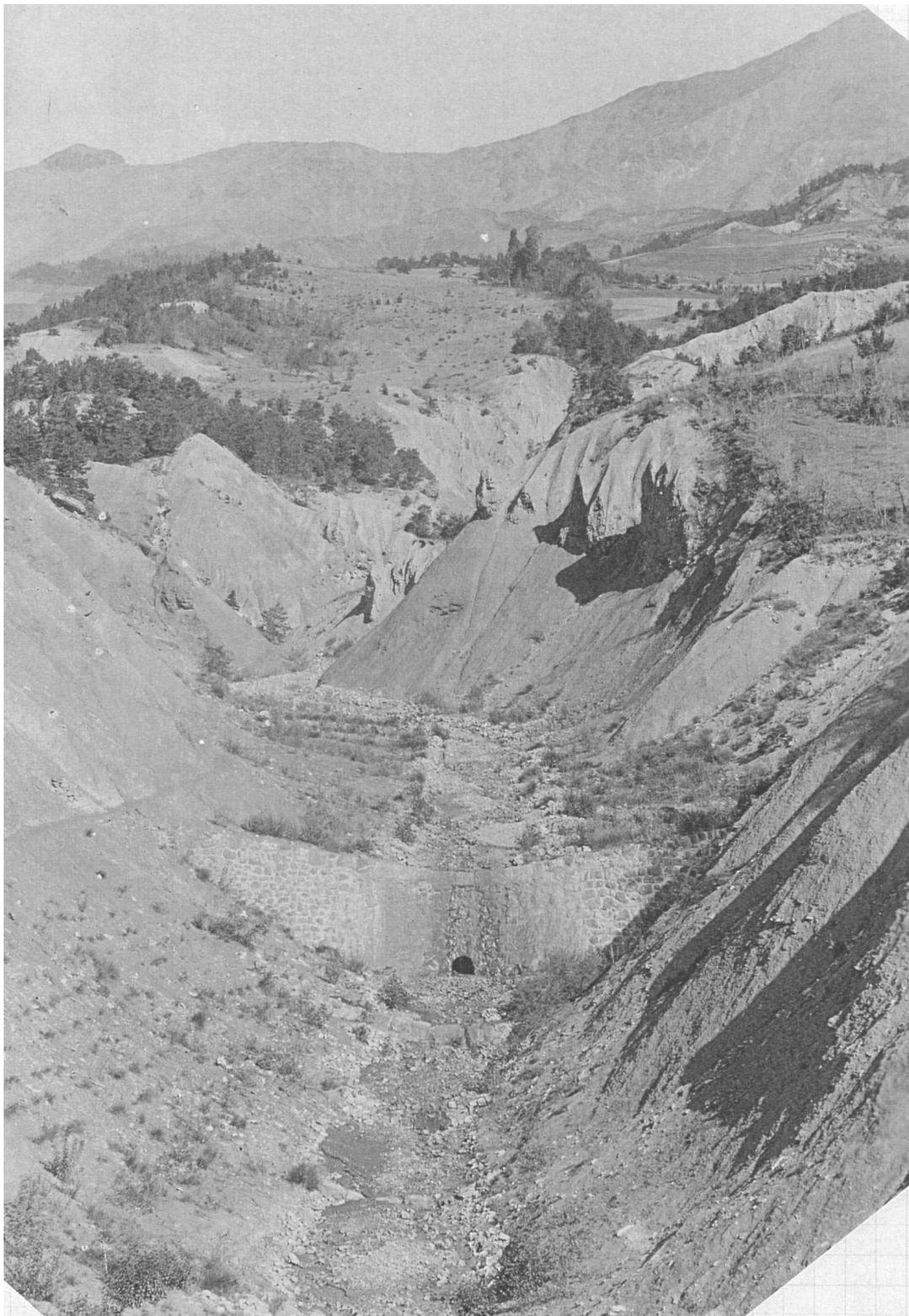


Annexe 3-40. Carte des concentrations de HCO_3^- relevées en octobre 2002.



Annexe 4 figures relatives au Chapitre 4

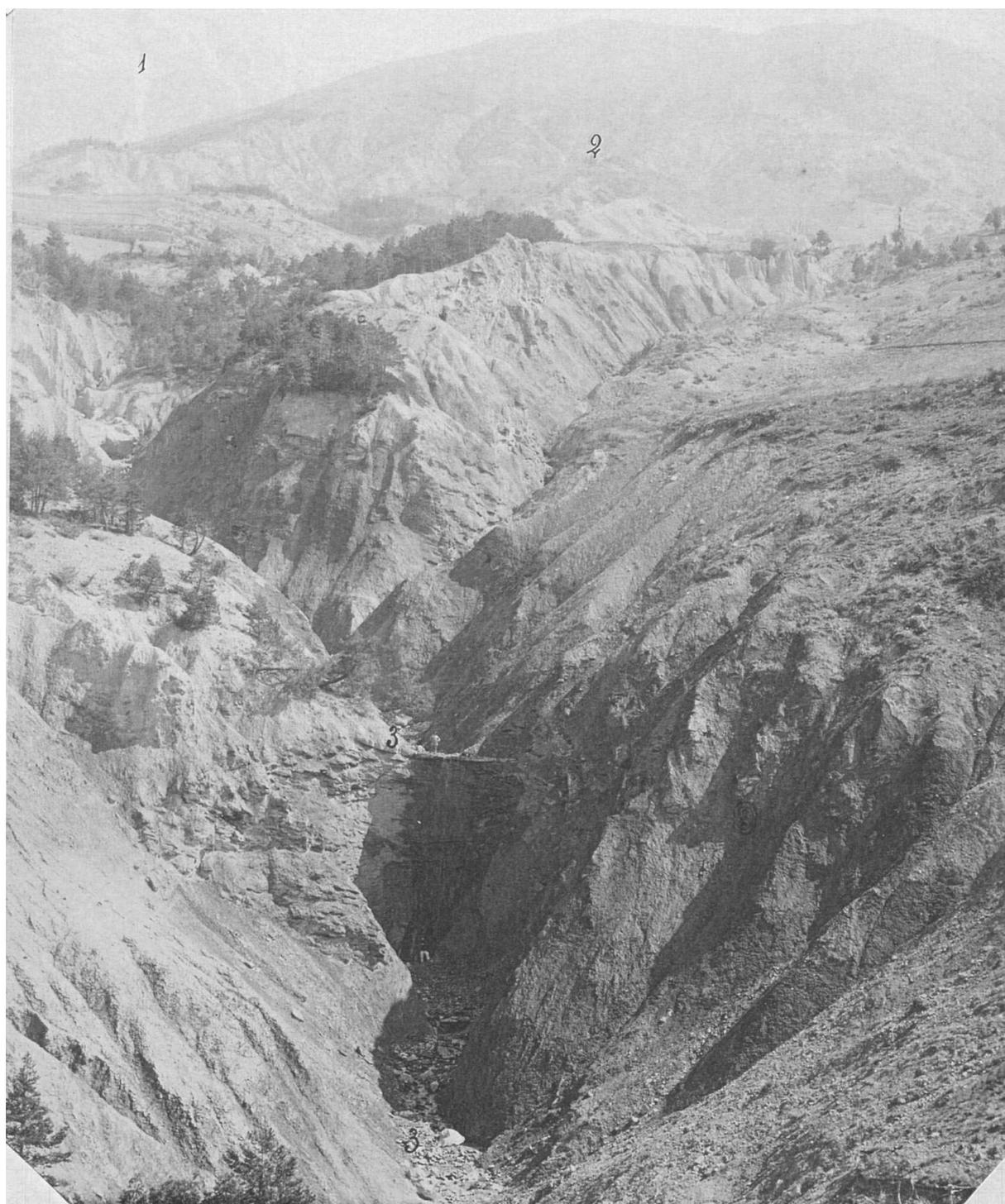
Annexe 4-1. Torrent de la Valette, cliché N°37 O.N.F.-R.T.M. en 1904.



Annexe 4-2. Torrent de la Valette, cliché N°37 O.N.F.-R.T.M. en 1887.



Annexe 4-3. Torrent de la Valette, cliché N°39 O.N.F.-R.T.M. en 1887.



