



UNIVERSITE D'AVIGNON ET DES PAYS DE VAUCLUSE

Laboratoire d'Hydrogéologie

33, rue Louis Pasteur

84000 Avignon

Tél. 04 90 14 44 80 - Fax 04 90 14 44 89

Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon



***Mémoire de DEA Sciences de l'eau dans
l'environnement continental***

**Hydrogéochimie et dynamique des
écoulements dans un massif marneux en
mouvement (Glissement-coulée de
Super-Sauze, Alpes de Haute Provence)**

Effectué au laboratoire d'hydrogéologie de l'université d'Avignon

Encadré par Vincent Marc et Christophe Emblanch, maîtres de conférence à l'université d'Avignon, en collaboration avec O.Maquaire, maître de conférence à l'université de Strasbourg.

Remerciements

Je remercie tout d'abord le directeur du Laboratoire d'Hydrogéologie de L'Université d'Avignon, Bernard Blavoux ainsi que tous les membres de ce laboratoire pour leur accueil chaleureux, leur écoute et leur aide à tout point de vue. Je remercie particulièrement Roland pour toutes les modifications qu'il a bien voulu apporter à son logiciel et pour tous ses précieux conseils de manipulation au laboratoire.

Je remercie bien sûr Vincent Marc et Christophe Emblanch, de m'avoir patiemment encadré tout au long de ce stage. Bien qu'ils soient toujours débordés, ils ont su me consacrer beaucoup de leur temps (au dépend parfois de leur temps personnel). Ce double encadrement m'a permis de bénéficier de la différence de leur tempérament ainsi que de la complémentarité de leurs remarques pour mener à bien ce vaste projet dans une ambiance très agréable. Enfin, je garde un excellent souvenir des moments passés avec eux lors des campagnes de terrain.

Je remercie également Olivier Maquaire, Jean-Philippe Malet et Yannick Thiery de l'Université de Strasbourg pour m'avoir permis d'accéder à leurs données et pour m'avoir éclairer de leur connaissance sur les glissements de terrain

Je tiens à remercier tout particulièrement Catherine Bertrand de l'Université de Besançon pour l'aide qu'elle m'a apporté grâce à la modélisation géochimique, pour le temps précieux qu'elle m'a consacré et pour son accueil très chaleureux.

Enfin, un grand merci à Christina Bogner et Vincent Bailly-Comte, pour leur présence joyeuse dans notre sombre salle, leur aide immense à l'utilisation d'Arcview et à la résolution de tous le petits bugs de Windows !

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	2
SOMMAIRE	3
TABLE DES FIGURES.....	4
TABLE DES TABLEAUX	4
TABLE DES PLANCHES.....	4
GLOSSAIRE.....	5
INTRODUCTION.....	6
PARTIE I : CONTEXTE DE L'ETUDE	7
I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	7
1.1 LOCALISATION DU GLISSEMENT-COULEE DE SUPER-SAUZE.....	7
1.2 CADRE MORPHOLOGIQUE DU SITE D'ETUDE	8
II. SYNTHESE DES TRAVAUX ANTERIEURS.....	13
2.1. LA STRUCTURE INTERNE DU GLISSEMENT-COULEE DE SUPER-SAUZE.....	13
2.2. MODELE HYDROGEOLOGIQUE	13
PARTIE II : ETUDE HYDRODYNAMIQUE ET GEOCHIMIQUE DU GLISSEMENT.....	14
I. INSTRUMENTATION DU SITE ET MESURES EFFECTUEES.....	14
II. INVESTIGATION HYDRODYNAMIQUE SUR LA PERIODE D'ETUDE	16
2.1. LA PIEZOMETRIE.....	16
2.2. ESTIMATION DE LA TRANSMISSIVITE EN DIFFERENTS POINTS	19
2.3. LES OBSERVATIONS DE TERRAINS COMPLEMENTAIRES.....	20
III. L'APPORT DE L'ANALYSE HYDROCHIMIQUE.....	21
3.1. CONTEXTE MINERALOGIQUE DES 'TERRES NOIRES'	21
3.2. ANALYSE DE LA MINERALISATION DES EAUX DU GLISSEMENT DE SUPER-SAUZE	22
3.3. ORIGINE DE LA MINERALISATION : LES DIFFERENTS IONS ET LEUR RAPPORT	24
3.3. LES VARIATIONS SPATIALES DE LA MINERALISATION	27
3.4. LES VARIATIONS TEMPORELLES DE LA MINERALISATION	38
IV. L'ANALYSE GEOCHIMIQUE.....	42
4.1. L'APPORT DE LA MODELISATION GEOCHIMIQUE	42
4.2. HYPOTHESES SUR L'ACQUISITION DE LA MINERALISATION DANS LE GLISSEMENT DE SUPER-SAUZE	43
CONCLUSION.....	46
BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXES.....	49
TABLE DES ANNEXES.....	50

Table des figures

Figure 1 : Localisation du glissement-coulée de Super-Sauze dans le bassin de Barcelonnette (vue vers le Sud, juillet 2002) (Maquaire, 2003)	7
Figure 2 : Vue de l'escarpement principal depuis la coulée, avril 2004	9
Figure 3 : Schéma structural de la fenêtre de Barcelonnette (Carte géologique de Barcelonnette au 1/50 000)	11
Figure 4 : Photographie aérienne de la fenêtre de Barcelonnette (www.geol-alp.com)	12
Figure 5 : Coupe tectonique passant au niveau de la klippe du Chapeau de Gendarme (Lan) (Carte géologique de Barcelonnette au 1/50 000).....	12
Figure 6 : Situation des différents piézomètres étudiés	
Figure 7 : Situation des différents piézomètres étudiés.....	15
Figure 8 : Remontée d'eau en DV4 et EV5	19
Figure 9 : Présentation du faciès des eaux analysées	22
Figure 10 : Répartition des ions dans les eaux du glissement.....	23
Figure 11 : Répartition des eaux en fonction du rapport $[\text{HCO}_3^-]/[\text{Ca}^{2+}]$	24
Figure 12 : Relation entre les sulfates, le calcium et le magnésium	26
Figure 13 : Comparaison des rapports $[\text{Ca}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$ et $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$	26
Figure 14 : Localisation de la ligne d'écoulement supposée	28
Figure 15 : Variation des éléments le long d'une ligne de courant supposée (campagne d'avril 2004).....	29
Figure 16 : Répartition des eaux en fonction du rapport $[\text{Mg}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}]$	30
Figure 17 : Variation comparée de la minéralisation des piézomètres E	33
Figure 18 : Variation comparée de la minéralisation des piézomètres B.....	34
Figure 19 : Diagramme de Stiff des piézomètres du transect B.....	35
Figure 20 : Représentation des proportions des cations majoritaires par le diagramme de Piper	36
Figure 21 : Variation journalière au point BV5 bis.....	41
Figure 22 : Hypothèse d'alimentation en eau du glissement	45
Figure 23 : Hypothèse d'évolution des concentrations au sein du glissement.....	45

Table des tableaux

Tableau 1 : Fiche signalétique du glissement-coulée de Super-Sauze (d'après Malet, 2003) ...	8
Tableau 2 : Répartition du nombre de piézomètres par transect	14
Tableau 3 : Résultats des mesures de transmissivité.....	19
Tableau 4 : Caractéristiques des eaux testées par le modèle et prises pour comparaison.....	43
Tableau 5 : Synthèse des tests effectués.....	44

Table des planches

Planche 1 : Vue aérienne du glissement coulée : (a) en 1991 ; (d) en 2000 ; (b, c) l'escarpement principal (Maquaire, 2002)	10
Planche 2 : Variations piézométriques par transect en fonction de la pluviométrie	18
Planche 3 : Répartition des rapports Sr/Ca en pour mille (ppm)	32
Planche 4 : Variations temporelles du chimisme en CV10, DV4, EV2 et EV3.....	39
Planche 5 : Variations temporelles du chimisme en PEP et BV5	40

Glossaire

D'après A.Foucault et J.F. Raoult, dictionnaire de géologie, 1984

Bad-lands : Terrain où la faible végétation et le ruissellement important ont contribué à la formation de profondes ravines. Ce phénomène affecte des pentes de roches meubles (argiles, marnes, gypse).

Cargneules : Roche sédimentaire carbonatée, d'aspect carié et vacuolaire. Elles résultent de la dissolution préférentielle de la dolomite par des eaux chargées en sulfates (gypse surtout) dans les dolomies calcareuses et les calcaires dolomitiques. Ces roches sont fréquentes dans le Trias des Alpes, presque toujours à proximité de couches gypseuses. Elles jalonnent fréquemment des surfaces de chevauchement.

Klippe : Portion d'une unité tectonique allochtone isolée du corps principal de celle-ci. Cet isolement est généralement le fait de l'érosion.

Marnes : Roche sédimentaire constituée d'un mélange de calcaire et d'argile (de 35 à 65%).

Transect : Ligne dont le tracé est souvent perpendiculaire à un réseau de drainage, visant à recouper le plus de milieux différents possibles

Introduction

Le glissement-coulée de Super-sauze (Alpes-de-Haute-Provence) se développe dans les marnes noires du Callovo-Oxfordien de la fenêtre de Barcelonnette. Ce site expérimental a fait l'objet de nombreuses investigations depuis 1996 (géophysiques, géotechniques, pétrographiques, hydrodynamiques...). Des travaux précédents visant à définir les processus initiateurs ainsi que le moteur de tels glissements ont permis de mettre en évidence le rôle primordial de la pluviométrie et des circulations d'eau dans le massif, ce qui a conduit à la proposition d'un modèle hydrogéologique général (Malet, 2003).

La présente étude s'inscrit dans le cadre des recherches sur les glissements gravitaires entreprise dans le projet SAMOA (Surveillance et Auscultation des Mouvements Gravitaires Alpains) financé par le Ministère de la Recherche (Action Concertée Incitative, 2002 : Prévention des Catastrophes Naturelles). Elle s'intéresse plus particulièrement au rôle moteur fondamental de l'eau dans la problématique des instabilités dans les glissements-coulées. Ainsi, les circulations d'eau dans le massif de Super-Sauze ont fait l'objet d'une investigation hydrodynamique et hydrochimique s'appuyant sur plusieurs campagnes de prélèvement d'eau menées entre mai 2003 et mai 2004, dans le but de préciser le fonctionnement hydrogéologique du système et les conditions aux limites. L'intérêt de cette démarche est d'apporter une méthodologie et un protocole d'investigation différents de ceux entrepris lors des études précédentes de manière à vérifier et compléter les résultats déjà obtenus.

Pour cela, après avoir décrit la zone d'étude, nous présenterons les résultats des travaux antérieurs et plus particulièrement ceux de Malet (2003) qui constituent la base de cette étude. La deuxième partie constitue la synthèse du travail réalisé. Elle se décline en trois volets, avec tout d'abord la partie hydrodynamique, puis l'étude hydrochimique et enfin la partie modélisation géochimique dans laquelle des hypothèses d'écoulement au sein du glissement sont proposées.

PARTIE I : Contexte de l'étude

I. Présentation de la zone d'étude

1.1 Localisation du glissement-coulée de Super-sauze

Le glissement-coulée de Super-Sauze se situe dans le bassin de Barcelonnette (Alpes-de-Haute-Provence, France) directement à l'Ouest de la station de Super-Sauze. Il est surplombé par les sommets imposant du Brec Second (2596m) à l'Est et du Chapeau de Gendarme (2682m) à l'Ouest et domine la vallée de l'Ubaye.

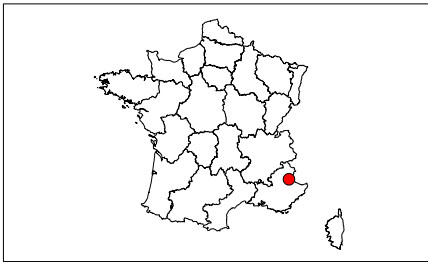


Figure 1 : Localisation du glissement-coulée de Super-Sauze dans le bassin de Barcelonnette (vue vers le Sud, juillet 2002) (Maquaire, 2002)

1.2 Cadre morphologique du site d'étude

1.2.1 Caractéristique du glissement-coulée de Super-sauze

Le glissement-coulée de Super-Sauze se développe dans les marnes noires du Jurassique supérieur, plus connue sous le nom de « Terres Noires » (Awongo, 1984 ; Bufalo, 1989 ; Phan, 1993 ; Antoine et al., 1995 ; Descroix et Olivry, 2002 ; Maquaire et al., 2003 ; Malet et al., 2003). Cette unité importante, atteignant 250 à 300 m d'épaisseur dans le bassin de Barcelonnette (Artru, 1972 ; Awongo, 1984) est connue pour sa susceptibilité à l'érosion météorique (Antoine et al., 1995). Elle présente un aspect de schistes argileux, tendres et finement feuilletés, avec peu de lits argilo-calcaires (Artru, 1972 ; Awongo, 1984 ; Phan, 1993). Elle est à l'origine de paysages de bad-lands, caractérisés par de multiples ravines séparées par des croupes dénudées dites « en dos d'éléphant ». Depuis une altitude de 1740 m au pied de la coulée, ce glissement de 820 m de long atteint 2105 m d'altitude au niveau de la zone de décrochement. Il est encadré par deux profondes ravines dans lesquelles circulent des torrents dont le torrent du Sauze pour la rive droite (à l'Est). Le tableau suivant synthétise les principales caractéristiques de ce glissement.

Nom du glissement	Super-Sauze
Localisation	Alpes-de-Haute-Provence, France
Type de phénomène	Glissement-coulée
Superficie	17 ha soit 0.17 km ²
Altitude min. / max	1740 m / 2105 m
Longueur totale	800 m
Largeur moyenne / maximale	135 m / 190 m
Pente moyenne	25°
Volume de la masse en écoulement	Estimé à 750 000 m ³
Vitesse	De 4 à 20 m/an
Substrat	Marnes noires du Callovo-Oxfordien
Quaternaire	Dépôts morainiques
Couverture végétale	absente
Climat	Méditerranéen sec et montagnard
Méthodes d'investigation	Géotechnique, géophysique, essais de laboratoire, levés topométriques, photogrammétrie numérique, GPS, et depuis octobre 2003 polarisation spontanée

Tableau 1 : Fiche signalétique du glissement-coulée de Super-Sauze (d'après Malet, 2003)

D'un point de vue morphologique, on peut distinguer trois grandes parties de l'amont vers l'aval (Malet, 2003):

- une partie supérieure, correspondant à la zone d'ablation et comprenant la couronne et l'escarpement principal
- une partie médiane soit la coulée marneuse à proprement parlée qui constitue la zone d'accumulation et qui s'achève par un petit replat bombé (E)

– une partie terminale, terme ultime du remaniement, correspondant au pied de la coulée. Dans le détail (cf. Planche 1), le mouvement de terrain est limité à l'amont par un spectaculaire escarpement principal en amphithéâtre (Figure 2). A sa base, le glissement présente un replat supérieur qui est limité à l'aval par un escarpement secondaire dont la pente atteint 40 à 50°. Les écoulements hydriques se concentrent à la base de cet escarpement où prennent naissance des coulées boueuses localisées. On voit également s'individualiser dans cet escarpement un éperon de marnes in-situ constituant une échine (transect B). A l'aval, la pente s'adoucit et devient rectiligne. Vers 1840 m, on observe un replat intermédiaire (transect C) où l'ensemble des chenaux de ruissellement de la partie supérieure de la coulée conflue pour former une ravine principale. Celle-ci entaille le corps de la coulée dans son tiers inférieur, sur une épaisseur atteignant 6 m et draine la nappe. Un replat inférieur, en forme de triangle termine la coulée. Il se raccorde dans sa partie Est au torrent du Sauze. La confluence des torrents Est et Ouest marque l'extrémité aval de la coulée.