Annexe 4-4. Vue de Soleil-Bœuf (côté ubac), cliché N°418 O.N.F.-R.T.M. en 1903.



Annexe 4-5. Torrent de la Valette, cliché N°36 O.N.F.-R.T.M. en 1904.



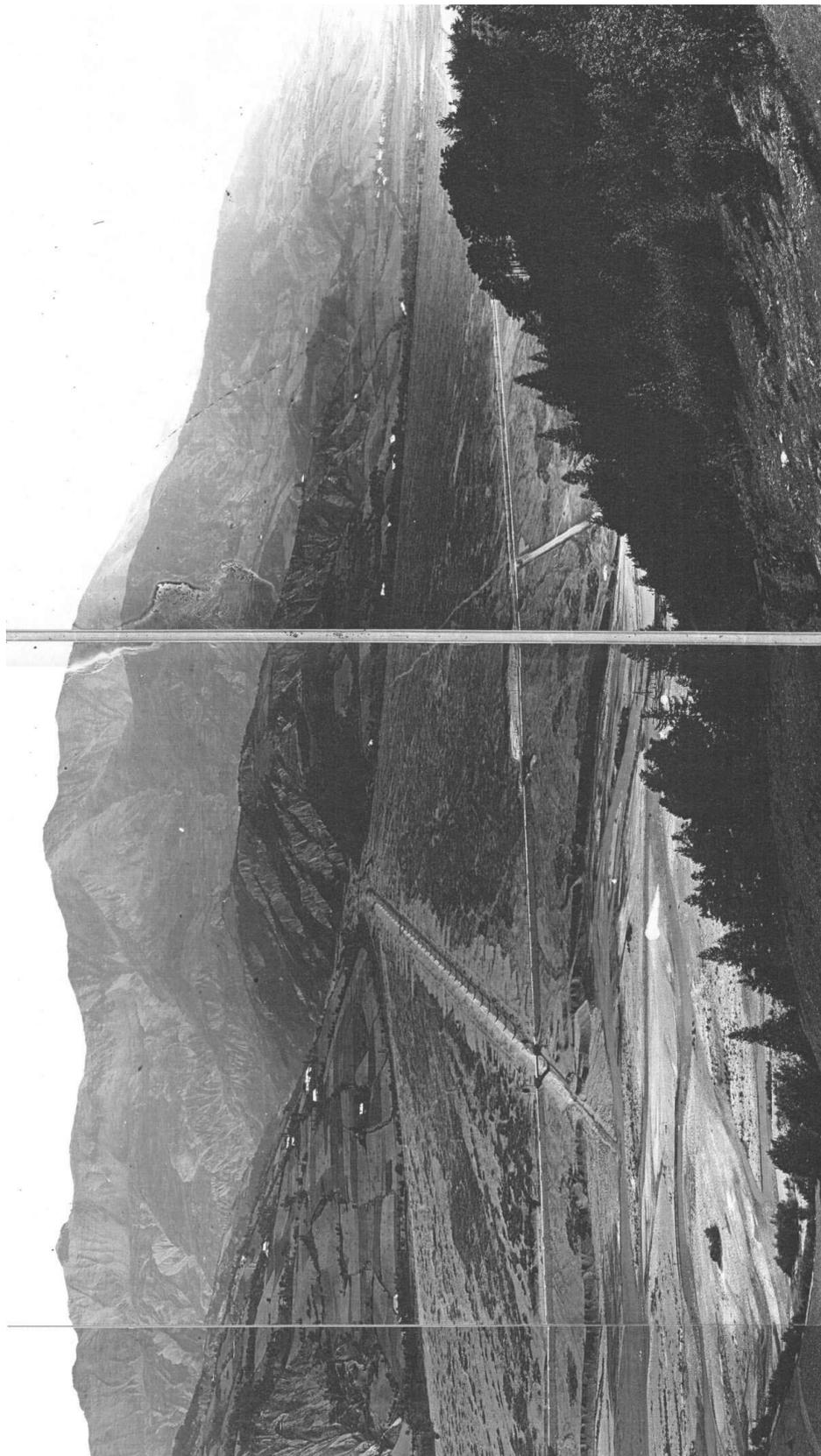
Annexe 4-6. Torrent de Serre, cliché N°1405 O.N.F.-R.T.M. en 1908.



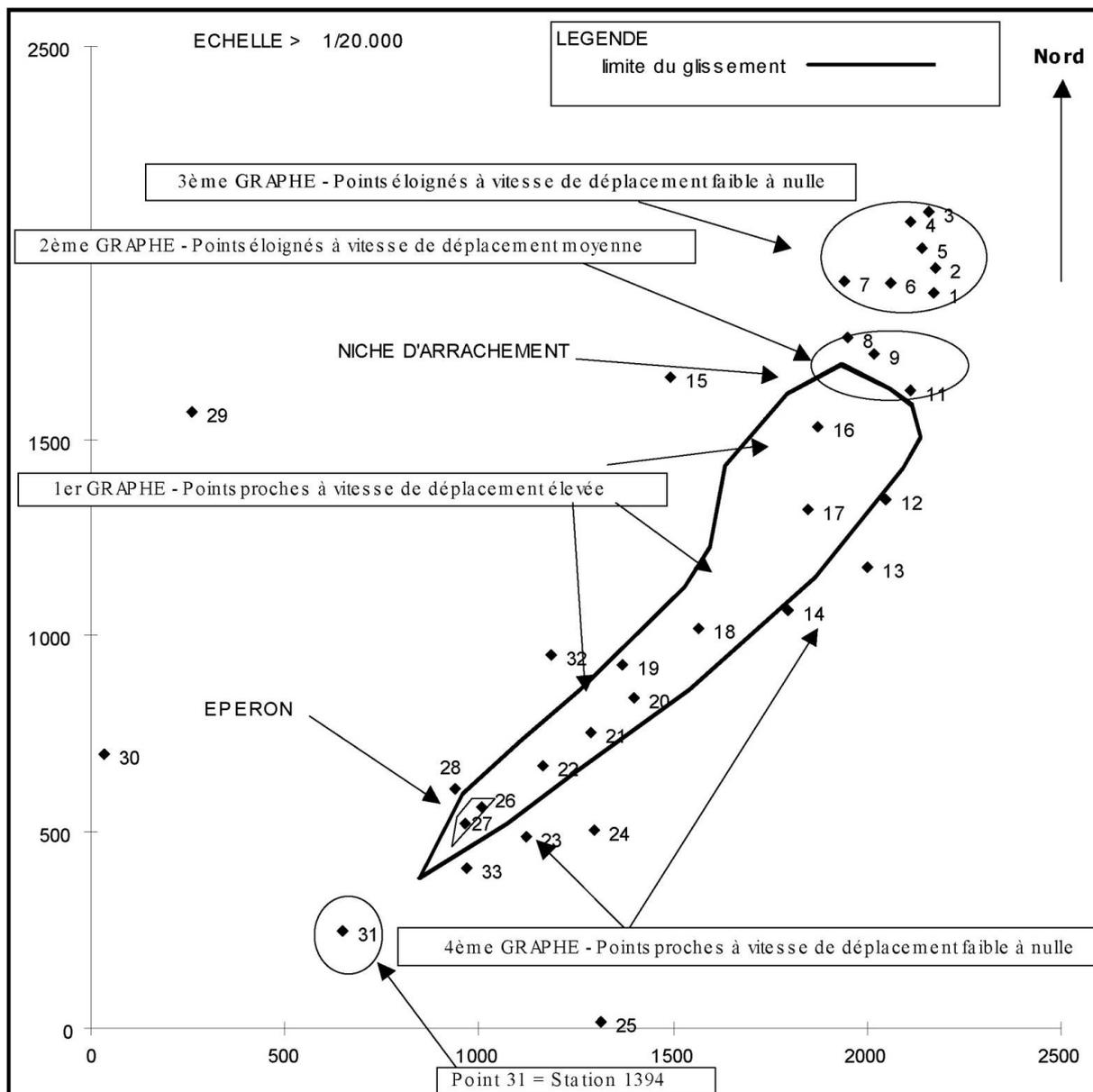
Annexe 4-7. Adroit de Barcelonnette vue depuis la rive gauche de l'Ubaye, cliché N°553-06-08 O.N.F.-R.T.M. en 1894.