Figure 2 : Vue de l'escarpement principal depuis la coulée, avril 2004

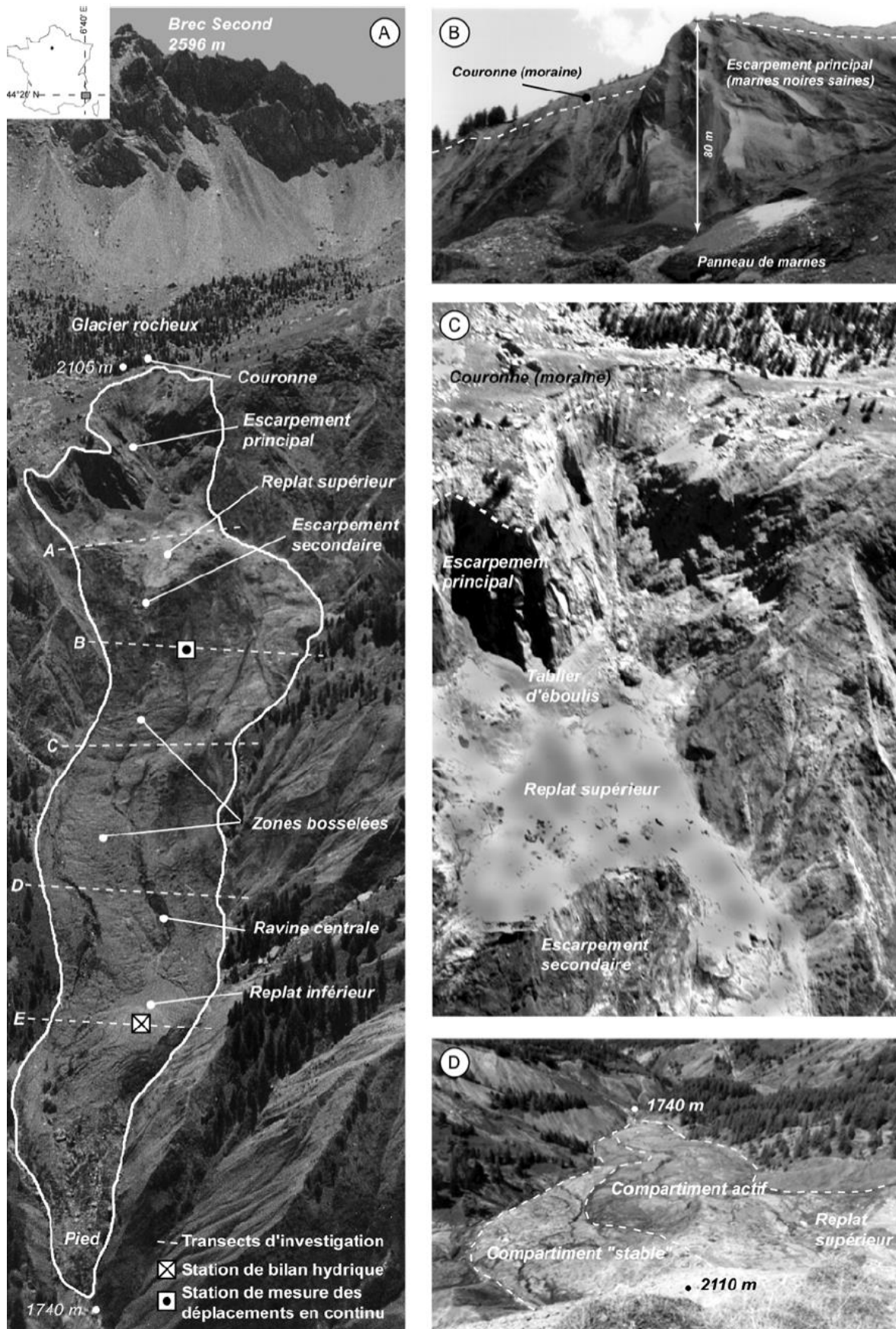


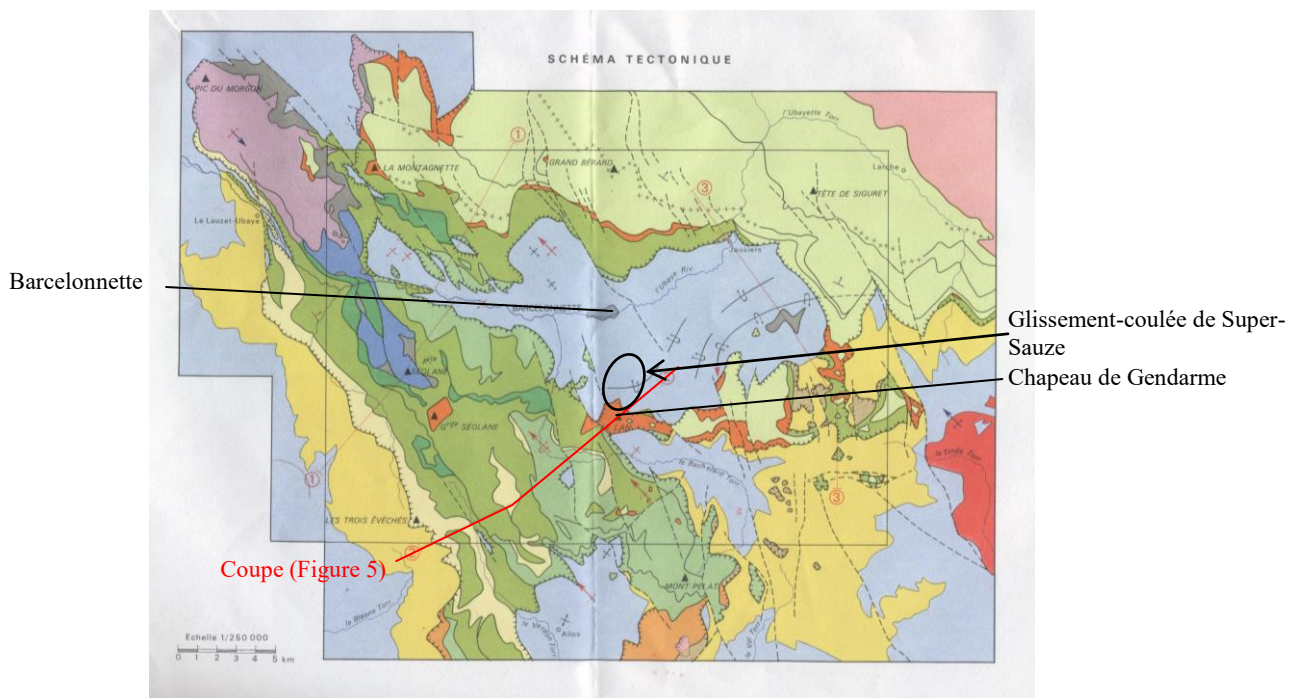
Planche 1 : Vue aérienne du glissement coulée : (a) en 1991 ; (d) en 2000 ; (b, c) l'escarpement principal (Maquaire, 2002)

1.2.2 Le contexte géologique particulier de la fenêtre de Barcelonnette

(les informations de ce paragraphe sont tirées de la notice de la carte géologique de Barcelonnette au 1/50 000, 1974)

Les ‘Terres noires’ de Barcelonnette se mettent en place au Callovo-Oxfordien (Jurassique supérieur) dans un contexte de transgression-régression dont le maximum d’inondation se situe au cours de l’oxfordien inférieur. A la fin du Priabonien, après un premier remplissage sous-marin par la nappe de l’Autapie, le bassin exondé se soulève et l’anticlinal formant le dôme de Barcelonnette apparaît. L’érosion importante qui s’en suit décape en grande partie les terrains superficiels et met à nu les ‘Terres Noires’.

Puis, le soulèvement des domaines alpins internes, au cours de l’écène inférieur et moyen, entraîne, à la faveur de niveaux gypseux fonctionnant comme des ‘couches savon’ le départ des nappes de charriage de l’Autapie puis du Parpaillon. Celles-ci vont alors venir se déposer de manière discordante notamment sur les terrains marneux du bassin de Barcelonnette. Au Miocène supérieur, l’ensemble est recoupé par un faisceau de grandes failles méridiennes. L’érosion par la rivière au niveau de Barcelonnette va alors percer les nappes de charriage en laissant apparaître, dans une ‘fenêtre’ le substratum autochtone (Figure 3 et Figure 4). Au quaternaire, le bassin va être largement remodelé par la présence du glacier de l’Ubaye, et de nombreux dépôts morainiques vont alors masquer une partie des affleurements marneux.



Légende partielle :







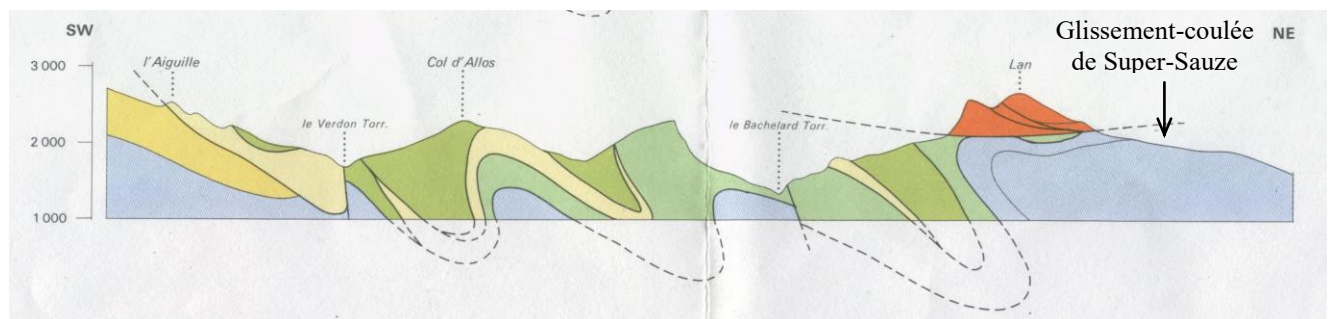
Unités Ultra-briançonnaises		Unités subbriançonnaises		Autochtone	
	Ecailles basales de la nappe du Parpaillon		Unité du Pelat		Mésozoïque
	Nappe de l'Autapie		Unité des Trois Evéchés		Nummulitique

Figure 3 : Schéma structural de la fenêtre de Barcelonnette (Carte géologique de Barcelonnette au 1/50 000)



Figure 4 : Photographie aérienne de la fenêtre de Barcelonnette (www.geol-alp.com)

Enfin dans le cas de la nappe du Parpaillon, l'érosion va individualiser des écailles basales en contact tectonique avec l'autochtone marneux formant alors des klippes. C'est le cas du Chapeau de Gendarme ou Lan qui surplombe le glissement-coulée de Super-Sauze (Figure 5) et qui met en contact le terme inférieur de l'unité subbriançonnaise des Séolanes composé de gypse et de cargneule avec les 'Terres Noires' jurassiques de l'autochtone. L'annexe 1 présente les coupes stratigraphiques des terrains rencontrés.



Légende :







Unités Ultra-briançonnaise		Unités subbriançonnaise		Autochtone	
	Écailles basales de la nappe du Parpaillon		Unité du Pelat		Mésozoïque
	Nappe de l'Autapie		Unité des Trois Evéchés		Nummulitique

Figure 5 : Coupe tectonique passant au niveau de la klippe du Chapeau de Gendarme (Lan) (Carte géologique de Barcelonnette au 1/50 000)

II. Synthèse des travaux antérieurs

2.1. La structure interne du glissement-coulée de Super-Sauze

La coulée constitue une langue hétérogène à forte matrice silto-sableuse mélangée à des débris morainiques (Malet, 2003). Dans la zone d'accumulation (transects B à E), trois couches géotechniques ont pu être identifiées (Annexe 2):

- une unité superficielle épaisse de 5 à 9 m. Selon la forme de la paléotopographie et l'amplitude de battement de la nappe, cette unité active peut être subdivisée en deux sous-unités (1a et 1b). Une surface de glissement interne est identifiée à une profondeur de 5 m sur le transect B, 8 m sous le transect C et 6-7 m sur le transect D. Les couches C1a et C1b constituent l'aquifère
- une unité profonde ayant une épaisseur maximale de 5-6 m au droit du transect B et de 10 m sur le transect C. A partir des mesures inclinométriques et des essais pressiométriques, cette unité est considérée comme imperméable, très compactée, aux très faibles déplacements ou stable comme un « corps mort ».

2.2. Modèle hydrogéologique

Le système hydrogéologique proposé par Malet (2003) se limite à l'emprise du glissement-coulée sur lequel il a établi un bilan hydrogéologique et définit des processus dominants. Ainsi les apports d'eau potentiels par les torrents ne sont pas pris en compte et l'unité inférieure non altérée des marnes constitue un « corps mort » imperméable.

Globalement, la nappe est considérée comme libre, continue d'amont vers l'aval du glissement-coulée, ce qui n'empêche pas d'envisager localement des secteurs captifs. Elle est discontinue transversalement dans les différents compartiments séparés par des paléo-échinés considérées comme des barrières imperméables. Ainsi, cette investigation hydrodynamique a permis de distinguer trois unités (Annexes 3 et 4) :

- L'unité UHG1 (à l'amont), caractérisée par des niveaux d'eau élevés, des réponses piézométriques très rapides, des fluctuations d'amplitude importante (+0.40 à +0.50 m pour un événement) ainsi qu'un drainage très rapide.
- L'unité UHG3 (en bordure Ouest) caractérisée par de faibles niveaux d'eau, des réponses piézométriques lentes, des fluctuations à faible amplitude (centimétrique) et drainage lent.
- L'unité UHG2 (à l'aval), dont les caractéristiques sont intermédiaires entre les deux unités précédentes.

La combinaison d'études statistiques avec les informations relatives aux paramètres hydrodynamiques a permis de proposer un concept hydrologique en trois couches. « Le système hydrologique 'glissement-coulée' apparaît en équilibre avec le climat local observé (drainage en période de déficit pluviométrique ; recharge en période d'excédent pluviométrique) ; les teneurs en eau et la position de la nappe phréatique fluctuent à l'échelle saisonnière en réponse aux forçages climatiques. Le régime hydrologique est influencé par deux épisodes de recharge, un à la fin du printemps et un deuxième au début de l'automne. Les variations piézométriques rapides à une pluie supérieure à 5 mm sont attribuées à un écoulement matriciel et à un écoulement préférentiel dans un réseau de fissures interconnectées. La profondeur moyenne de ces fissures correspond à l'interface entre la zone non saturée et la zone saturée. Les observations indiquent qu'elles peuvent transmettre des quantités d'eau importantes en profondeur, en particulier quand elles sont saturées. Aucune alimentation profonde par le 'corps mort' de la coulée n'a été identifiée ; ce dernier est considéré comme imperméable. » (Malet, 2003). Pour une information plus détaillée sur le modèle et sa structure, le lecteur pourra se référer à Malet et al.(2003).

PARTIE II : Etude hydrodynamique et géochimique du glissement

I. Instrumentation du site et mesures effectuées

Aucune source n'étant visible sur le glissement-coulée de Super-sauze, l'étude hydrochimique s'est appuyée sur l'analyse de l'eau d'une batterie de piézomètres répartis sur l'ensemble du glissement. Le réseau de surveillance piézométrique installés en juin 1996 comportait au départ 30 piézomètres; certains sont encore en place mais un grand nombre d'entre eux a été cisailé lors des déplacements du glissement ce qui rend difficile un suivi régulier et dans des conditions analogues d'une campagne sur l'autre. La profondeur du crépinage est comprise entre 1 et 5 m sous la surface du sol suivant les piézomètres. La localisation de ces piézomètres sur le glissement ainsi que leur répartition par transect sont présentées sur la figure 7 et le tableau 2. Un suivi pluviométrique est également réalisé à l'aide d'un pluviographe installé sur la coulée ainsi que deux autres pluviographes, dont un chauffant, implantés à Super-Sauze et à la ferme de La Rente.

Localisation	Nombre de piézomètres étudiés
Transect A	1
Transect B	7
Transect C	1
Transect B	1
Transect E	5

Tableau 2 : Répartition du nombre de piézomètres par transect

Les conditions climatiques rendant impossible les études de terrain pendant l'hiver (couverture neigeuse importante), les campagnes de prélèvement se sont échelonnées du printemps à l'automne. Ainsi, nous avons réalisé des campagnes en mai, juillet et octobre 2003, ainsi qu'en avril et mai 2004. Un suivi journalier a également été entrepris sur le piézomètre BV5 bis du 22/04/04 au 15/05/04 pour étudier l'impact de la fonte des neiges.

Il est à noter que ces 5 campagnes de prélèvements s'échelonnent sur deux années hydrologiques particulières puisqu'en 2003 les précipitations estivales ont été quasi inexistantes et les températures exceptionnellement élevées et qu'en 2004, la neige tombée en abondance a tenu particulièrement tard. Dans ces conditions, il est difficile de comparer les valeurs obtenues en mai 2003 avec celles de mai 2004. Mais cette particularité a l'intérêt de nous permettre d'observer le comportement du glissement dans des conditions hydrologiques très différentes.

Deux types de mesures ont été réalisés pour caractériser les eaux :

- Des mesures de terrain comportant la mesure du niveau piézométrique, la mesure de la conductivité électrique qui rend compte de la minéralisation totale de l'eau, celle de la température, du pH et du potentiel d'oxydoréduction ainsi que la mesure de l'alcalinité carbonatée.
- Des analyses chimiques en laboratoire des ions majeurs et de certains éléments traces, qui permettent de compléter la caractérisation des échantillons. L'analyse des cations (Ca, Mg, Na, K, Fe et Sr) a été réalisée à l'aide d'un spectromètre d'absorption atomique alors que les anions (SO₄, Cl, NO₃, NO₂, PO₄, F) ont été dosés par chromatographie ionique en phase liquide. Enfin, la spectrométrie d'absorption moléculaire a permis l'analyse de la silice.

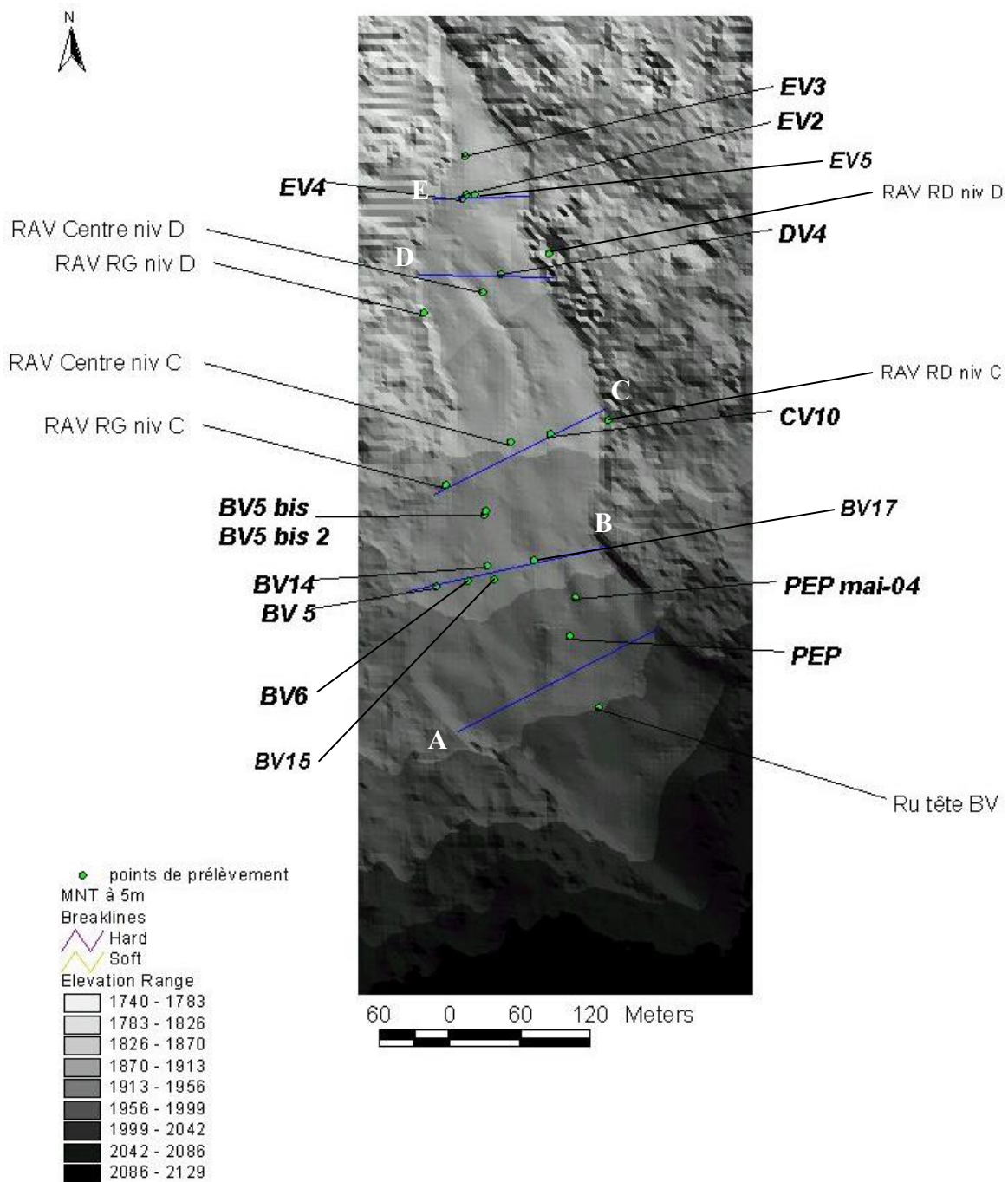


Figure 6 : Situation des différents piézomètres étudiés

II. Investigation hydrodynamique sur la période d'étude

2.1. La piézométrie

La mesure de la piézométrie permet d'étudier les variations de hauteur de la nappe dans le temps, mais elle permet également le calcul des gradients de piézométrie entre les différents points. Celui-ci correspond à la variation de la hauteur d'eau entre deux piézomètres rapportée à leur distance permettant alors de rendre comparable les variations piézométriques en tout point. De plus les valeurs du gradient piézométrique renseignent sur les conditions d'écoulement dans la nappe. En effet, le gradient 'i' est relié à la vitesse d'écoulement dans la nappe et à la perméabilité des matériaux par l'équation de Darcy :

$$i = \frac{V_{Darcy}}{K}$$

Ainsi, à vitesse de Darcy constante (soit surface et débit constants), un fort gradient correspond à une faible perméabilité tandis qu'un faible gradient correspond à une plus grande perméabilité. Le suivi piézométrique devrait donc permettre d'établir des profils de perméabilités. Or, dans le cas du glissement de Super-Sauze, les variations piézométriques sont faibles devant les variations d'altitude des points de mesure. On constate donc que la piézométrie est très nettement contrainte par les dénivellations topographiques et dans ce cas, l'eau s'écoule suivant les lignes de plus grandes pentes. Il est donc difficile d'interpréter les variations de gradient. Cependant, alors que les différences entre le gradient piézométrique et le gradient topographique sont effectivement très faibles sur l'ensemble des mesures, on constate qu'en avril et en mai 2004, entre les points EV2 et EV3, il existe un fort gradient bien supérieur à la pente (0.619 contre 0.476 en mai 2004). Or, les observations de terrains n'ont pas permis de mettre en évidence d'émergence en dessous de EV3, alors qu'il existe une rupture de pente importante. D'un point de vue hydrogéologique, ce phénomène peut s'expliquer par une forte diminution des perméabilités entre EV2 et EV3. On peut également envisager que les piézomètres EV2 et EV3 captent des niveaux d'eau différents.

L'étude des variations temporelles des hauteurs d'eau pour chaque piézomètre (Planche 2) montre que la nappe ne répond pas de la même manière aux précipitations suivant la zone du glissement observée. En effet, on constate que pour les mêmes précipitations, sur le transect B les hauteurs d'eau varient faiblement ; le piézomètre CV10 n'est quasiment pas influencé par les pluies, alors que, les piézomètres du transect D et E, qui varient de manière similaire, semblent très influencés avec une forte augmentation des niveaux d'eau après les pluies d'automne et de printemps. Comme précédemment, on montre que les variations en EV3 se distinguent de celles des autres piézomètres du transect E.

Cette variation saisonnière confirme globalement le découpage du glissement en unités hydrodynamiques réalisé par Malet (2003) à partir de l'étude des variations événementielles. En effet, on retrouve une distinction de comportement à long terme des piézomètres C (unité UHG1), D et E (UHG2) et BV5 (UHG3). La tendance de l'évolution des niveaux d'eau montrée par Malet (2003) permet également, sur une période de 3 mois, de mettre en évidence les fortes variations de l'unité UHG2. En revanche, on trouve des variations saisonnières plus faibles pour l'unité 1 que celles observées à une échelle événementielle. L'unité 1 semble donc la plus réactive à cette échelle de temps mais la plus stable à l'échelle saisonnière. A l'inverse, l'unité 2 est plus variable à l'échelle saisonnière mais moins réactive à l'échelle événementielle. Les différences de sensibilité des piézomètres à ces deux types de variations

pourraient refléter des conditions différentes de recharge de la nappe. Ainsi, les zones à faible influence saisonnière mais forte influence événementielle correspondraient à des secteurs où l'infiltration rapide est facilitée par la présence de fractures. La profondeur de la nappe ou l'importance des réserves en eaux dans ces zones expliquerait l'amortissement des variations saisonnières. A l'inverse, les zones à forte influence saisonnière mais faible influence événementielle correspondraient à des zones plus isolées où l'infiltration rapide est plus faible.

Enfin, le piézomètre EV3 ne semble pas appartenir à l'unité 2 et reflète sans doute des conditions d'écoulement différent à ce niveau (captage de niveau d'eau différents ou plus faible perméabilité).

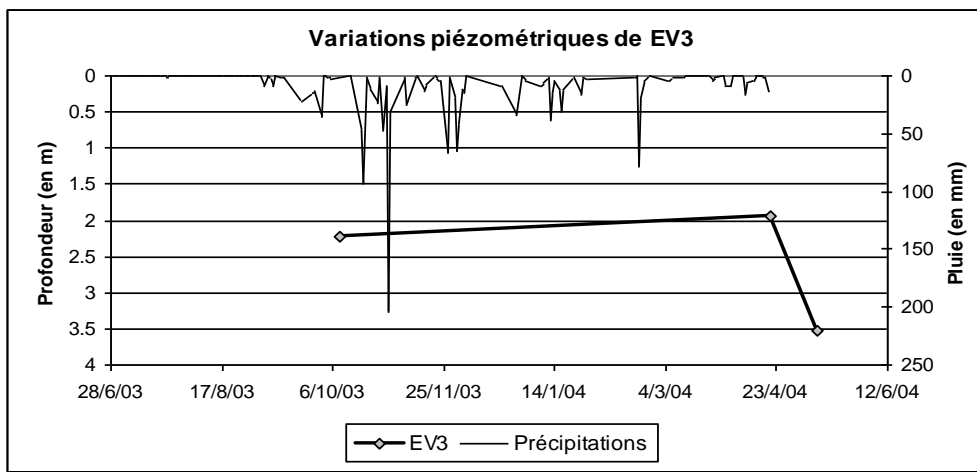
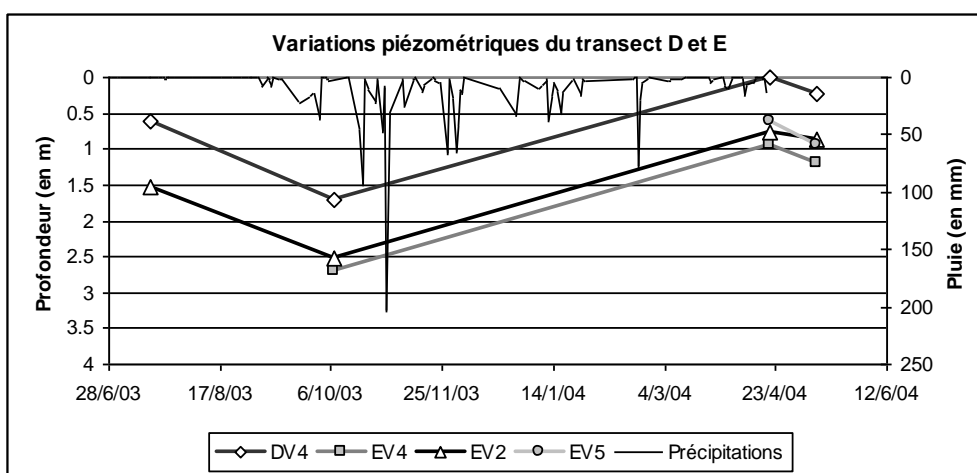
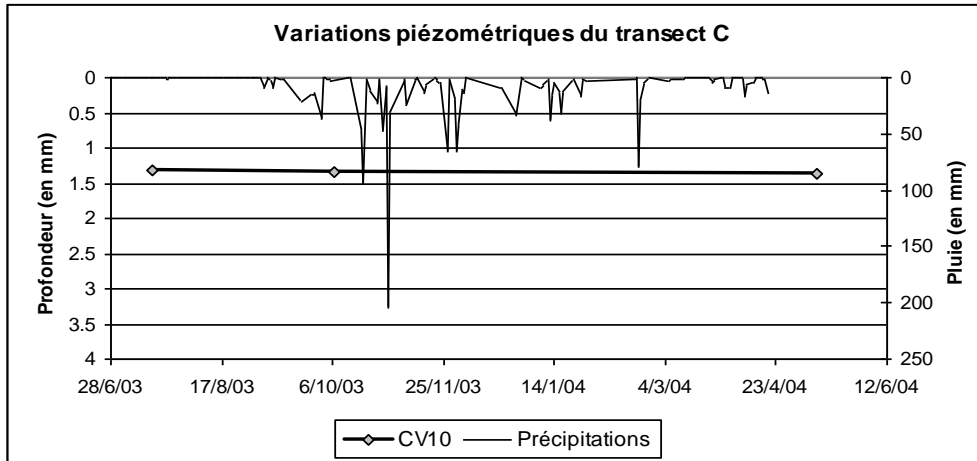
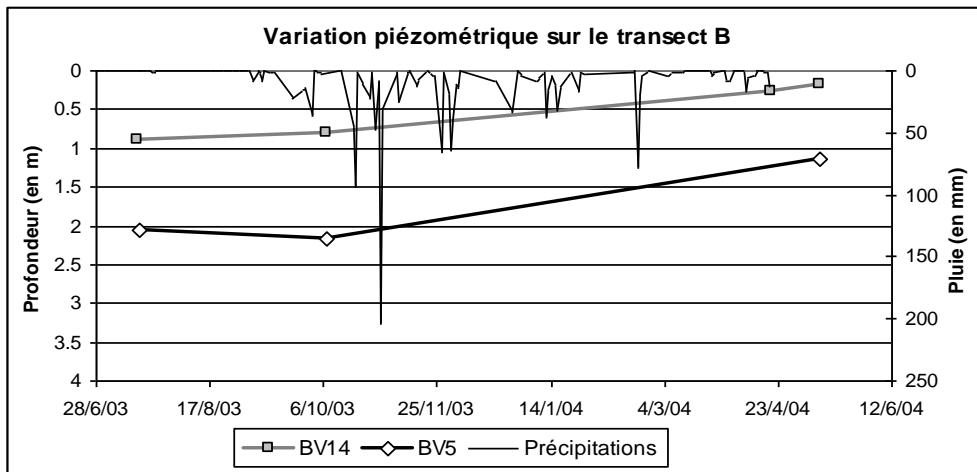


Planche 2 : Variations piézométriques par transect en fonction de la pluviométrie

2.2. Estimation de la transmissivité en différents points

Cette approche permet d'obtenir des informations ponctuelles sur le contexte hydrodynamique. La transmissivité a été estimée à partir de la recharge piézométrique après pompage lors de la campagne d'avril 2004 en appliquant l'approximation de Cooper-Jacob (1946) à l'équation de diffusivité en nappe libre de Theis (1941). Cette méthode est décrite par Banton et Bangoy (1997).