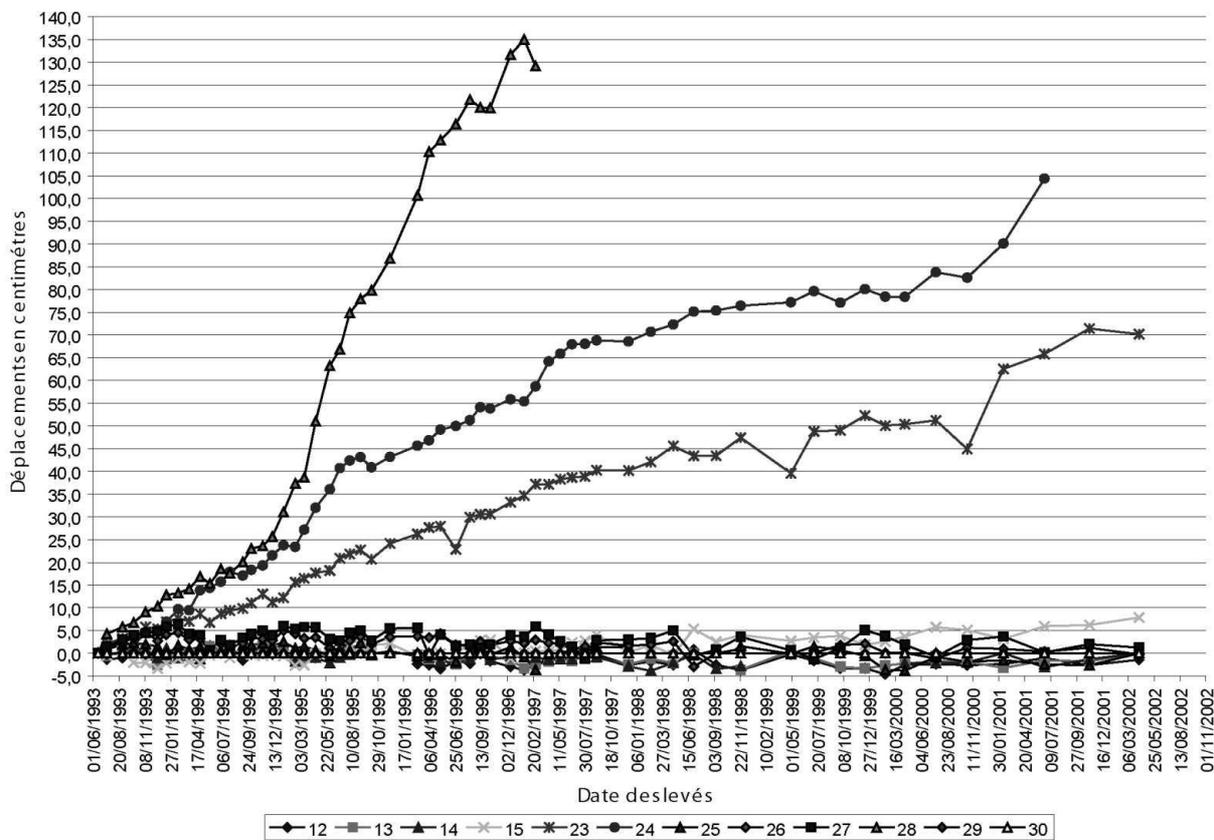
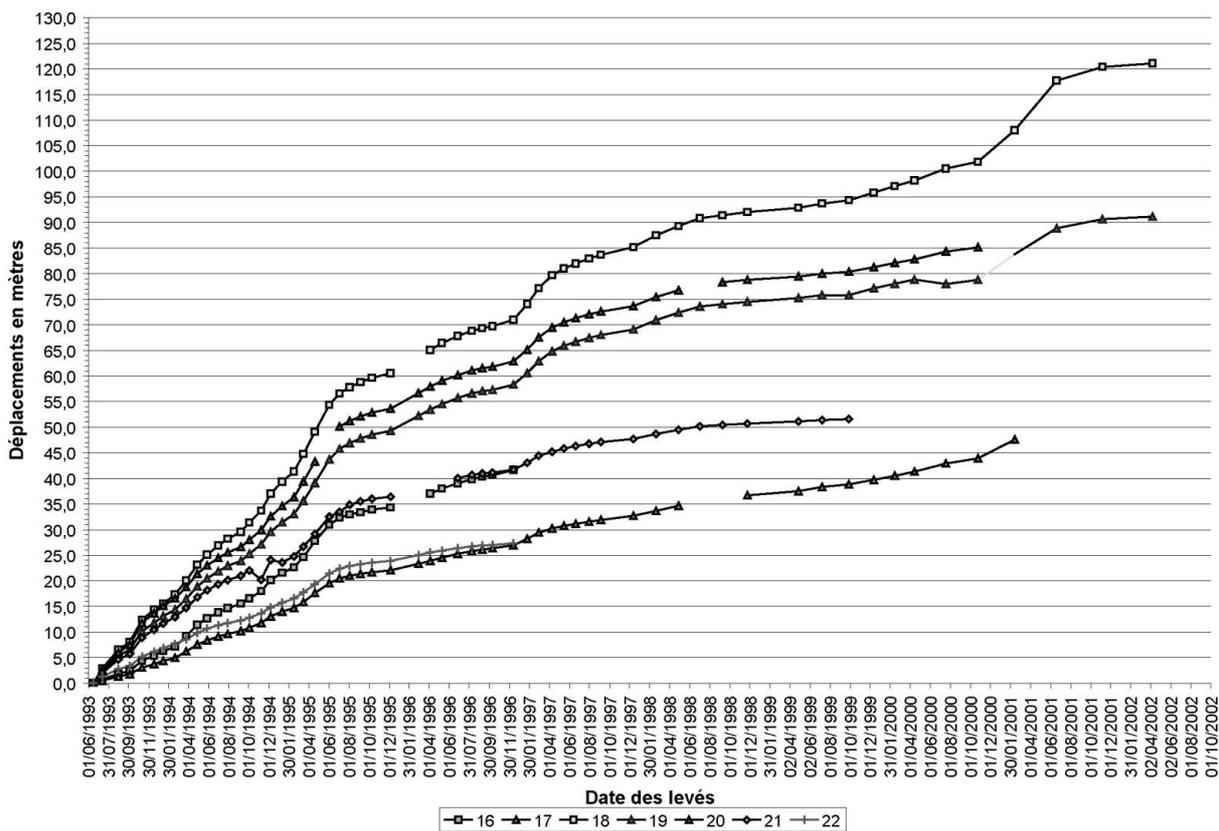