Les graphiques suivants présentent la remontée en DV4 qui reflète la quasi-totalité des observations et celle en EV5 qui présente une particularité. Les graphiques des autres remontées réalisées sont présentés dans l'Annexe 4

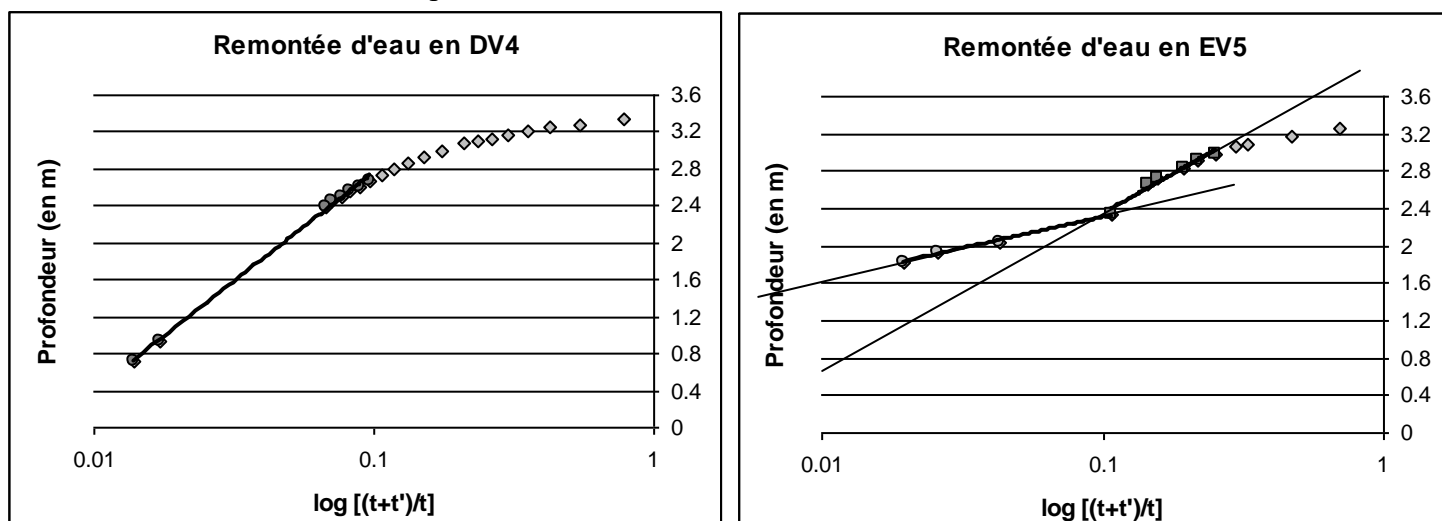


Figure 7 : Remontée d'eau en DV4 et EV5

Les résultats obtenus sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

	DV4	BV5 bis	EV4	EV5	EV2b
Q de vidange (en m ³ /s)	9.1 10 ⁻⁵	3.9 10 ⁻⁵	4.4 10 ⁻⁵	3.8 10 ⁻⁵	3.3 10 ⁻⁵
Transmissivité (en m ² /s)	7.1 10 ⁻⁶	9.9 10 ⁻⁶	5.2 10 ⁻⁶	4.1 10 ⁻⁶ 1.0 10 ⁻⁵	4.5 10 ⁻⁶

Tableau 3 : Résultats des mesures de transmissivité

Ces résultats sont un peu plus faibles que la valeur moyenne indiquée par Malet (2003) de 3.1 10⁻⁵ m²/s +/- 1.6 10⁻⁶. De plus, même si globalement les valeurs sont du même ordre de grandeur, il semble que l'on puisse distinguer deux groupes :

- DV4 et BV5bis dont les transmissivités sont un peu plus élevées (de l'ordre de 10⁻⁵)
- EV4, EV5 et EV2b qui présentent des valeurs de transmissivité un peu plus faibles (autour de 5 10⁻⁶).

La remontée de la nappe dans le piézomètre EV5 traduit la présence d'une variation latérale de faciès. En effet, on observe une rupture de pente à partir de 2.3 m de profondeur. A ce niveau, le piézomètre rencontre un milieu plus fissuré et donc plus transmissif.

Pour EV3, il n'a pas été possible d'effectuer des mesures tant la remontée était lente. Ce résultat conforte l'hypothèse d'une forte réduction de perméabilité dans ce secteur.

2.3. Les observations de terrains complémentaires

Il est difficile de définir le type d'écoulement de la nappe en fonction des observations de terrains puisque celles-ci donnent des informations contradictoires selon l'époque ou/et l'endroit de la coulée. En effet, au niveau de l'escarpement secondaire, on observe, à la faveur de la rupture de pente, de nombreux suintements témoignant du caractère libre de la nappe à cet endroit. Par contre, au niveau du piézomètre DV4, on a pu observer la captivité de la nappe lors de la campagne d'avril 2004 : le niveau d'eau dans le piézomètre était au-dessus de la surface du sol.

A l'évidence, les mesures et les observations de terrain montrent que les conditions d'écoulements dans la coulée sont complexes : captivité locale, partition entre un écoulement matriciel et fissural, compartimentation.

III. L'apport de l'analyse hydrochimique

Comme le montre la définition du dictionnaire géologique (A. Foucault, J.F. Raoult, 1984), le terme de 'marne' ne correspond pas à une espèce pétrographique clairement définie. Il convient donc de préciser la minéralogie du versant de Super-Sauze de la manière la plus détaillée possible, afin de comprendre la minéralisation de l'eau.

3.1. Contexte minéralogique des 'terres noires'

Des analyses minéralogiques ont été réalisées sur le site de Super-Sauze notamment par Herrmann (1997) et Schmutz (2000). Leur étude a porté sur un nombre variable d'échantillons (3 pour Herrmann et 8 pour Schmutz) du transect B prélevés à des profondeurs allant de 50 cm à 6 m. Dans tous les cas, le cortège minéralogique de la roche totale a été déterminé sur de la poudre de Terres Noires et l'étude minéralogique de la fraction inférieure à 2µm a été réalisée par diffractométrie aux rayons X sur pâte orientée. Leurs résultats s'accordent sur une composition en proportions sensiblement équivalentes (30 à 40%) de carbonates (calcite et dolomite) de silicates (quartz et albite) et de phyllosilicates (argiles). Dans le détail, on trouve de légères variations suivant les auteurs et la profondeur de l'échantillon, mais il semble que l'on puisse proposer la composition moyenne suivante :

- 40% d'argiles
- 25% de quartz
- 25% de calcite
- 5% de dolomite
- 3% de plagioclase
- 2% de pyrite

Phan (1993) souligne par contre que cette composition minéralogique ne varie pratiquement pas d'un point de vue qualitatif entre le faciès rocheux sain et les produits altérés. Pour la fraction argileuse, les résultats sont peu variables avec une proportion de 80% d'illites et 20% de chlorites et une très faible quantité de smectite (Maquaire et al., 2003). De plus, tous les auteurs s'accordent sur l'absence d'argiles gonflantes dans les Terres Noires du bassin de Barcelonnette. Les proportions de pyrite sont très variables (de 0.9% à 4.2% pour les mesures de Schmutz). Il est donc difficile de donner une estimation globale. De plus, les observations de terrains semblent montrer que la pyrite se présente sous forme de filon, ce qui expliquerait la variabilité des proportions selon les mesures. Enfin, la quantité de pyrite observable sur le site laisse penser que l'estimation faite de 2% est un peu faible. D'après Phan (1993) et Weber (2001) l'oxydation des nodules pyriteux qui produit de l'acide sulfurique, contribue à la décalcification de la roche et la formation de gypse ; cette dernière étape s'accompagnant d'une augmentation de volume, aurait en plus une action de décohésion mécanique de la roche. Cette explication est mise en balance par Schmutz (2000) qui a montré l'absence totale de gypse dans la roche. Il semble cependant possible que le gypse soit présent mais uniquement sous forme de filon ce qui expliquerait que les analyses n'en aient pas trouvé.

3.2. Analyse de la minéralisation des eaux du glissement de Super-Sauze

L'étude hydrochimique a porté sur l'eau de la coulée (piézomètres, ravine centrale et ruisseau en tête de bassin) ainsi que les eaux des ravines Est et Ouest ce qui a constitué au total l'analyse de 84 échantillons dont 39 issus de piézomètres (Annexe 5). Les données hydrochimiques concernant la source de Goutta, située dans le glacier rocheux en amont du glissement, ont été obtenues auprès de la DDASS des Alpes-de-Haute-Provence. Des analyses sur une source captée dans des marnes sur le versant opposé de Super-Sauze ont également été réalisées à titre comparatif. Le diagramme de Piper suivant présente l'ensemble des eaux analysées.

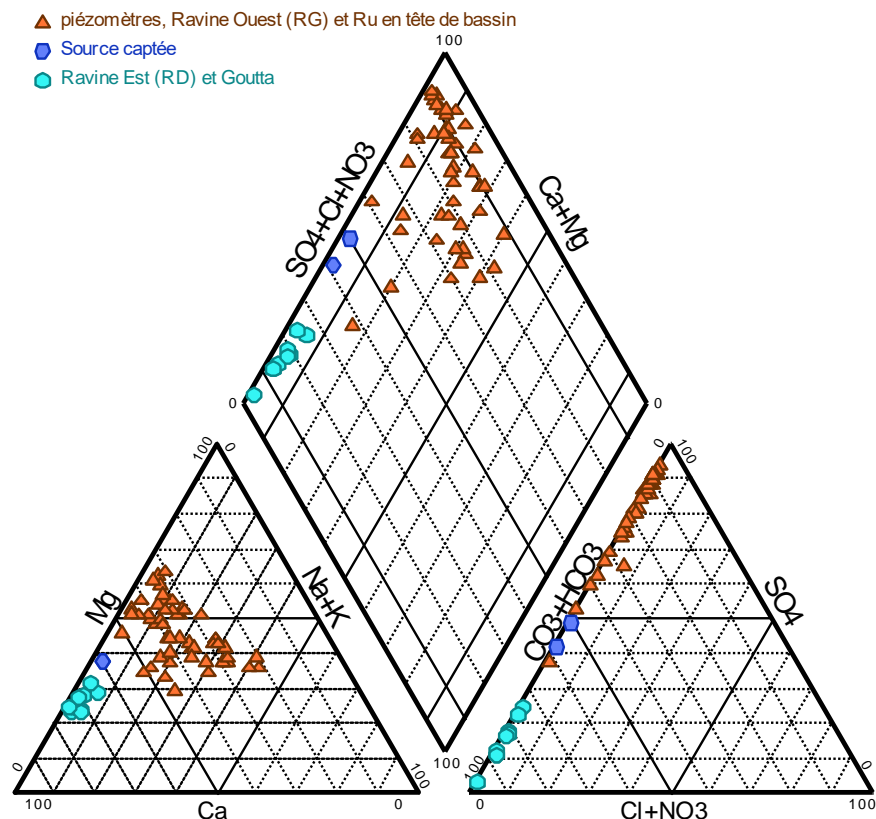


Figure 8 : Présentation du faciès des eaux analysées

On distingue 3 faciès différents :

- un faciès bicarbonaté-calcique, regroupant la source de Goutta dont l'eau provient des moraines (ce qui est confirmé ici), l'eau au contact entre les moraines et les marnes (prélevée périlleusement dans la partie Est de l'escarpement principal) et l'eau de la ravine Est
- un faciès sulfaté-calcique et magnésien plus ou moins sodique, représenté par les eaux des piézomètres du glissement, la ravine Ouest et le ruisseau en tête de bassin
- un faciès intermédiaire représenté par les eaux de la source captée dans des marnes en places.

Ce graphique permet de souligner la relation entre les eaux de Goutta et la ravine Est et l'alimentation préférentielle de cette ravine par les eaux issues du contact moraines-marnes.

Pour notre étude, nous nous intéresserons essentiellement à l'eau des piézomètres, mais il serait intéressant d'étudier plus attentivement la ravine Ouest afin de déterminer l'importance des relations avec les eaux du glissement. L'eau des piézomètres présente de très fortes conductivités (supérieures à 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et allant jusqu'à 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et une forte concentration en ions allant jusqu'à 140 meq/l. Elle est sulfatée (de 4 à 60 meq/l de SO_4) magnésienne et calcique (figure 9). On observe également de fortes teneurs en sodium (jusqu'à 35 meq/l)

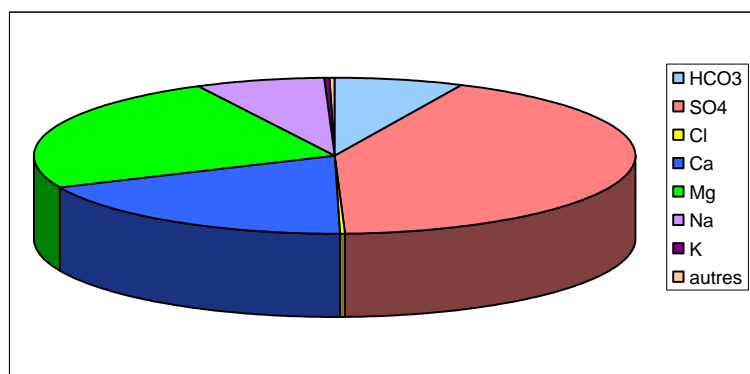


Figure 9 : Répartition des ions dans les eaux du glissement

Le tableau suivant présente à titre de comparaison quelques valeurs du chimisme obtenues dans d'autres sites.

Nom	Localisation	Concentrations associées aux teneurs maximales en SO_4	Géologie
Glissement-coulée de Super-Sauze	Bassin de Barcelonnette, Alpes-de-Haute-Provence	$\text{SO}_4=3677\text{mg/l}$ $\text{Ca}=438\text{mg/l}$ $\text{Mg}=391\text{mg/l}$ $\text{Na}=805\text{mg/l}$	Marnes noires du Callovo-Oxfordien
Glissement-coulée de la Valette (Le Mignon,2004)	Bassin de Barcelonnette (versant opposé à celui de Super-Sauze)	$\text{SO}_4=1780\text{mg/l}$ $\text{Ca}=405\text{mg/l}$ $\text{Mg}=414\text{mg/l}$ $\text{Na}=21\text{mg/l}$	Chevauchement des marnes noires du Callovo-Oxfordien par les Flysch de l'Autapie
Glissement du Hohberg (Tullen, 2002)	Canton de Fribourg, Suisse	$\text{SO}_4=1431\text{mg/l}$ $\text{Ca}=586\text{mg/l}$ $\text{Mg}=15\text{mg/l}$ $\text{Na}=0.9\text{mg/l}$	Flysch du Gurnigel et Wildflysch
Glissement de Draix (communication orale, Cras)	Draix, Alpes-de-Haute-Provence	$\text{SO}_4=1495\text{mg/l}$ $\text{Ca}=219\text{mg/l}$ $\text{Mg}=190\text{mg/l}$ $\text{Na}=43\text{mg/l}$	Marnes noires du Callovo-Oxfordien

Ainsi, on constate que les eaux du glissement-coulée de Super-Sauze présente des concentrations en sulfates et en sodium sans commune mesure avec les eaux des autres glissements.

3.3. Origine de la minéralisation : les différents ions et leur rapport

Le Sodium

Il est présent en très forte proportion dans les eaux et représente près de 14% des cations et 7% de la minéralisation totale. L'absence d'activité humaine sur le versant de Super-sauze (absence de route et d'agriculture) implique que le sodium n'a pas une origine anthropique. Les valeurs du rapport Na/Cl, allant de 10 à 700 pour le glissement de Super-sauze, indiquent également que l'origine du sodium n'est pas à rechercher dans la halite. De plus, aucune corrélation n'a pu être mise en évidence avec les autres ions.

Cet enrichissement en sodium peut donc s'expliquer par un phénomène d'échange cationique sur les argiles, ou par l'hydrolyse des feldspaths bien que les concentrations observées ne puissent entièrement provenir de ce processus.

Le calcium

Le calcium présente une concentration moyenne de 15 meq/l dans les eaux du glissement, ce qui représente environ 37% des cations. Il a essentiellement 2 origines : la dissolution des carbonates (calcite, calcite magnésienne) et/ou des sulfates (gypse, anhydrite) dont les solubilités élevées permettent la mise en solution de quantités importantes de calcium. Dans les roches détritiques carbonatées telles que les marnes, il est généralement le cation principal (Meybeck, 1984), ce qui n'est pas le cas pour les eaux du glissement de Super-Sauze. Il n'y a que pour le torrent Est, alimenté par l'eau des moraines que le calcium est le cation majoritaire. La mise en solution du calcium, lors de la dissolution des carbonates, s'accompagnant de la mise en solution des bicarbonates, on observe une corrélation entre ces ions. Ainsi l'étude du rapport $[\text{HCO}_3^-]/[\text{Ca}^{2+}]$ renseigne sur l'origine du calcium.