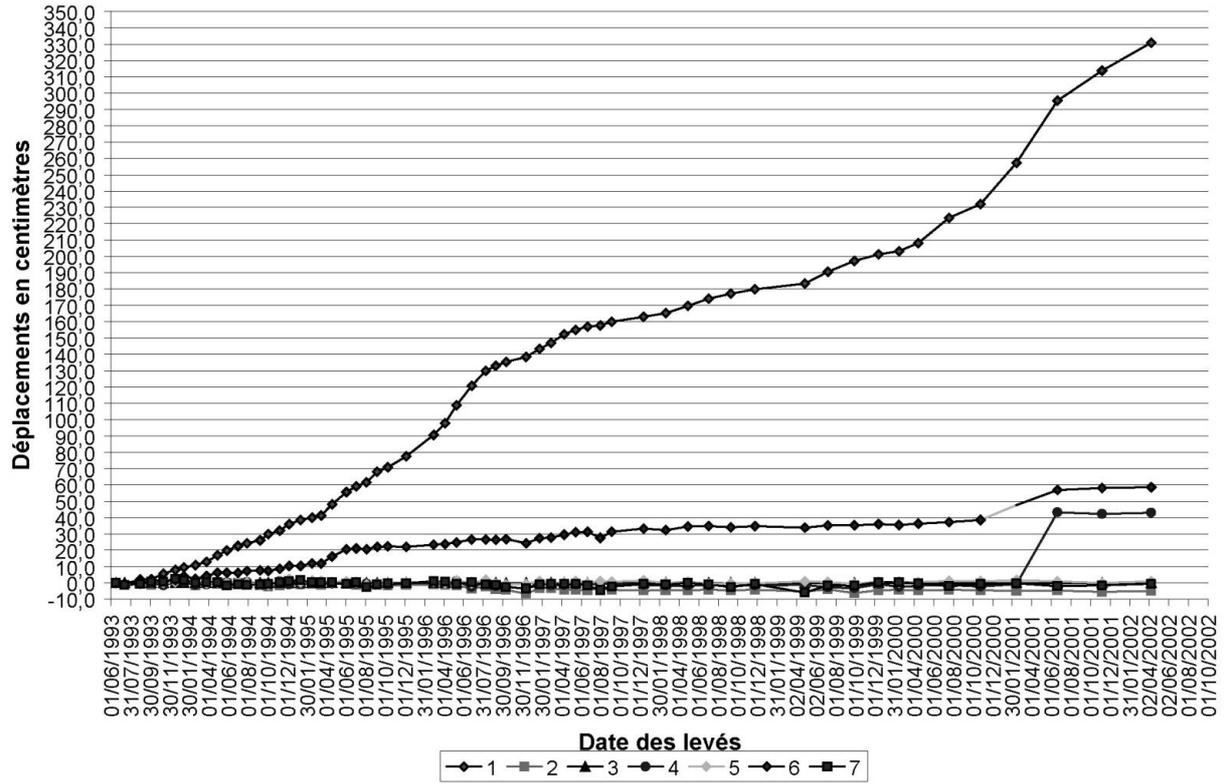
Annexe 4-8. Cours inférieur du Riou Bourdoux et Adroit de Barcelonnette depuis la rive gauche de l'Ubaye, cliché N°1405 O.N.F.-R.T.M. en 1894 (photographe M. Sardi).



Annexe 4-9. Carte des cibles de relevé topographique R.T.M. pour le glissement de la Valette avec les relevés correspondants.

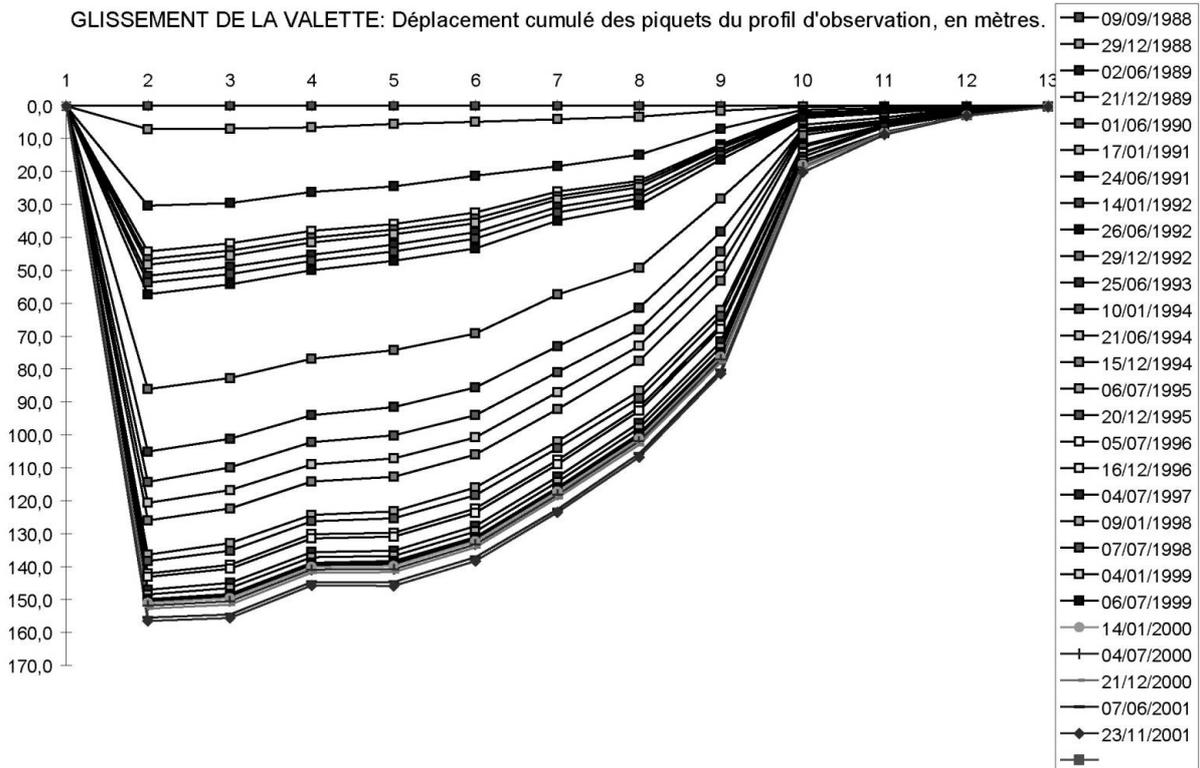
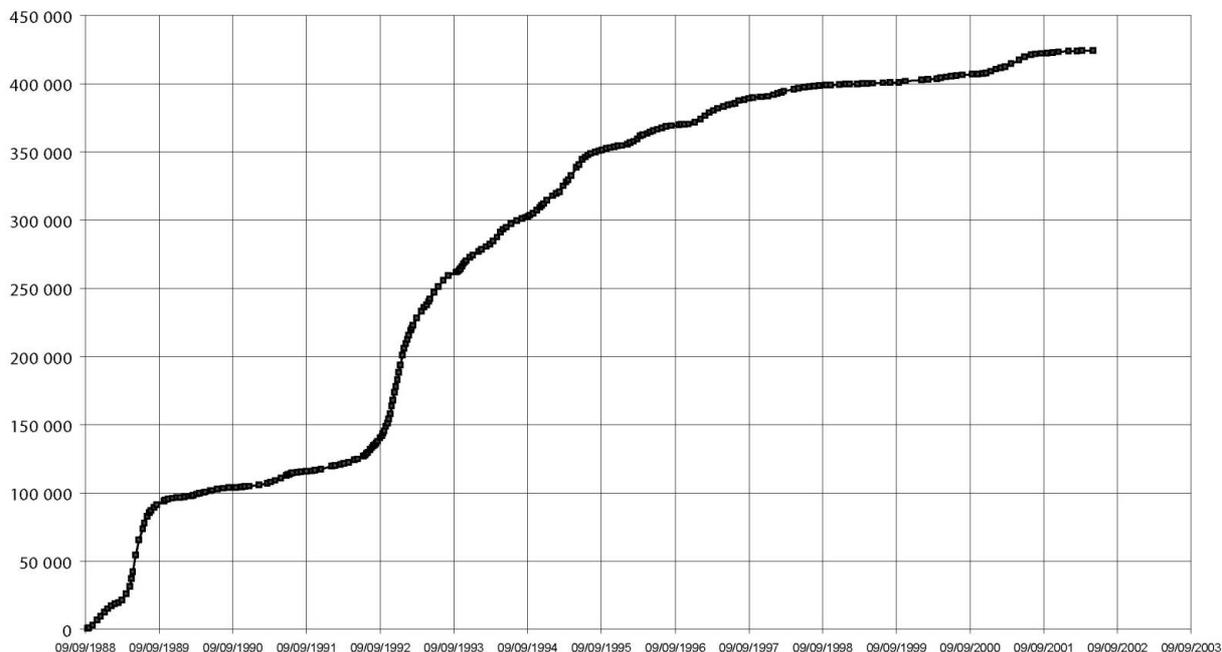