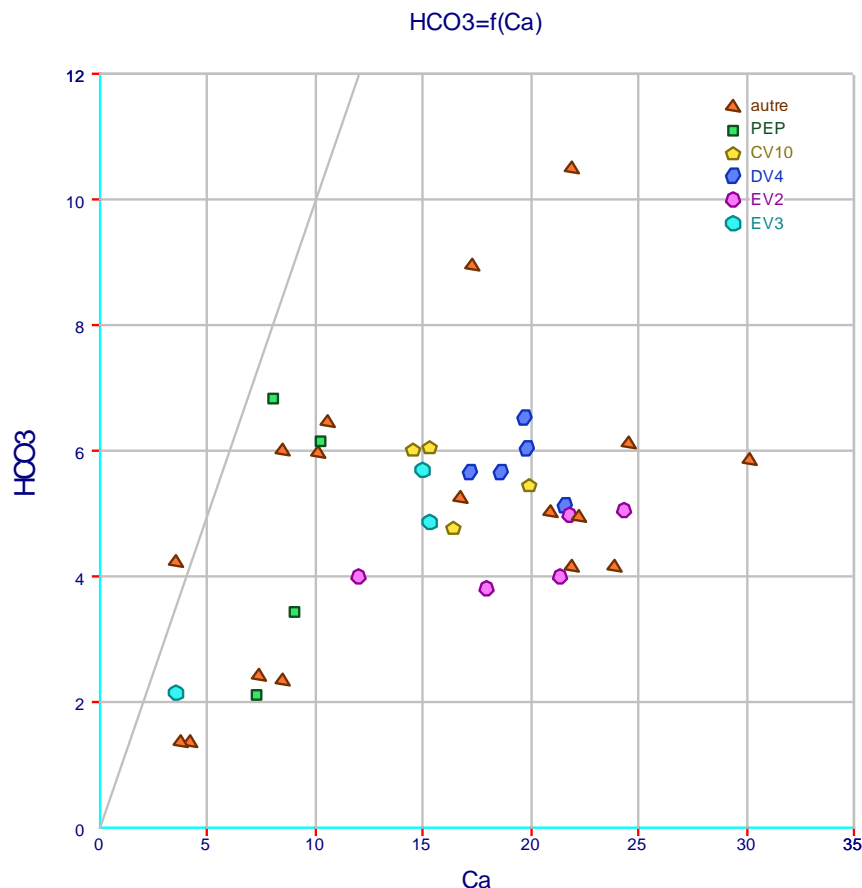


Figure 10 : Répartition des eaux en fonction du rapport $[\text{HCO}_3^-]/[\text{Ca}^{2+}]$

Ce rapport permet de mettre en évidence la dissolution de la calcite ou de la dolomie. En effet, un rapport équimolaire entre les ions HCO_3^- et Ca^{2+} (pour des valeurs exprimées en meq/l) permet d'identifier la dissolution de la calcite tandis qu'un rapport de 1.5 indique la dissolution de la dolomie (Domenico & Schwartz, 1998, in Tullen, 2002). Dans le cas de Super-Sauze, l'analyse du rapport $[\text{HCO}_3^-]/[\text{Ca}^{2+}]$ (figure 10) ne permet pas de dégager une bonne corrélation entre les ions Ca^{2+} et HCO_3^- . Il semble donc que la dissolution de la calcite ou de la dolomie n'expliquent pas directement les teneurs en calcium dans les eaux du glissement. En outre, on peut constater un enrichissement relatif en calcium par rapport aux bicarbonates (tous les points se situent sous la première bissectrice) qui peut-être imputable au gypse. En effet, les rapports $[\text{HCO}_3^-]/[\text{Ca}^{2+}]$ sont tous inférieurs à 1 (sauf un point) avec une moyenne de 0.38. La précipitation de la calcite est aussi mise en évidence par l'indice de saturation presque toujours positif.

Le magnésium

C'est le cation majoritaire dans les eaux du glissement : il représente en moyenne 48% des cations contre 37% pour le calcium. Les concentrations en magnésium, variables suivant les piézomètres, peuvent monter jusqu'à 40 meq/l. Bien qu'il soit en plus faibles concentrations dans les ravines Ouest et centrale (inférieures à 11 meq/l), le magnésium reste supérieur au calcium. Par contre, la ravine Est présente des teneurs en calcium supérieures à celles en magnésium, ce qui s'explique par son alimentation par les eaux des moraines et la source de Goutta.

Le magnésium a des origines semblables à celle du calcium notamment calcite magnésienne et dolomite ainsi que sulfates magnésiens. Cependant, ces minéraux étant plus rares et/ou moins altérables et solubles que les minéraux calciques, le magnésium n'est que rarement supérieur au calcium et ce pour des eaux particulières comme celles de certaines évaporites (Meybeck, 1984). Ainsi, les fortes teneurs en magnésium sur le site de Super-Sauze laissent supposer la présence d'évaporites telles que la kisiérite (MgSO_4).

Les sulfates

Ils sont présents en très fortes concentrations dans le glissement de Super-Sauze puisque l'on trouve des teneurs allant jusqu'à 68 meq/l. Il est de loin l'anion majoritaire (86%).

Les sulfates proviennent de plusieurs sources : les minéraux sulfurés (essentiellement la pyrite), les produits organiques soufrés (essentiellement dans les roches organiques) et les minéraux sulfatés (sulfates de magnésium, de calcium ou de strontium communs dans les roches évaporitiques). Pour les eaux de roches sédimentaires non-évaporitiques, les quantités de sulfates sont limitées (0.02 à 0.2 meq/l pour les roches carbonatées) et il semble que seules les eaux issues d'évaporites peuvent donner des teneurs en sulfates très importantes où le sulfate représente jusqu'à 100% de la somme des anions (Meybeck, 1984). Les marnes du glissement de Super-Sauze étant riches en pyrite, celle-ci constitue une première origine possible des teneurs en sulfates. Cependant, la dissociation de pyrite en sulfates entraîne la mise en solution d'ions H^+ qui acidifie le milieu et même si l'équilibre calco-carbonique peut tamponner le système, il est difficile d'envisager de telles concentrations en sulfates sans variation notable de pH. Compte tenu des teneurs en sulfates, l'origine la plus probable reste donc les évaporites bien que les études minéralogiques n'en aient jamais reconnu dans le glissement. Ceci concorde avec les remarques faites précédemment sur le calcium et le magnésium.

Si le calcium, le magnésium et les sulfates proviennent de la dissolution des évaporites, il doit exister une relation entre ces ions (Figure 11). On constate alors que la corrélation entre les sulfates d'une part et le calcium et le magnésium d'autre part est bonne. En effet, les points de

mesure se répartissent autour de la première bissectrice. Ainsi, le rapport $[Ca^{2+}]+[Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}]$ proche de 1 semble confirmer la présence de sulfates de magnésium et de calcium.

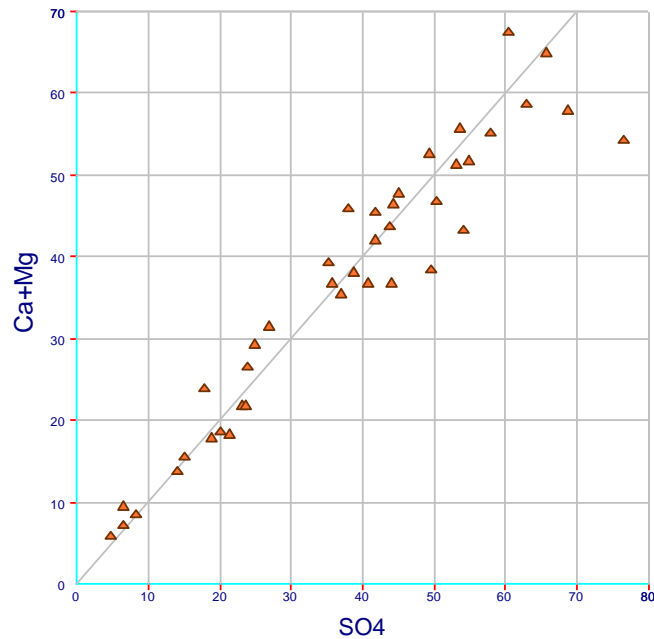


Figure 11 : Relation entre les sulfates, le calcium et le magnésium

Dans le détail, on constate que le calcium montre une moins bonne corrélation avec les sulfates, notamment pour les fortes valeurs de calcium, ce qui montre que le système est chimiquement contraint par la précipitation de la calcite.

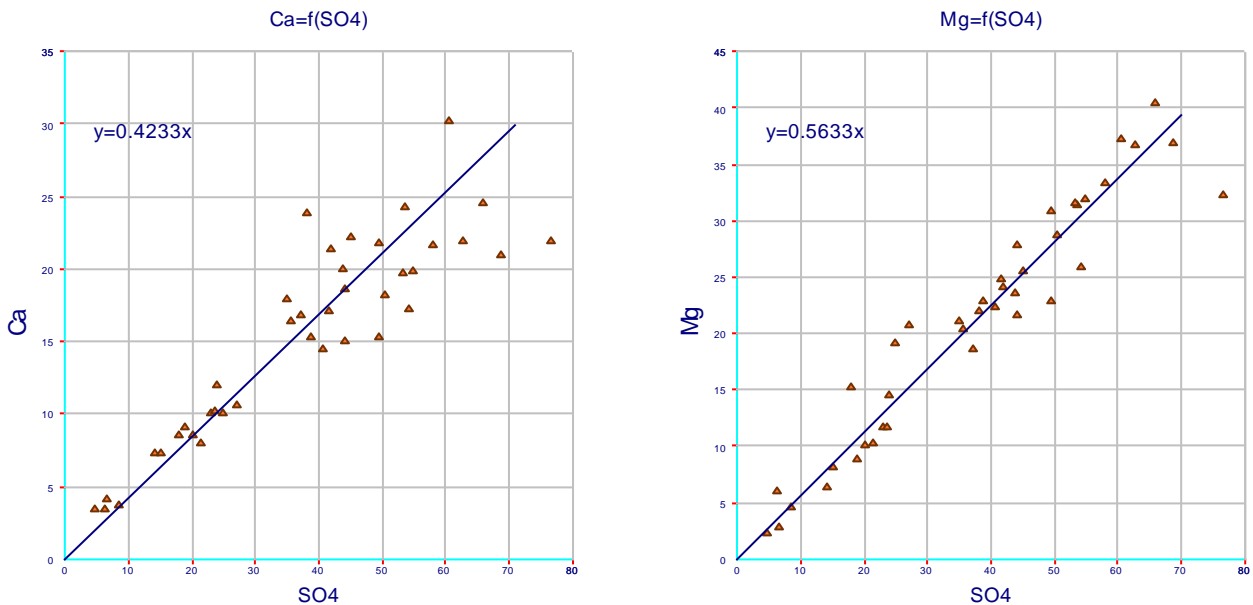


Figure 12 : Comparaison des rapports $[Ca^{2+}]/[SO_4^{2-}]$ et $[Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}]$

L'apport de l'analyse du strontium

Quel que soit le type de roche, le strontium présente des teneurs bien plus faibles que celles des autres éléments alcalins et alcalinoterreux (Ca, Mg, Na). Dans les eaux des roches sédimentaires non évaporitiques, les teneurs en strontium sont très limitées (autour de 3 µeq/l). Par contre, dans les eaux des roches évaporitiques, elles sont bien plus élevées (autour de 120 µeq/l). Les fortes teneurs en strontium caractérisent donc la présence des évaporites et s'expliquent par la dissolution de la célestite SrSO₄, associée au gypse. (Meybeck, 1984). Cette association célestite/gypse a permis l'utilisation du rapport Sr/Ca en concentration molaire pour caractériser la dissolution des évaporites. En effet, dans ce cas, le rapport Sr/Ca est supérieur ou égal à 1 ‰. De plus, d'après Meybeck (1984) lorsque les eaux sont essentiellement sulfatées, les rapports Sr/Ca sont constants et caractéristiques de l'évaporite du site :

- évaporites du Trias alpin et lorrain : 10 ‰
- évaporites du Trias provençal : 3 ‰
- évaporites du Trias pyrénéen : 3 à 5 ‰
- évaporites du Crétacé : 1 à 2 ‰

Dans le glissement de Super-Sauze, les teneurs en strontium s'échelonnent entre 11 et 116 µeq/l, à l'exception d'une valeur à 5 µeq/l (PEP en mai 2003), avec une moyenne de 52 µeq/l ce qui semble marquer l'influence d'évaporites dont la présence a déjà été supposée par l'étude des autres ions. De plus, les rapports Sr/Ca, sont supérieurs à 1 ‰ (Bakalowicz, 1988) sauf pour le point PEP 05/03 mais ils présentent par contre une grande variabilité (les valeurs sont comprises entre 1.2 ‰ et 7.8 ‰), ce qui rend difficile l'interprétation. Cette variabilité s'observe notamment entre les campagnes. En effet, on constate par exemple que les valeurs des rapports Sr/Ca pour la campagne d'octobre sont divisées par 2 par rapport à la campagne de juillet. Or la campagne d'octobre est précédée d'une pluie. Il est donc possible que cet apport d'eau peu minéralisée ait remis en solution de la calcite qui avait précipité en surface pendant la période de juillet, août et septembre 2003. Ainsi la contrainte géochimique du système par la calcite rend difficile l'interprétation de ce rapport.

L'interprétation des ions majeurs (Ca, Mg et SO₄) ainsi que du strontium laisse fortement supposer une origine évaporitique de la minéralisation. Seul le sodium semble avoir une origine différente (échanges cationiques).

Tous les arguments concordent : l'influence de roches telles que le gypse ou la kisiérite semble incontestable bien qu'il n'ait jamais été mis en évidence sur le site de Super-Sauze. Leur origine est peut-être à rechercher au niveau du contact tectonique qui sépare les formations marneuses et la nappe du Parpaillon. Nous reviendrons sur cette hypothèse dans la partie IV sur la géochimie.

3.3. Les variations spatiales de la minéralisation

Dans la partie précédente, la minéralisation a été abordée de manière globale. Or l'étude hydrodynamique a montré que les conditions d'écoulement entre deux points pouvaient être très variables. De plus, Malet (2003) a montré l'existence de discontinuités hydrodynamiques transversales au sein de la coulée. Il convient donc d'étudier dans le détail l'évolution de la minéralisation. Dans un premier temps, nous présenterons la tendance d'évolution de l'amont vers l'aval des concentrations, puis nous préciserons les variations spatiales pour les ions reconnus comme des marqueurs des évaporites. Enfin nous étudierons la variabilité au sein d'un même transect.

3.3.1. Variation générale de l'amont vers l'aval de la coulée

En reportant les concentrations de chaque élément pour les piézomètres se situant le long d'une ligne d'écoulement supposée (Figure 13), on voit se dégager une tendance à l'augmentation des concentrations en calcium, magnésium et sulfates alors que le sodium et dans une moindre mesure les bicarbonates ont tendances à décroître (Figure 14 et Annexe 6).

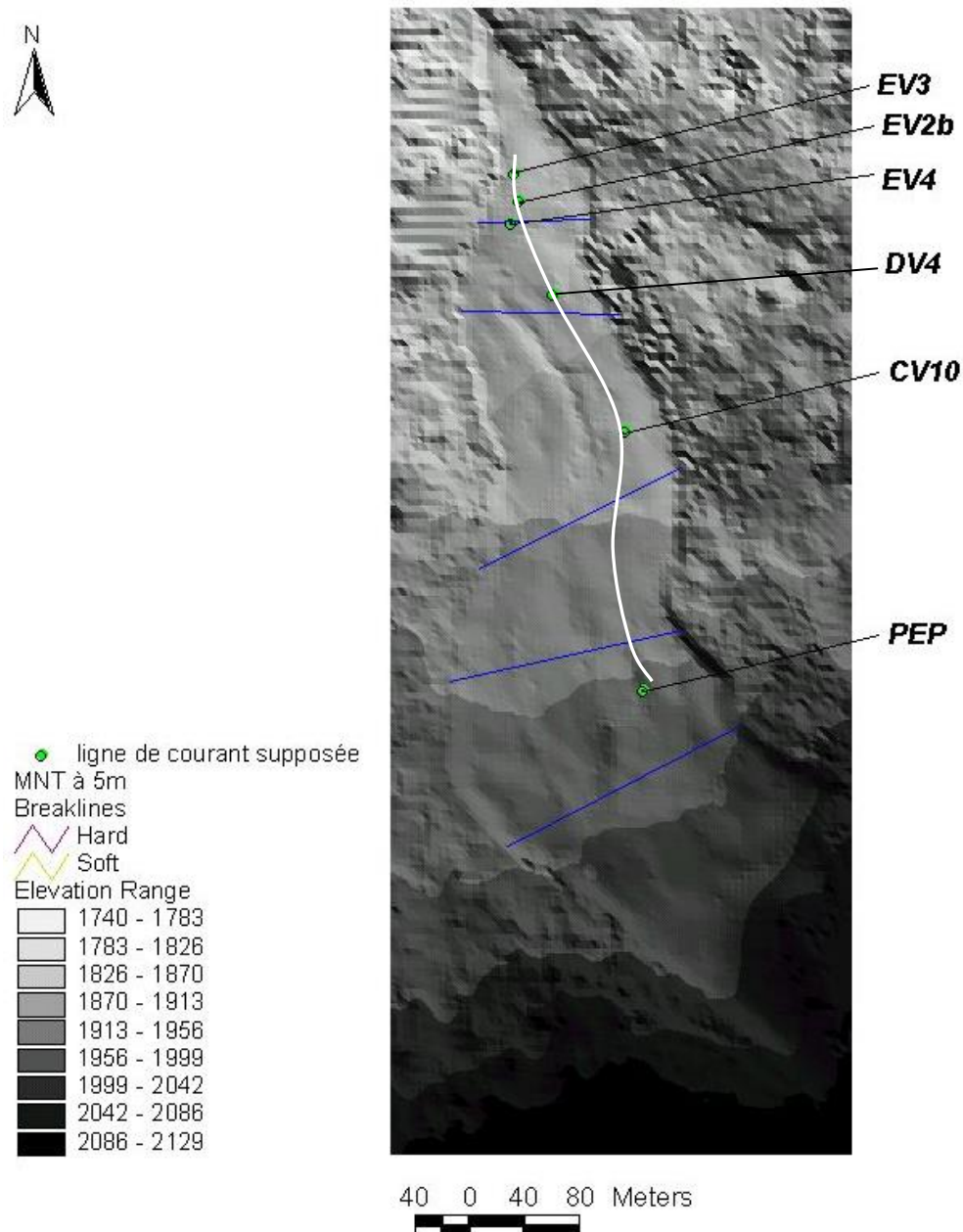


Figure 13 : Localisation de la ligne d'écoulement supposée

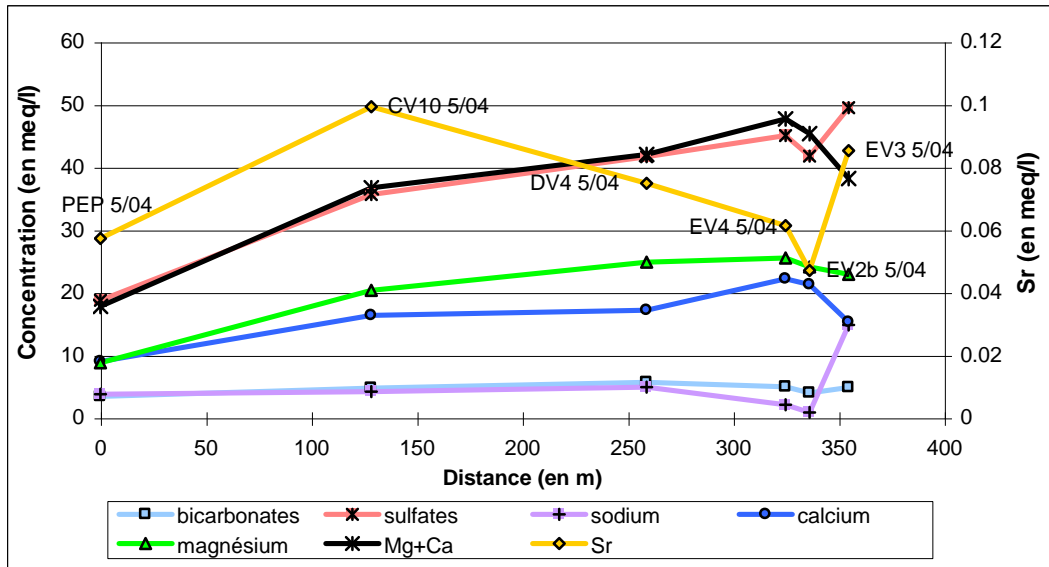


Figure 14: Variation des éléments le long d'une ligne de courant supposée (campagne de mai 2004)

Dans le détail, on constate que les concentrations augmentent jusqu'en DV4 puis elle diminue, plus ou moins fortement suivant la campagne, jusqu'en EV2. En EV3, le calcium et le magnésium continuent à décroître alors que les sulfates, le strontium et le sodium augmentent de manière importante (augmentation près de 10 meq/l pour Na et SO₄ et doublement des valeurs en Sr). Ainsi, le piézomètre EV3 échappe à la logique globale d'évolution des éléments, ce qui confirme la différence de contexte hydrodynamique évoquée dans le paragraphe 2.1.

Les variations systématiquement opposées des teneurs en sodium et en calcium illustrent l'existence de processus d'échanges cationiques au sein de la coulée. Entre EV2 et EV3, on observe une intensification de ce mécanisme due à la baisse de la perméabilité (diminution de la vitesse de l'eau et augmentation du temps de contact).

Enfin, on peut remarquer que l'augmentation des concentrations en calcium vers l'aval de la coulée est plus faible que celle des teneurs en magnésium ($[Ca] = [Mg]$ en PEP puis $[Mg] > [Ca]$) ce qui souligne le contrôle géochimique du système par la précipitation de calcite. Les piézomètres du transect B ne semblent pas s'inscrire dans cette logique. Or sur le terrain, ces piézomètres sont séparés du compartiment principal sur lequel se situent les piézomètres PEP, C, D et E par la ravine central et en plus pour BV5 par une paléo-échine. Pour BV17, sa situation dans la zone la plus active du glissement lui confère une plus forte minéralisation s'expliquant par l'augmentation des surfaces de contact entre l'eau et le matériau. Il est donc normal de ne pas intégrer le transect B dans la logique de minéralisation amont-aval.

Sur la base des relations entre le strontium et les sulfates, la succession suivante peut être envisagée :

- Entre PEP et CV10, les concentrations en strontium et en sulfates augmentent conjointement : le sulfate provient des évaporites (ce qui semble confirmé par la forte augmentation de calcium et de magnésium)
- Entre CV10, DV4 et EV4, le strontium diminue alors que les sulfates et le magnésium continuent à augmenter mais moins fortement. Cette augmentation s'explique par des

processus internes à la coulée : la dissolution de la pyrite pour les sulfates, la dédolomitisation pour le magnésium.

- Entre EV4 et EV2, tous les ions diminuent ce qui semble témoigner d'une dilution
- Enfin, entre EV2 et EV3, le strontium et les sulfates augmentent à nouveau. L'influence des évaporites semble à nouveau se manifester.

3.3.2. Etude des variations du rapport $[Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}]$ et $[Sr^{2+}]/[Ca^{2+}]$

L'étude de la minéralisation globale de l'eau a montré, par l'analyse de certains ions, l'influence des évaporites. Il convient maintenant de déterminer si cette influence est la même en tout point, ou si là encore, on observe des variations.

Variations du rapport $[Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}]$:

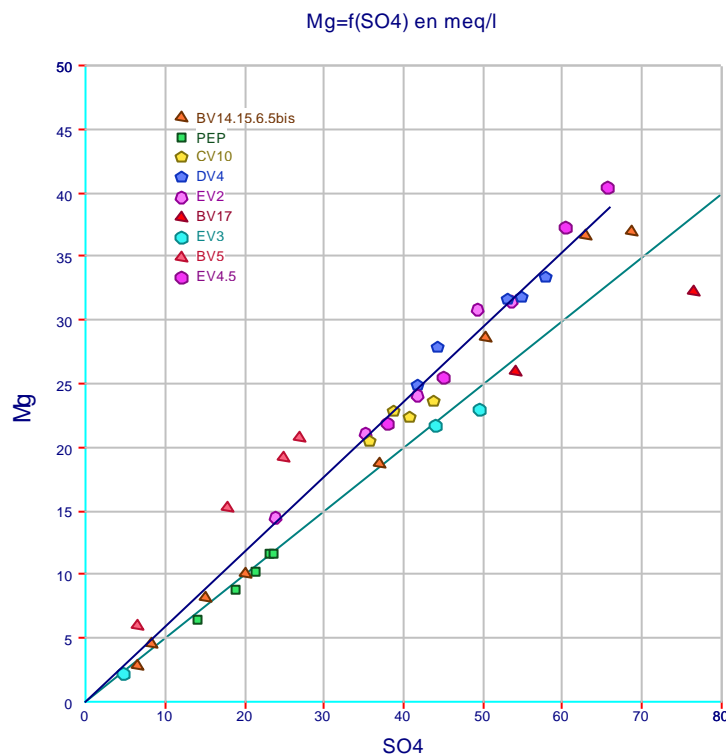


Figure 15 : Répartition des eaux en fonction du rapport $[Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}]$

On peut observer deux tendances en fonction des piézomètres observés :

- Les piézomètres PEP, EV3 et la majorité des piézomètres du transect B présentent un rapport $[Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}]$ de 0.5, ce qui rend compte de la dissolution de sulfates de calcium et de magnésium
- Les piézomètres CV10, DV4, et EV4,5 présentent un enrichissement relatif en magnésium avec un rapport $[Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}]$ de 0.6. Celui-ci peut s'expliquer par la dissolution de la dolomite dans le cadre d'un processus de dédolomitisation (Appelo & Postma, 1996).

Le piézomètre BV5 se distingue bien de l'ensemble des autres piézomètres par des valeurs plus élevées en magnésium et on observe un enrichissement en sulfates pour le piézomètre BV17.

Ce graphique permet ainsi de confirmer la présence de discontinuités transversales au sein du glissement. Ainsi les différents groupes identifiés précédemment correspondent globalement aux trois unités hydrodynamiques délimitées par Malet (2003) avec cependant quelques nuances :

- BV17 semble enrichi en sulfates. Or il correspond à la zone la plus active du glissement (ce qui explique d'ailleurs qu'il n'a pas été prélevé lors des deux dernières campagnes, le glissement l'ayant entièrement submergé). A ce niveau, la surface de contact entre l'eau et les matériaux est supérieure au reste de la coulée puisque le glissement a pour effet de broyer la roche et ses minéraux. De plus il semble probable que l'oxydation de la pyrite soit stoppée par le dépôt d'hydroxydes à sa surface (communication orale, C.Bertrand, Besançon); le broyage par le glissement permettrait alors de mettre en contact avec l'eau des cassures franches à nouveau oxydables.
- EV3, d'après sa position géographique appartient à la zone UGH2. Or d'un point de vue chimique il semblerait qu'il soit plus proche du comportement des piézomètres de la zone UGH1 et notamment de PEP.

Variations du rapport $[Sr^{2+}]/[Ca^{2+}]$:

Malgré la disparité des valeurs évoquée dans la partie 3.3, on peut distinguer trois groupes d'eaux d'après les campagnes de juillet 2003, d'avril et de mai 2004 (Planche 3 et Annexe 7) :

- $Sr/Ca < 3.5 \text{ ‰}$: les piézomètres E sauf EV3 (EV4, EV5, EV2b), BV17 et BV5 ainsi que la ravine rive droite (Est) et l'eau du contact moraines/marnes
- $3.5 \text{ ‰} < Sr/Ca < 5.5 \text{ ‰}$: les autres piézomètres B (BV6, BV14, BV5 bis), DV4
- $5.5 \text{ ‰} < Sr/Ca$: PEP, CV10 et EV3 ainsi que les ravines rive gauche (Ouest) et central et le ruisseau en tête de bassin.

Pour la campagne d'octobre 2003, bien que les valeurs soient plus faibles, les classes sont identiques. Enfin, pour la campagne de mai 2003, on retrouve globalement les mêmes groupes d'eaux bien que les valeurs soient également plus faibles, avec cependant quelques variations :

- La valeur la plus faible correspond au piézomètre PEP, alors qu'il présente des valeurs élevées pour l'ensemble des autres campagnes
- CV10 se retrouve dans la deuxième classe.

On constate globalement une diminution des rapports Sr/Ca de l'amont vers l'aval du glissement qui s'explique par l'enrichissement des eaux en calcium dans ce sens. L'augmentation des valeurs en calcium, avec des valeurs de strontium fixes, laisse supposer que l'acquisition du strontium se fait en amont de la coulée alors que l'augmentation en calcium correspondrait à un apport par les minéraux du glissement. Ainsi les fortes valeurs du rapport correspondraient à la signature des évaporites, on aurait alors bien la preuve de l'influence d'évaporites du trias alpin (valeurs proches de 10‰). Les piézomètres EV3 et CV10 présentent également un rapport Sr/Ca élevé, ce qui peut correspondre à une diminution des apports en calcium ou à une liaison plus directe avec de l'eau ayant circulé sur les évaporites. Mais il serait nécessaire d'obtenir des informations complémentaires sur l'analyse du rapport Sr/Ca avant d'aller plus loin dans l'interprétation.

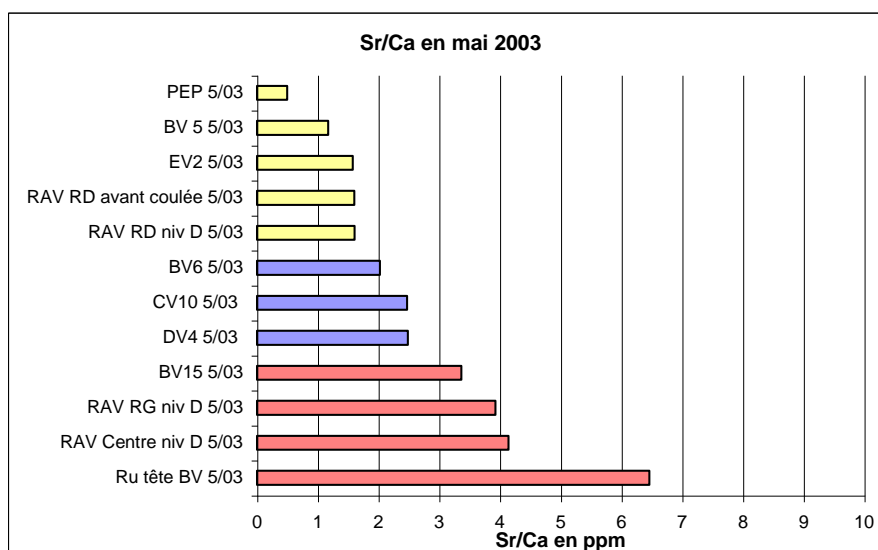
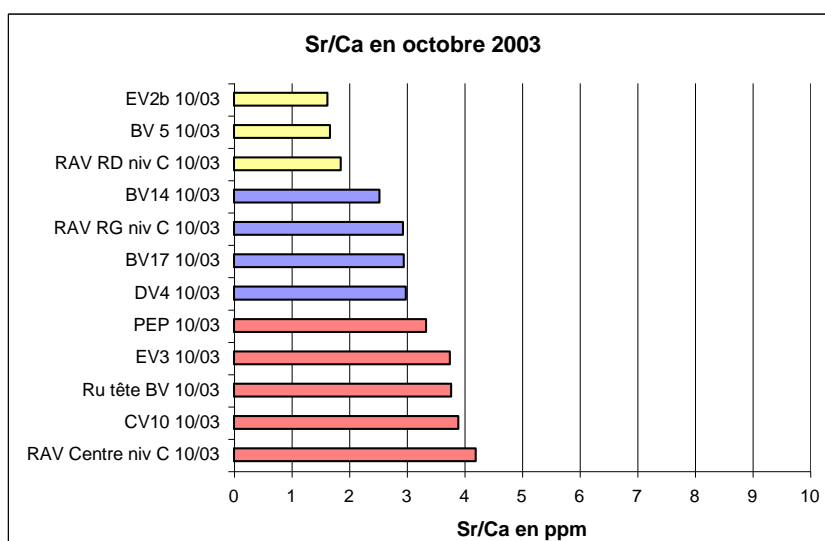
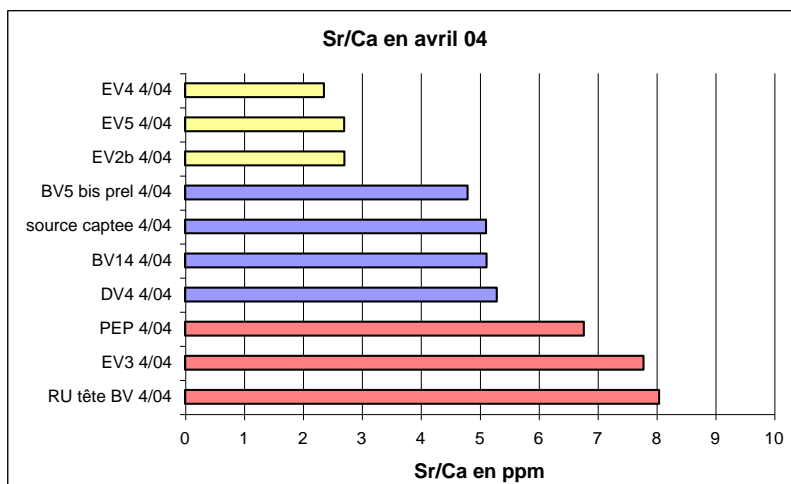


Planche 3 : Répartition des rapports Sr/Ca en pour mille (ppm)

Toutes les méthodes d'analyse montrent qu'il existe une grande variabilité entre les différents points. Mais ces variations sont-elles dues à un changement de localisation longitudinale dans la coulée (changement de transect) ou est-ce qu'au sein d'un même transect ces variations persistent ?