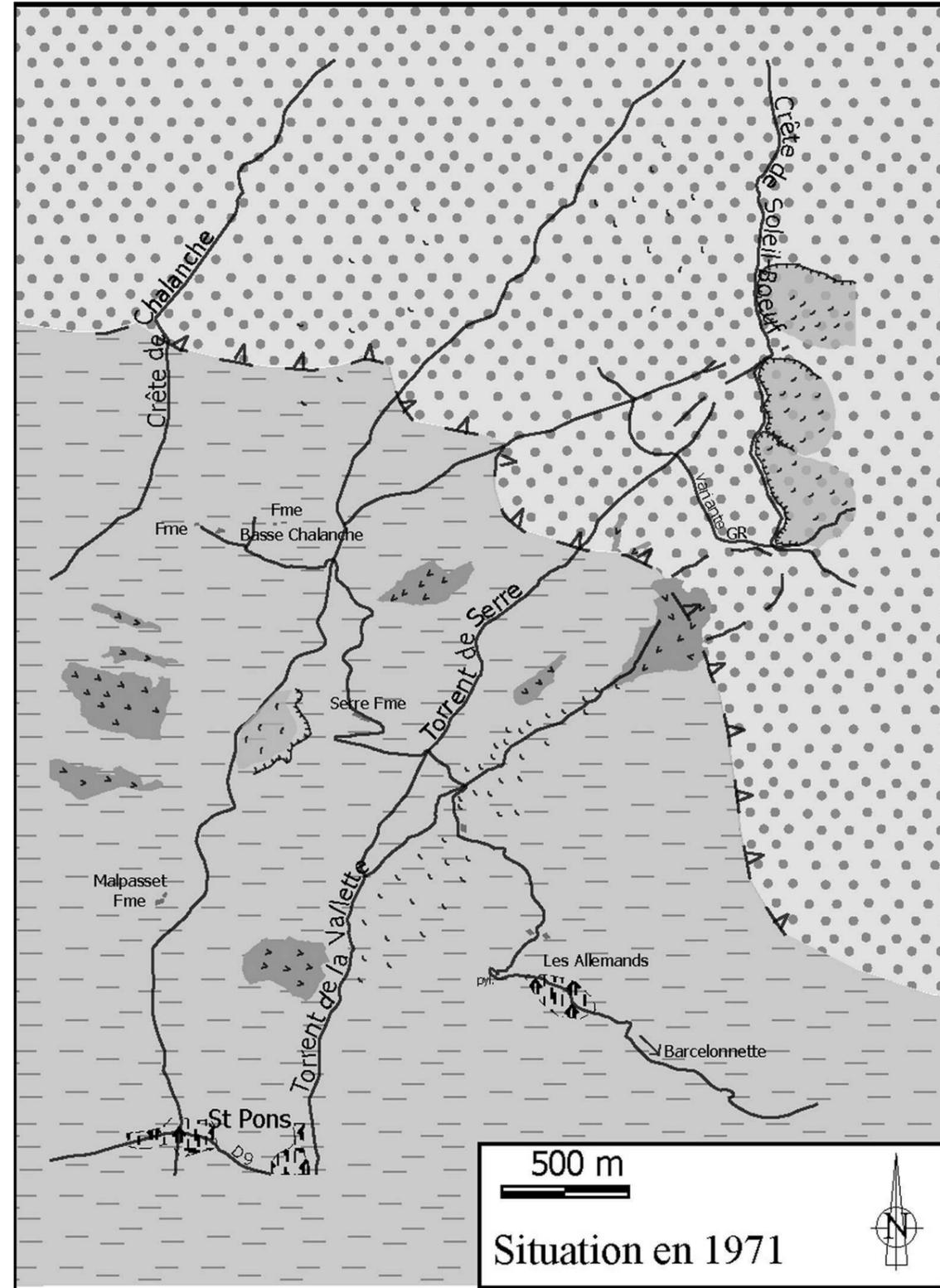


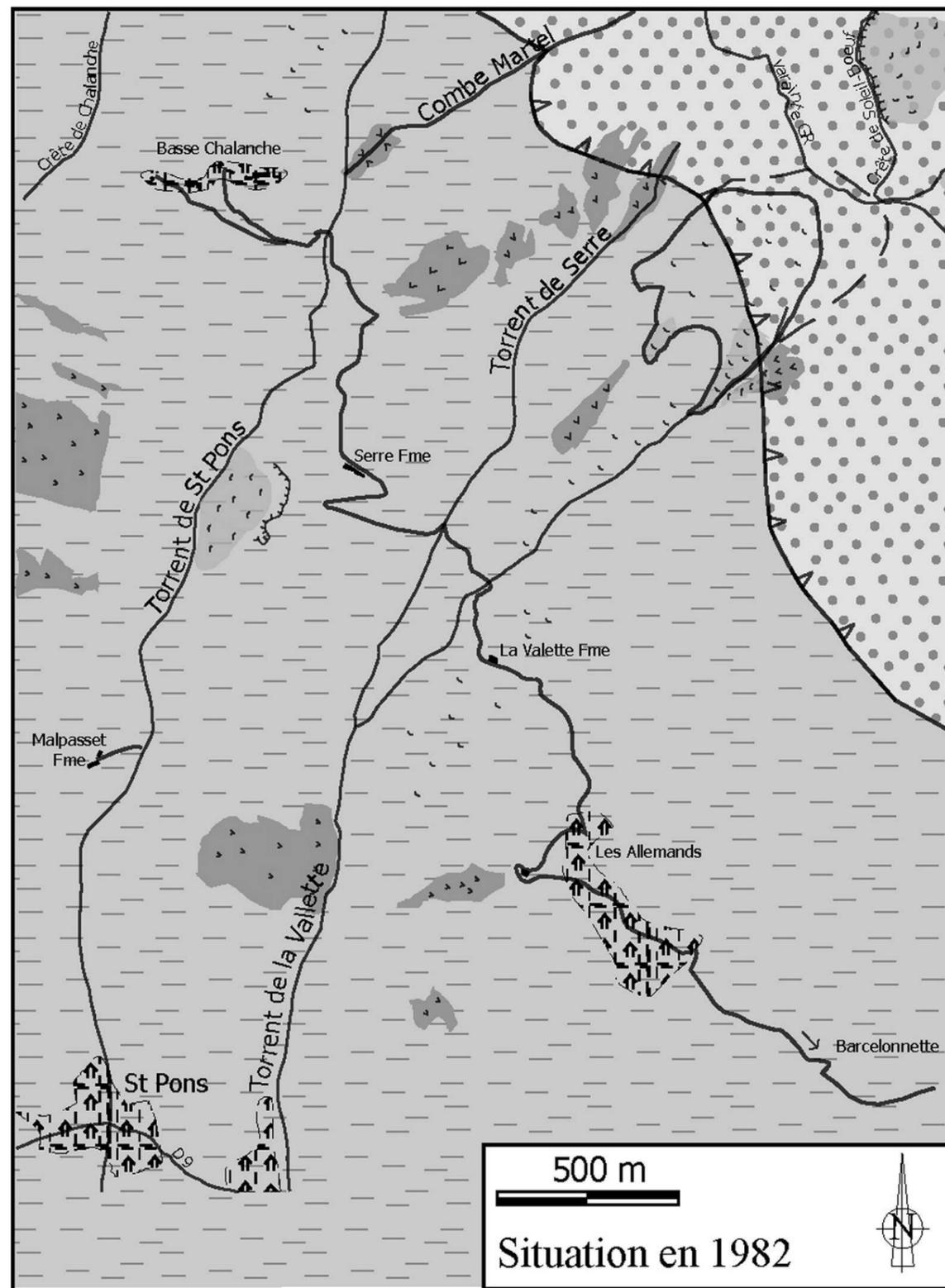
Annexe 4-10. Profil de surveillance topographique de la tête de la coulée (donnée R.T.M.).

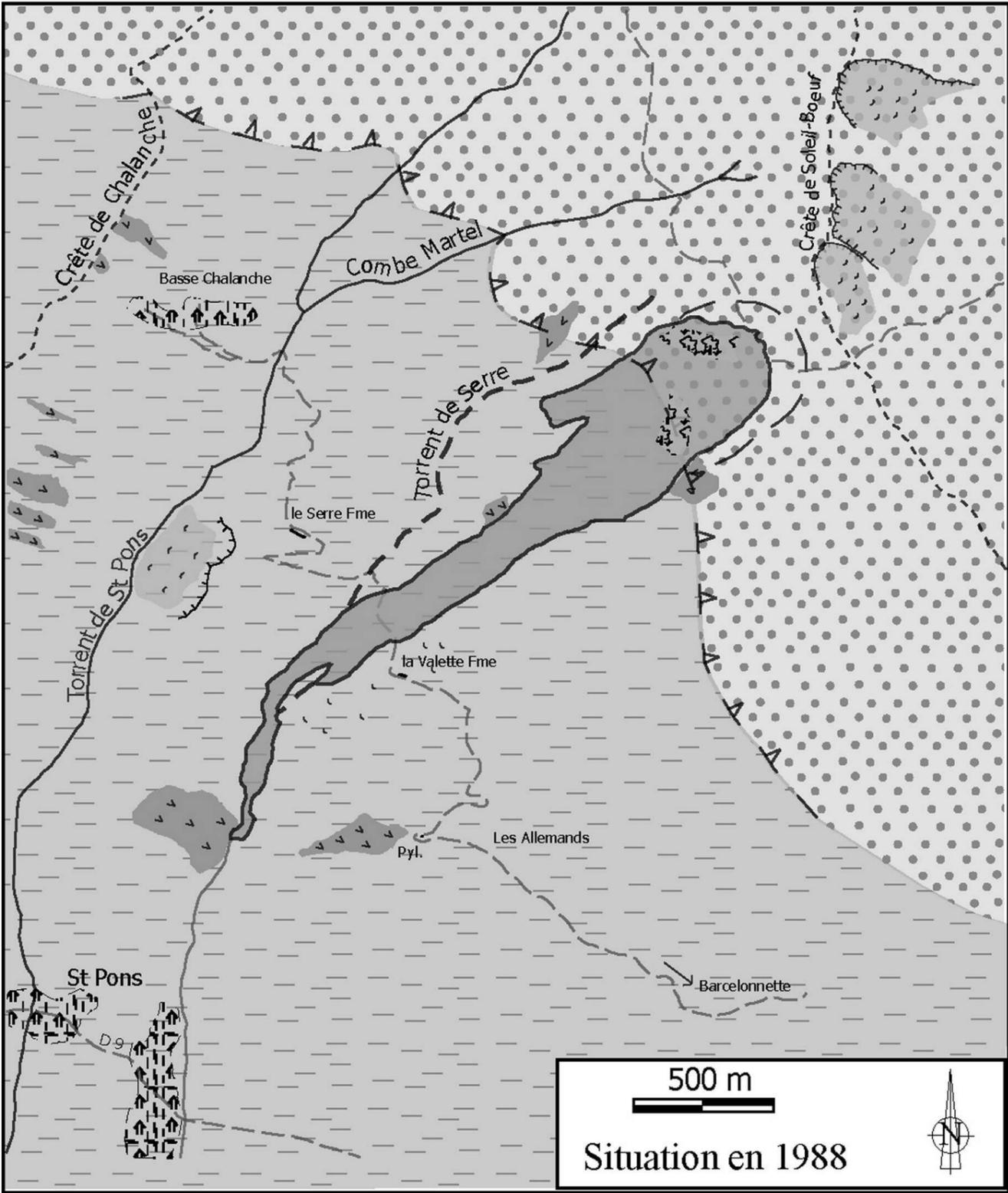
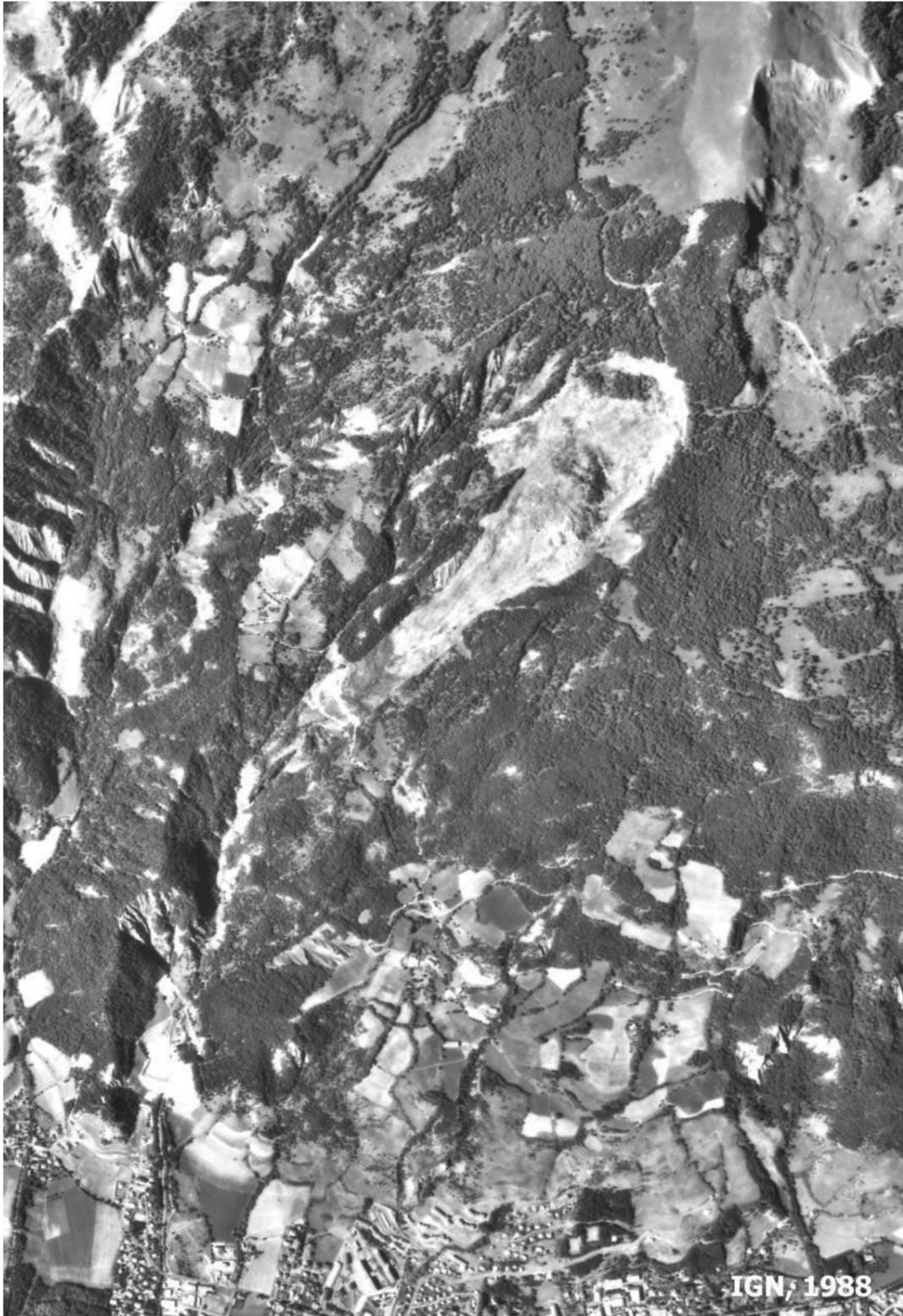
GLISSEMENT DE LA VALETTE: Volume déplacé cumulé au droit du profil d'observation - Ordonnées en m3
(à compter du 9/9/88)