3.3.3. Etude de la variabilité des piézomètres au sein d'un même transect

Transect E :

Sur un graphique global de Schöeller Berkaloff présentant les eaux des piézomètres du transect E, on retrouve l'homogénéité de faciès des différents points à l'exception de EV3.

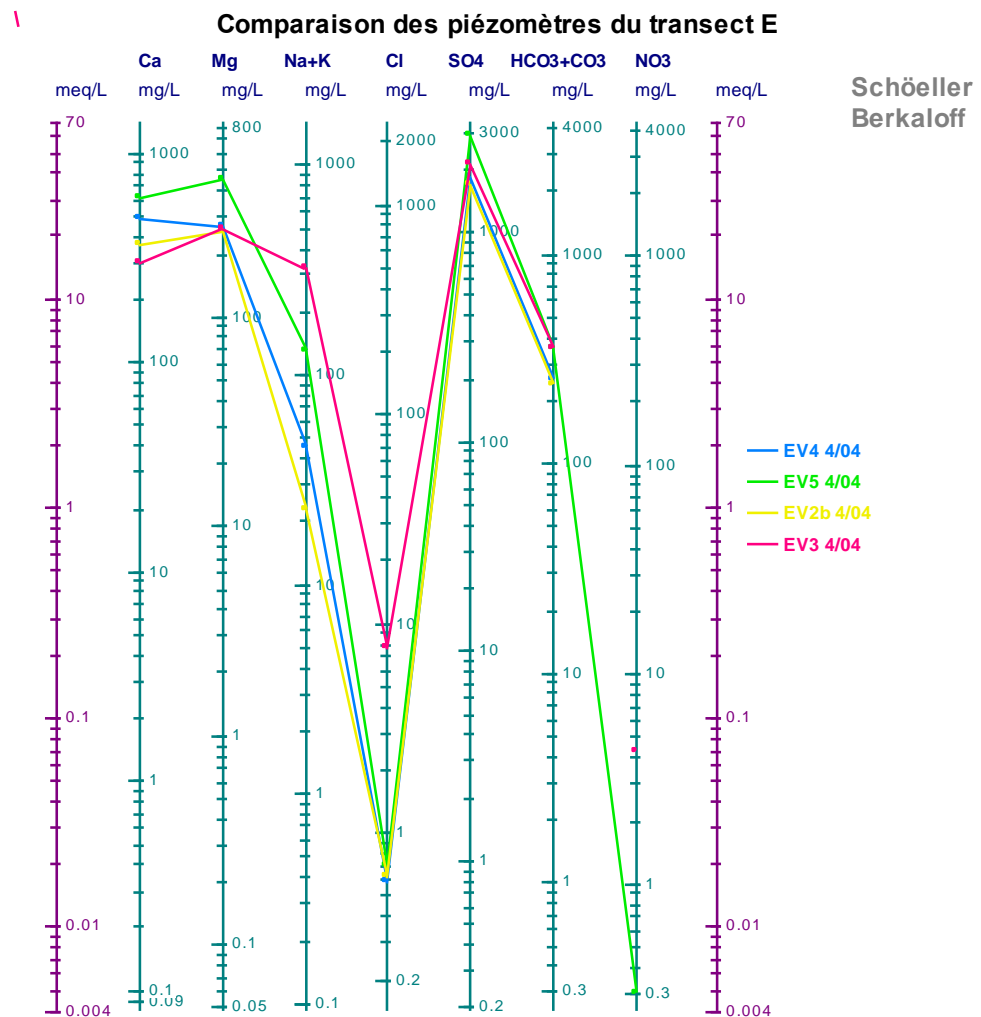


Figure 16: Variation comparée de la minéralisation des piézomètres E

Transect B :

A la différence des piézomètres du transect E, il n'existe pas de campagne où tous les piézomètres aient été analysés en même temps. Cependant, on a pu constater que les variations entre les différents piézomètres étaient supérieures aux variations inter-campagne

pour chaque point de mesure. Il est donc possible de tirer des conclusions d'un graphique mélangeant plusieurs campagnes.

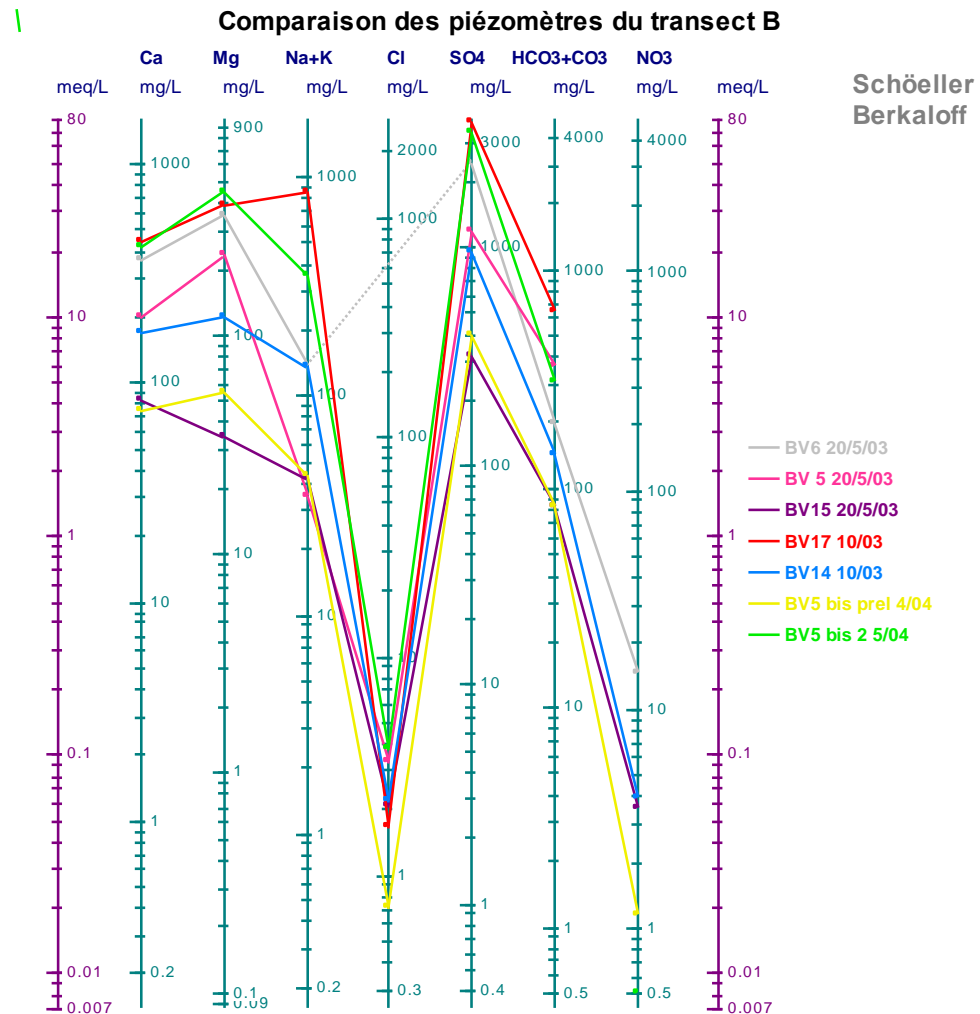


Figure 17: Variation comparée de la minéralisation des piézomètres B

Le graphique ci-dessus illustre bien la grande variabilité de chimisme au niveau du transect B. En effet, il est difficile de faire ressortir une tendance générale de variation pour ce transect. Il semble donc plus difficile d'envisager une continuité de la nappe à ce niveau. Mais avant de conclure, il serait nécessaire de comparer les profondeurs de crépinage des différents piézomètres afin de s'assurer que les variations observées ne sont pas du à une différence de milieu dont provient l'eau (passage du matériau C1a1 à C1a2 par exemple).

Le diagramme de Stiff (Figure 18) permet de comparer les faciès des eaux d'après la forme de leur polygone mais également l'importance de la minéralisation d'après leur taille. Ce diagramme confirme la disparité de faciès des piézomètres B mais permet cependant de faire quelque rapprochement. En effet, il semble que BV15 (à l'amont) et BV5 bis (à l'aval) correspondent à un même type de minéralisation qui pourrait s'expliquer par le captage de l'eau plus en surface alors que BV14 et BV5 bis 2 représenterait la minéralisation de l'eau d'une couche plus profonde où l'on retrouverait une augmentation de la minéralisation vers l'aval. Si le crépinage est effectivement plus profond pour le piézomètre BV14 que pour

BV15, en revanche nous ne savons pas ce qu'il en est pour BV5 bis et BV5 bis 2. Il n'est donc pas possible de conclure avec certitude.

Comparaison des piézomètres du transect B

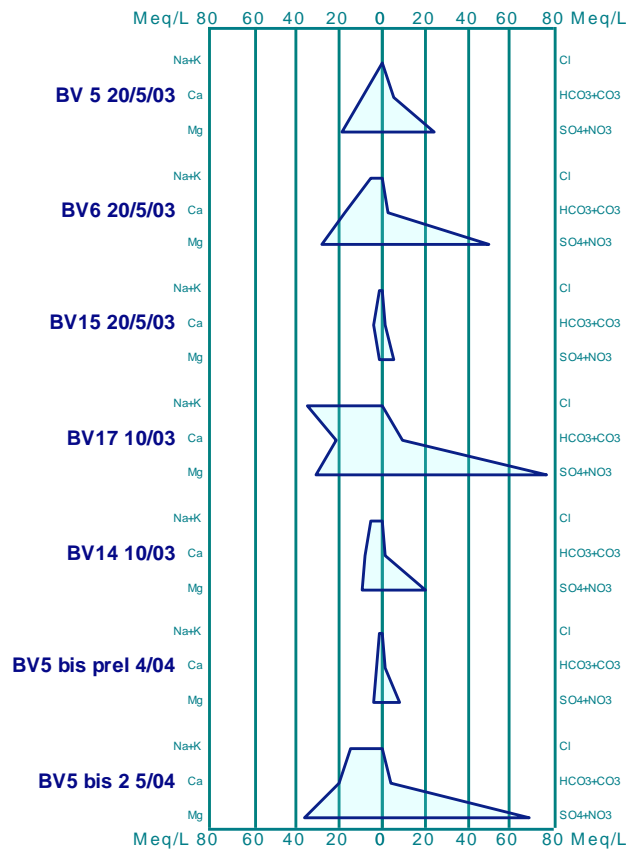


Figure 18 : Diagramme de Stiff des piézomètres du transect B

3.3.3. Synthèse des variations spatiales de la minéralisation au sein du glissement

Le diagramme de Piper, dont on utilise ici que l'analyse des cations, ne permet d'étudier que les évolutions de faciès des eaux. Cependant, au vu de tout ce qui a été dit précédemment, il constitue un bon schéma de synthèse de la minéralisation des eaux du glissement.

Variations des cations (toutes campagnes confondues)

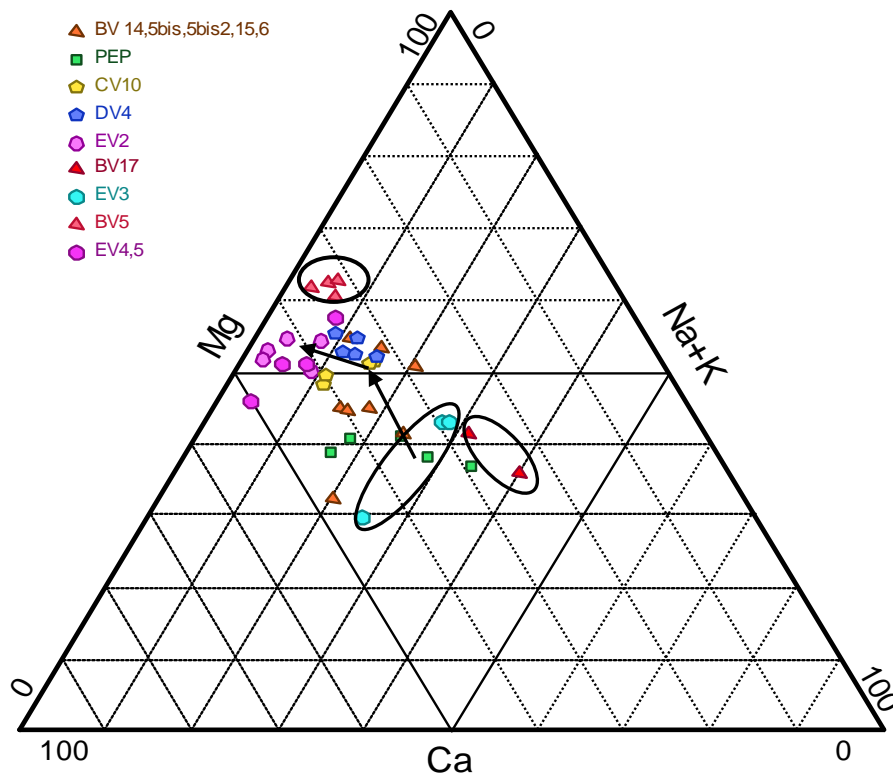


Figure 19 : Représentation des proportions des cations majoritaires par le diagramme de Piper

Tout d'abord, on observe une évolution globale d'un pôle sodique vers un pôle magnésien (60%) et calcique (40%). De manière plus détaillée, on constate que les résultats pour chaque piézomètre sont assez homogènes quelle que soit la campagne (les points sont relativement bien groupés). Seul PEP semble soumis à une plus grande variabilité. On voit également s'individualiser les transects sur lesquels ont été analysés plusieurs piézomètres (B et E). Sur le transect E (en rose), les eaux sont assez homogènes et présentent des teneurs importantes en magnésium (entre 50% et 60%) et calcium et faibles en sodium (entre 0% et 10%). Sur le transect B (représenté par des triangles oranges), les eaux ont des proportions en cations plus variables mais présentent globalement des teneurs plus faibles en calcium (entre 30% et 40%) et plus fortes en sodium (entre 10% et 30%) et se situent en général toutes entre les eaux de PEP et les eaux des transects C et D.

Ainsi, on voit se confirmer la logique de minéralisation amont-aval précédemment soulignée, avec une augmentation importante des proportions en magnésium (de 35% à presque 60%), mais également, de manière moins forte, en calcium (de 30% à 50%) ainsi qu'une diminution des proportions en sodium (de 30% à moins de 5%) depuis PEP jusqu'au transect E.

De cette tendance générale peuvent se dégager plusieurs points particuliers. Tout d'abord le piézomètre EV3 dont le faciès est plus proche de celui de PEP que de celui des autres

piézomètres de la section E, avec des proportions plus faibles en calcium et en magnésium et plus forte en sodium.

Dans les piézomètres B, deux points sortent également du lot :

- le piézomètre BV5, dont le faciès, très marqué par le magnésium, se distingue bien de celui de tous les autres piézomètres. D'un point de vue morphologique, ce piézomètre se situe sur un compartiment séparé du reste de la coulée par une paléo-échine. Or ce compartiment présente une grande stabilité par rapport aux autres compartiments, ce qui se traduit, sur le terrain, par une revégétalisation plus importante de cette partie. Il n'est donc pas anormal que le faciès ces eaux soit différent. Ainsi l'analyse des cations permet de confirmer le rôle de barrière hydraulique des paléo-échines.
- le piézomètre BV17 qui présente les plus faibles proportions en calcium (entre 20% et 30%) et les plus fortes proportions en sodium (entre 30% et 40%). Ce piézomètre appartient également à une zone particulière de la coulée puisqu'il se situe dans la zone la plus active du glissement. Les plus faibles proportions de calcium dans cette eau peuvent s'expliquer par la contrainte géochimique imposée par la précipitation de la calcite, alors que les fortes proportions de sodium peuvent peut-être s'expliquer par une plus forte altération des feldspaths sodiques entraînée par la présence d'ions H⁺ libérés par l'altération de la pyrite. Il est également possible que la diminution des proportions en calcium soit corrélée à l'augmentation en sodium et reflète des processus d'échange de bases plus importants à ce niveau.

On retrouve ainsi des résultats similaires à ceux mis en évidence par J.P. Malet lors de l'étude hydrodynamique, confirmant la présence d'unités de caractéristiques différentes au sein du glissement. De plus, il a été possible de dégager une logique de minéralisation d'amont en aval de la coulée, ce qui confirmerait la continuité de la nappe dans le sens des écoulements.