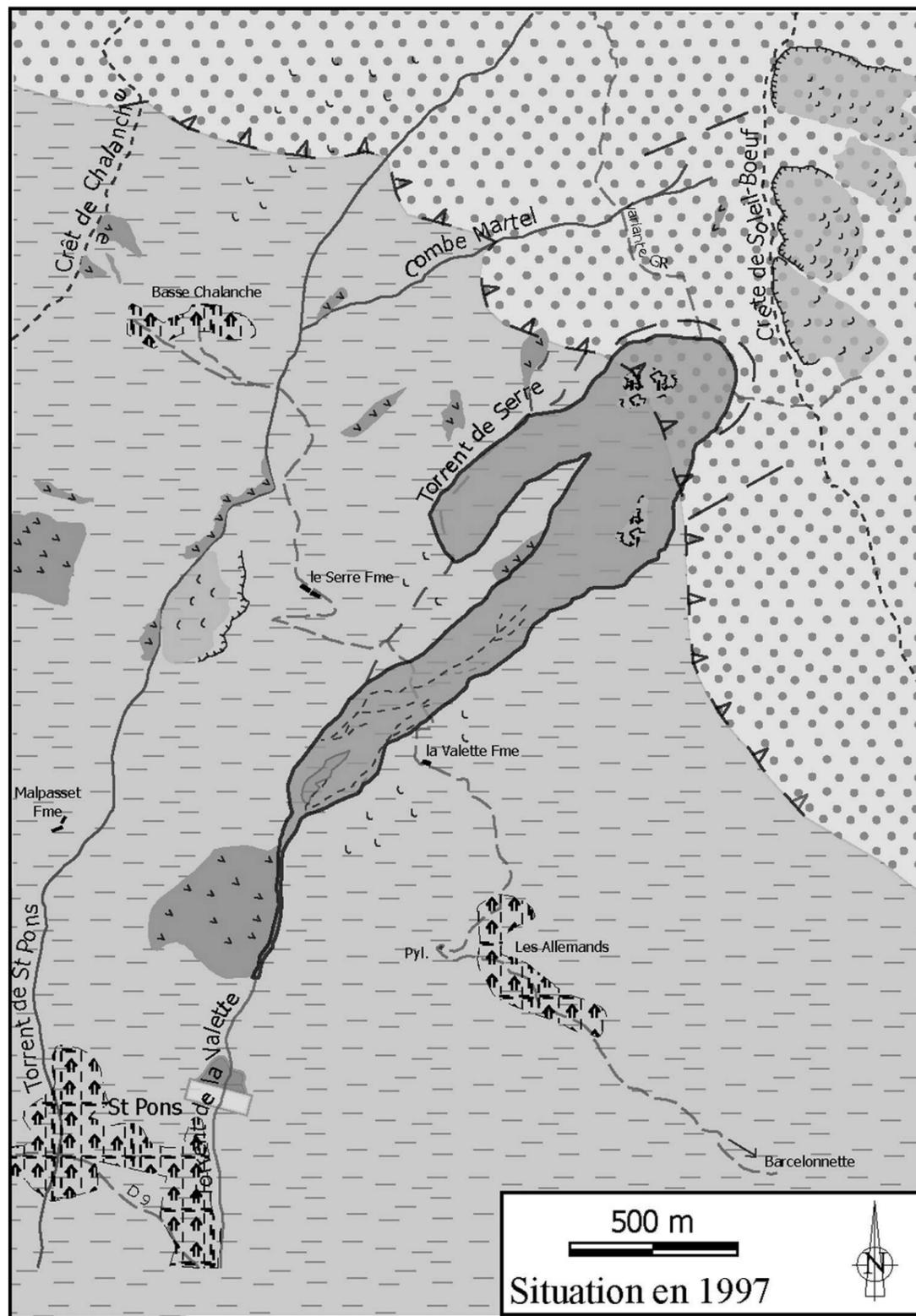


Annexe 4-11. Vues aériennes et photo-interprétation multi-dates (Légende des figurés identique aux Figure 4-24 à Figure 4-27).

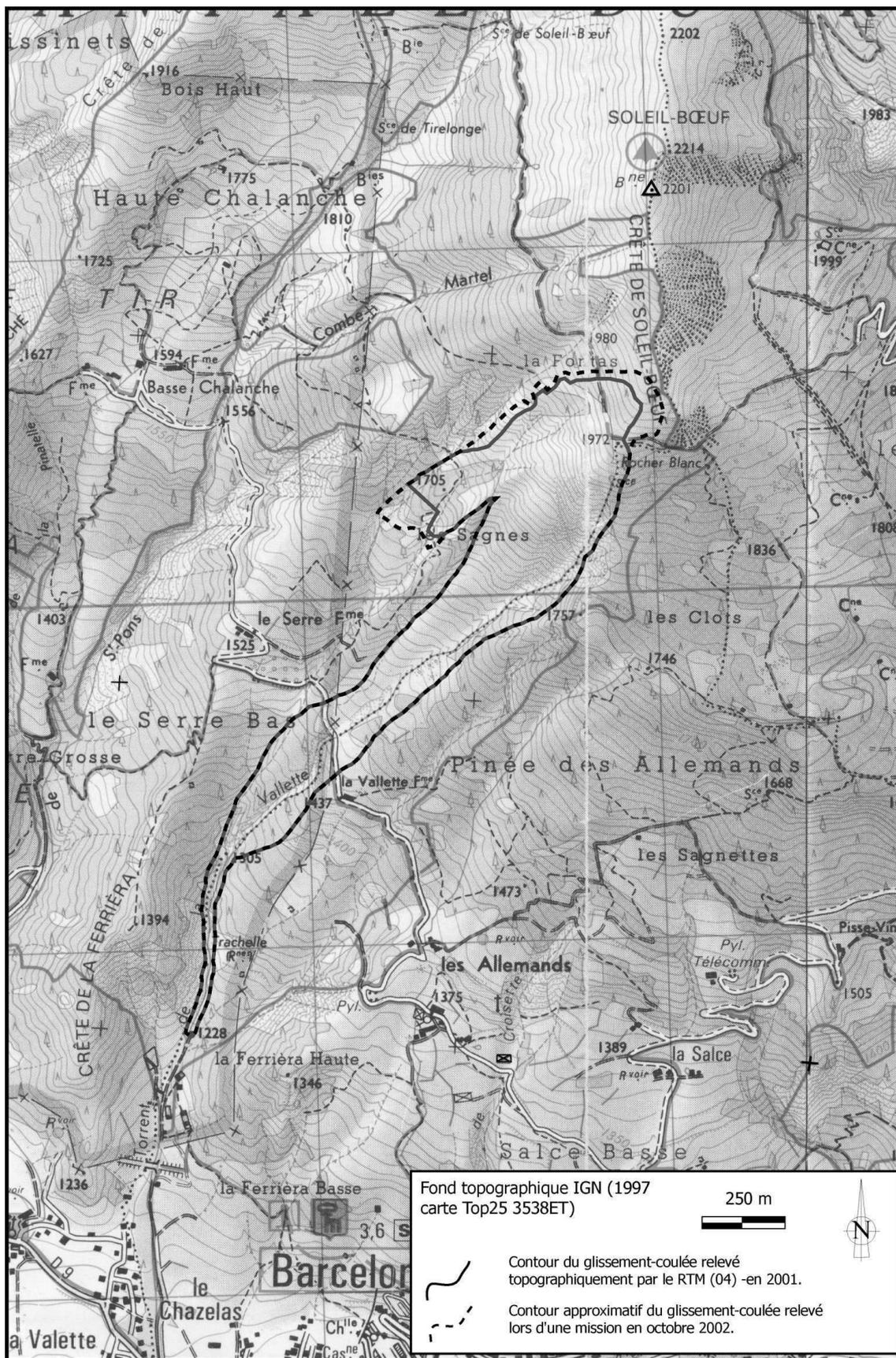








Annexe 4-12. Contour topographique détaillé du glissement coulée de la Valette.



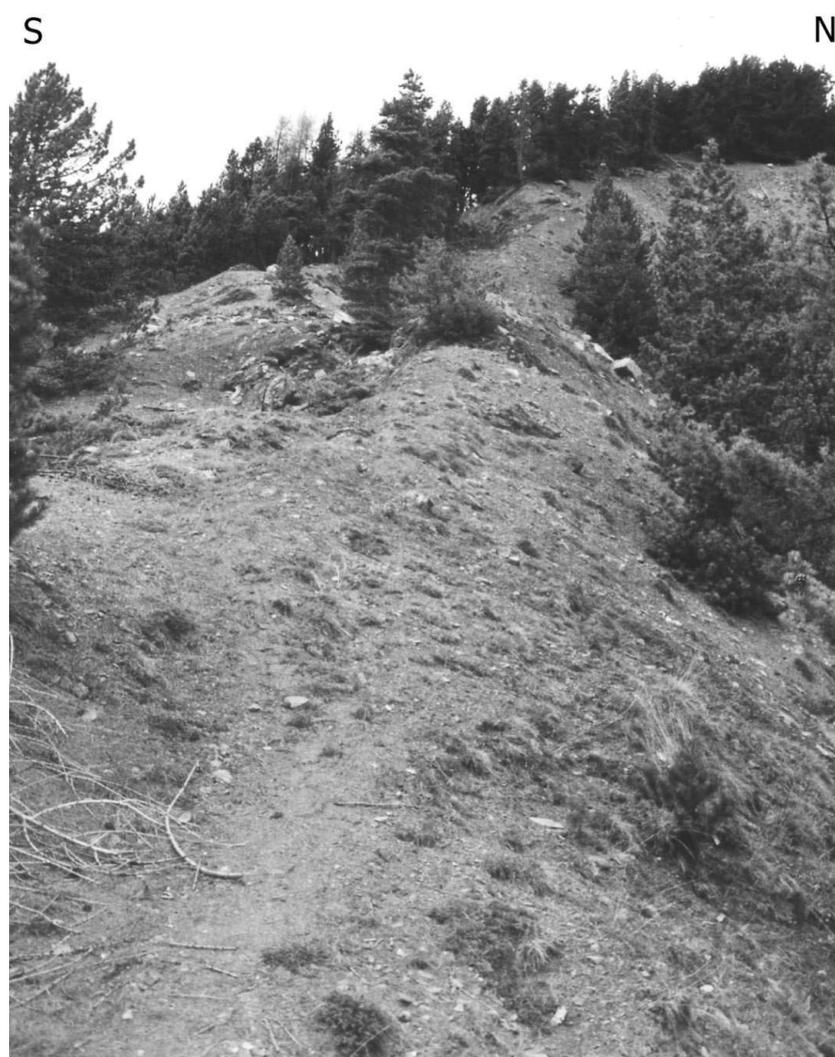
Annexe 4-13. Vue détaillée du piège à matériaux du glissement-coulée de la Valette.



Annexe 4-14. Petits glissements au front de la coulée et au niveau du piège à matériaux (octobre 2001).



Annexe 4-15. Vues de la niche d'arrachement et de la crête de Soleil-Bœuf perturbée par un ancien glissement (mai 2000 et mai 2001).



Annexe 4-16. Vue de la crête de Soleil-Bœuf et du versant de Haute-Chalnche affecté par un paléoglisserment (mai 2001).

SW

NE



Annexe 4-17. Vues aériennes du glissement-coulée de la Valette (mai 2002).



W

E



W

E





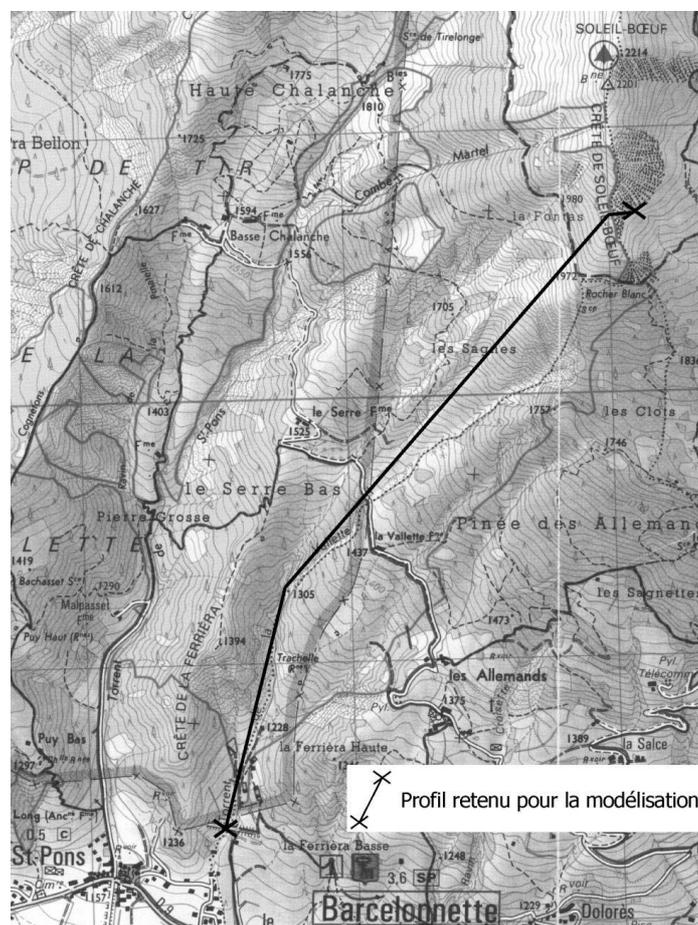
Annexe 4-18. Glissements de Soleil-Bœuf (sur l'adret) et de la crête de Chalanche (mai 2001).



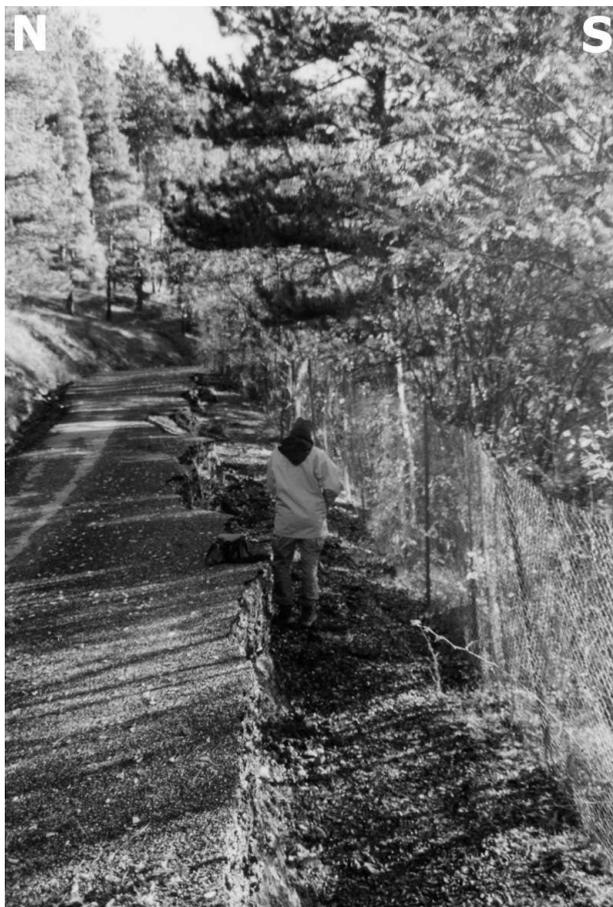
Annexe 4-19. Glissements de Soleil-Bœuf (sur l'ubac), mai 2001.



Annexe 4-20. Profil topographique retenu pour la modélisation.



Annexe 4-21. Exemples de petits glissements affectant l'Adroit de Barcelonnette. Ici le glissement semble avoir déjà affecté la route (les différentes recharges en témoignent) mais menace aujourd'hui le lycée de la commune.





Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France)

Les glissements-coulées sont des processus complexes de déstabilisation de versants, car ils se développent suivant deux modes distincts : glissement avec évolution régressive vers l'amont, coulée boueuse et écoulement vers l'aval. Dans les matériaux concernés, une phase argileuse prédomine généralement. La fragilité de la texture doit être notée, ainsi que sa sensibilité aux apports d'eau souvent à l'origine du déclenchement de la rupture.

Ce travail s'est appuyé sur les glissements de la Valette et de Poche dans la région de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence). Le contexte géologique, hydrogéologique et géomécanique a été étudié considérant plus spécialement le fonctionnement hydrologique et hydrogéologique d'un versant instable.

Les études de terrain, prenant appui sur la modélisation, ont permis de définir des scénarios d'évolution et de mettre en évidence les conditions de réactivation de ces pentes instables.

Mots-clés : risques naturels ; glissement-coulée ; coulée boueuse ; Alpes ; Barcelonnette ; analyse hydrogéologique ; modélisation.

Analysis of slope movement scenarios of flow-slide types. Application to the Barcelonnette area (Alpes-de-Haute-Provence, France)

In mountainous areas, flow-slides represent complex processes of slope instability. These types of instability are made up of an upper sliding part with retrogressive evolution and a lower flowing part. Mobilized materials often exhibit a high clay content. Texture fragility has to be underlined, as well as its water sensitivity often linked to the triggering of the failure.

This study is based on la Valette and Poche flow-slides in the Barcelonnette area (Alpes-de-Haute-Provence, France). Geological, hydrogeological and geomechanical contexts have been studied considering more precisely the hydrological and hydrogeological behaviour of the slopes.

Field studies, associated with modelling, have allowed to define some scenarios of slope evolution and to highlight instability conditions.

Key words : natural hazards ; flow-slide ; mudflow ; Alps ; Barcelonnette ; hydrogeological analysis ; modelling.

Tranche de couverture

Gwennou LE MIGNON * Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de * **mars 2004**
Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France).