3.4. Les variations temporelles de la minéralisation

3.4.1. Variations inter-campagne

Les variations temporelles en chaque piézomètre doivent être étudiées en parallèle avec la piézométrie afin de replacer les variations du chimisme dans leur contexte hydrodynamique. Les graphiques de la Planche 4 et de la Planche 5 présentent les variations temporelles du chimisme des piézomètres PEP, CV10, DV4, EV2, BV5 et EV3.

On constate que dans la majeure partie des cas une remontée de la nappe suite à une augmentation de la pluviométrie entraîne une dilution des ions, alors qu'une diminution du niveau de la nappe entraîne une reconcentration des éléments. Les piézomètres EV2 et EV3 ne semblent pas suivre ce principe. En effet, en ces points, une baisse du niveau de la nappe s'accompagne d'une diminution des concentrations de tous les éléments. De même à une augmentation du niveau piézométrique correspond une augmentation des concentrations. En CV10, les faibles variations de concentration, en accord avec les variations quasi inexistantes de piézométrie, confirment que cette zone est peu influencée par les conditions climatiques alors qu'elle est nettement influencée par l'infiltration rapide (Malet, 2003). Bien que les variations piézométriques soient semblables en EV2 et DV4 traduisant une forte influence des pluies, les variations du chimisme sont très différentes : on observe une dilution légère en D et de fortes variations en E. L'évolution des concentrations en E semble indiquer un décalage entre la zone de recharge et la zone de mesure. Le secteur E correspondrait à une zone où l'eau s'infiltrerait peu et la recharge se ferait essentiellement au niveau de D. Il y aurait ensuite un écoulement de la zone D vers E. Ainsi les variations piézométriques semblables à celles de D traduiraient un transfert de pression alors que le transfert de masse serait plus tardif. L'augmentation des concentrations en E entre octobre et avril correspondrait alors à l'arrivée de l'eau de l'été précédent.

Ces résultats vont dans le sens des remarques faites précédemment au sujet de l'hydrodynamique bien que les différences de transmissivité soient un peu faibles pour expliquer entièrement le phénomène. Ainsi le piézomètre DV4 qui a une transmissivité plus élevée présente de faibles variations du chimisme et le piézomètre EV2 dont la transmissivité est plus faible présente de plus fortes variations.

Planche 4 : Variations temporelles du chimisme en CV10, DV4, EV2 et EV3

Planche 5 : Variations temporelles du chimisme en PEP et BV5

3.4.2. Variations journalières : analyse de l'eau du préleveur

Le préleveur automatique d'échantillons d'eau a été installé le 22 avril 2004 au piézomètre BV5. Il a été isolé avec de la laine de verre et recouvert d'une bâche afin de limiter au mieux les phénomènes de précipitation et de dégazage dans l'eau. Les échantillons sont restés en place au plus 19 jours. La forme similaire des courbes avec des variations identiques pour tous les éléments nous permettent de penser que ces phénomènes ont bien été minimisés.

Les éléments majeurs présentent tous les mêmes variations de concentration, notamment une forte diminution à partir du 28/04. Cette chute de concentration peut être interprétée comme la dilution par l'arrivée de l'eau d'infiltration. En outre, on constate que les variations de concentrations en nitrates évoluent à l'inverse de celles de tous les autres éléments. Or les nitrates sont des éléments transitoires, c'est à dire qui se dégradent rapidement, et constituent donc des marqueurs de l'infiltration. Leur augmentation à partir 29 avril confirme donc une infiltration rapide non négligeable. Dans le détail, on remarque que du 22/04 au 28/04, les concentrations des ions augmentent. C'est seulement après cette hausse que l'on peut observer l'effet de dilution. Cette augmentation générale, alors qu'on est en période de fonte de neige et donc d'apport d'eau, s'explique par un effet piston crée par l'eau d'infiltration. Ainsi, celle-ci, pour parvenir à la nappe aurait chassé de l'eau plus concentrée qui stagnait dans la zone non saturée. La période de dilution débute à l'arrivée de l'eau de fonte dans la nappe. Ce graphique présente donc le temps de transit de l'eau à travers la marne. Il serait intéressant de comparer ces variations avec celles de la piézométrie et des températures afin de préciser ce phénomène.

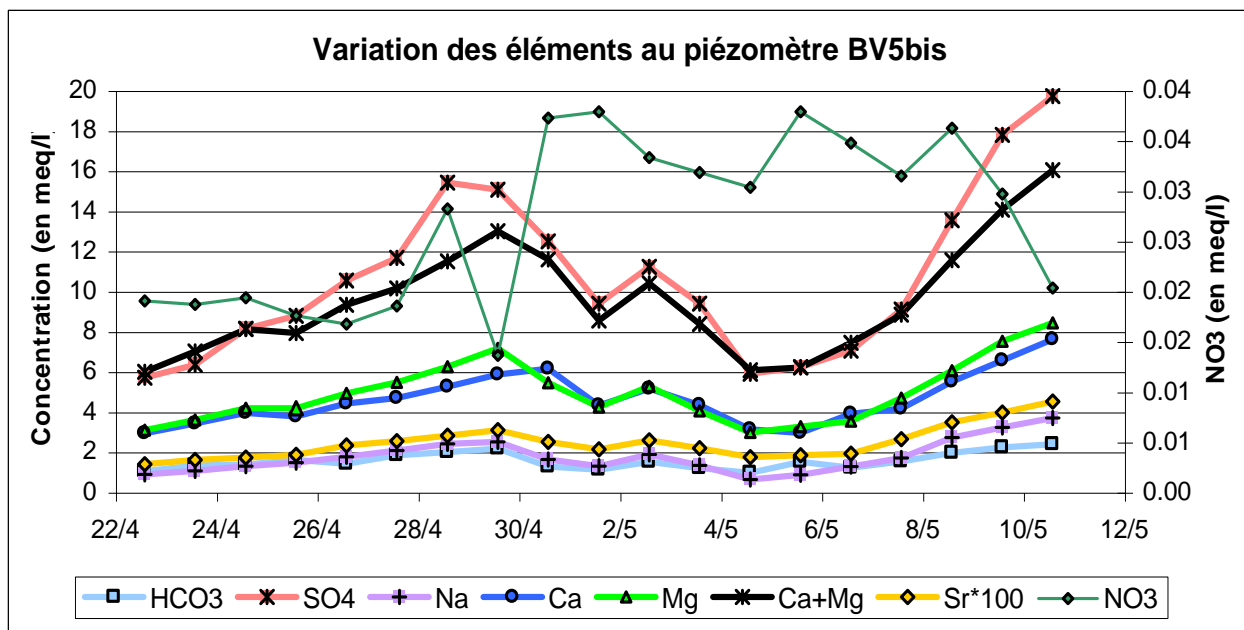


Figure 20: Variation journalière au point BV5 bis

IV. L'analyse géochimique

Le but de cette analyse est de voir si la minéralisation de l'eau peut s'expliquer par les minéraux reconnus dans les Terres Noires du glissement, de déterminer l'origine de l'eau d'alimentation du glissement et de comprendre les processus de minéralisation au sein du glissement-coulée, notamment l'augmentation d'amont en aval de Ca, Mg et SO₄ et la diminution de Na

4.1. L'apport de la modélisation géochimique

Nous avons cherché à confirmer que les minéraux constitutifs du glissement ne pouvaient pas être responsables de telles concentrations et notamment que le sulfate ne pouvait pas s'expliquer entièrement par la dissolution de la pyrite.

Pour cela, nous avons utilisé un modèle géochimique développé par Catherine Bertrand de l'Université de Besançon. Ce modèle fonctionne par itération : à chaque pas de calcul, le modèle vérifie l'état de saturation de l'eau vis à vis des différents minéraux qu'on lui a définis. Si les éléments sont sous-saturés, le modèle en dissout une petite quantité puis il vérifie à nouveau l'état de saturation des éléments et ce jusqu'à la saturation de l'eau. Nous n'avons utilisé que l'aspect thermodynamique du modèle. En effet, pour prendre en compte la cinétique, trop de paramètres nous étaient inconnus comme les surfaces de contact des minéraux ou les constantes de vitesse de réaction.

En général, pour des roches comme les grès, on se base sur la saturation de l'albite pour arrêter la simulation. En effet, c'est le silicate le moins soluble donc si on est à l'équilibre vis à vis de cet élément, on l'est forcément pour les autres minéraux. Dans le cas des marnes de Super-Sauze, la présence de pyrite qui est un minéral non silicaté permet d'aller un peu plus loin dans la simulation afin d'augmenter encore les concentrations en sulfate. Par contre, les autres concentrations ne peuvent plus augmenter puisque les autres minéraux sont contraints par l'albite.

La composition minéralogique que nous avons utilisée dans le modèle est la suivante :

Illite 30%, chlorite 8%, Montmorillonite 2%, Quartz 25%, Calcite 25%, Pyrite 2%, Dolomite 5% et Albite 3%.

Les tests ont porté sur deux variables : le type d'eaux en entrée du système et les proportions de certains éléments comme l'albite (fournissant le sodium), la pyrite (fournissant les sulfates) et la dolomie (fournissant le magnésium).

Dans un premier, nous avons cherché à obtenir des valeurs en sulfates comparables à celles obtenues au piézomètre PEP soit autour de 1000 mg/l. Une fois cette valeur obtenue, nous avons cherché à caler les valeurs en calcium, magnésium, sodium et bicarbonate pour ce même piézomètre. Enfin nous avons testé l'augmentation des concentrations des éléments pour voir si nous pouvions obtenir l'eau du piézomètre CV10 avec une valeur d'environ 2000 mg/l de sulfates ainsi que des eaux très chargées comme celles des piézomètres BV17 ou EV5 avec des concentrations en sulfates de l'ordre de 3000 mg/l.

Nous avons commencé par tester les eaux de la source de Goutta qui se situe dans les moraines. En effet, le glissement de Super-Sauze est surplombé par un plateau morainique et des alimentations en eau au contact entre la moraine et les marnes ont été mises en évidence dans l'escarpement principal. Cette eau constituait donc l'hypothèse la plus vraisemblable. Puis nous avons testé l'eau d'une source captée dans des marnes, situées sur le versant opposé, supposée être représentative d'une eau ayant circulé dans des marnes peu altérées.

Nous voulions par ceci représenter l'influence du passage de l'eau à travers l'escarpement principal marneux. Enfin, nous avons testé directement l'eau recueillie dans le ruisseau qui se forme au pied de l'escarpement principal.

Les caractéristiques de ces eaux testées en entrée sont synthétisées dans le tableau ci dessous ainsi que les valeurs de concentrations prises pour les piézomètres.

Nom	pH	SO ₄ en mg/l	Ca en mg/l	Mg en mg/l	Na en mg/l	HCO ₃ en mg/l
Goutta	7.34	20.4	34.8	10.1	1.8	121.7
Source captée	8.15	109.9	74.3	29.27	3.3	195.2
Ru tête de BV 07/03	7.8	551	110	89.6	144.9	322.7
PEP 07/03	7.21	1000	160	123	205	400
CV10 07/03	7.32	2000	290	271	142	365
BV17 07/03	7.08	2600	345	314	429	545

Tableau 4 : Caractéristiques des eaux testées par le modèle et prises pour comparaison

Les tests successivement réalisés sont présentés dans le tableau 5 de la page suivante.

La seule dissolution des minéraux de la coulée ne semble pas pouvoir expliquer la chimie des eaux et surtout l'augmentation de la minéralisation vers l'aval. Ainsi, si l'on arrive à retrouver les teneurs en sulfates, il semble par contre manquer quelque chose pour expliquer le magnésium et le sodium. En effet, pour le magnésium, la dolomite étant à saturation très rapidement, il ne semble pas possible de faire augmenter les concentrations sans faire intervenir un sulfate de magnésium.

4.2. Hypothèses sur l'acquisition de la minéralisation dans le glissement de Super-sauze

Ces résultats concordent avec ceux de l'hydrochimie : la présence d'évaporites semble incontestable. Les reconnaissances minéralogiques n'en ayant jamais trouvé dans le glissement, on peut supposer que ces évaporites se situent hors du glissement. Or les informations géologiques sur cette zone indiquent la présence d'une couche de gypse et carneule à la base du Chapeau de Gendarme, reposant en contact anormal sur les marnes. De plus, les photos aériennes soulignent la présence de failles en amont de la zone de décrochement du glissement. Il semble donc cohérent de faire intervenir ces évaporites dans la minéralisation des eaux du glissement. Dans ce cas, il reste à préciser les relations entre des eaux fortement minéralisées à la base du Chapeau de Gendarme et les eaux du glissement. Au sein du glissement, il est possible que les circulations passent par les discontinuités notamment entre les couches 1 et 2, mais pour faire parvenir l'eau des sommets jusqu'au glissement, il est difficile de concevoir un modèle d'alimentation sans faire intervenir des arrivées d'eau par le « corps mort ».

	Type d'eau	Minéraux primaires modifiés	Minéraux secondaires (pouvant précipiter)	Valeurs obtenues à la saturation de l'albite	Et si on pousse plus loin...	Commentaire
Test 1	Source Goutta	aucun	non	pH=7.65 SO4=33mg/l Mg=20mg/l	pH=2 SO4=678mg/l	Dissolution des minéraux jusqu'à pH=7.6 puis acidification
Test 2		aucun	kaolinite, sidérite (FeCO3), aragonite, silice amorphe			Impossible d'expliquer la minéralisation en partant de cette eau
Test 3	Source captée dans des marnes	aucun	non	<i>Incrément :595</i> pH=7.7 SO4=105mg/l	<i>Incrément :2950</i> pH=2 SO4=700mg/l	
Test 4		aucun	calcite, kaolinite, sidérite	<i>Incrément :850</i> pH=7.9 SO4=123mg/l	<i>Incrément :1250</i> PH=7.5 SO4=1106mg/l Na=7.9mg/l/l	
Test 5		pyrite=5% albite=5% quartz=20%	calcite, kaolinite, sidérite	<i>Incrément :900</i> pH=7.9 SO4=155mg/l	<i>Incrément :1250</i> pH=7.5 SO4=1068mg/l Na=9.5mg/l/l Mg=158mg/l	L'albite est la seule source de sodium et se sature trop vite. La dolomite est à saturation : on ne peut plus augmenter le magnésium
Test 6	Ru tête de BV	aucun	non	Impossible : sursaturation en calcite, dolomite et quartz dès le début !		
Test 6		aucun	Quartz, calcite, sidérite	<i>Incrément :850</i> pH=7.16 SO4=676mg/l Na=144mg/l/l Mg=108mg/l Ca=179mg/l	<i>Incrément :900</i> pH=7.06 SO4=1000mg/l Na=145mg/l/l Mg=108mg/l Ca=292mg/l	Pas assez de magnésium ni de sodium.
Test 7		pyrite=5% albite=5% quartz=20%	Quartz, calcite, sidérite	<i>Incrément :350</i> pH=7.00 SO4=551mg/l Na=144mg/l/l Mg=88mg/l Ca=119mg/l	<i>Incrément :950</i> pH=7.01 SO4=1200mg/l Na=145mg/l/l Mg=109mg/l Ca=382mg/l	toujours pas assez de magnésium ni de sodium et trop de calcium : pour 2000mg/l en SO4, Ca=645mg/l
Test 8		pyrite=5% albite=5% quartz=10% dolomie=15%	Quartz, calcite, sidérite	<i>Incrément :850</i> pH=7.00 SO4=573mg/l Na=144mg/l/l Mg=110mg/l Ca=146mg/l	<i>Incrément :950</i> pH=7.01 SO4=1281mg/l Na=145mg/l/l Mg=110mg/l Ca=393mg/l	Faible augmentation pour le magnésium (début à 88mg/l) et dolomite saturée à 100mg/l..Le sodium n'augmente pas.
Test 9		kisiérite=2% quartz=23%	Quartz, calcite, sidérite	<i>Incrément :850</i> pH=7.17 SO4=711mg/l Na=144mg/l/l Mg=122mg/l Ca=174mg/l	<i>Incrément :950</i> pH=6.99 SO4=1800mg/l Na=145mg/l/l Mg=220mg/l Ca=460mg/l	<i>Incrément :1000</i> pH=6.90 SO4=3000mg/l Na=145mg/l/l Mg=322mg/l Ca=782mg/l

Tableau 5 : Synthèse des tests effectués

Le schéma suivant présente une hypothèse d'alimentation du glissement.

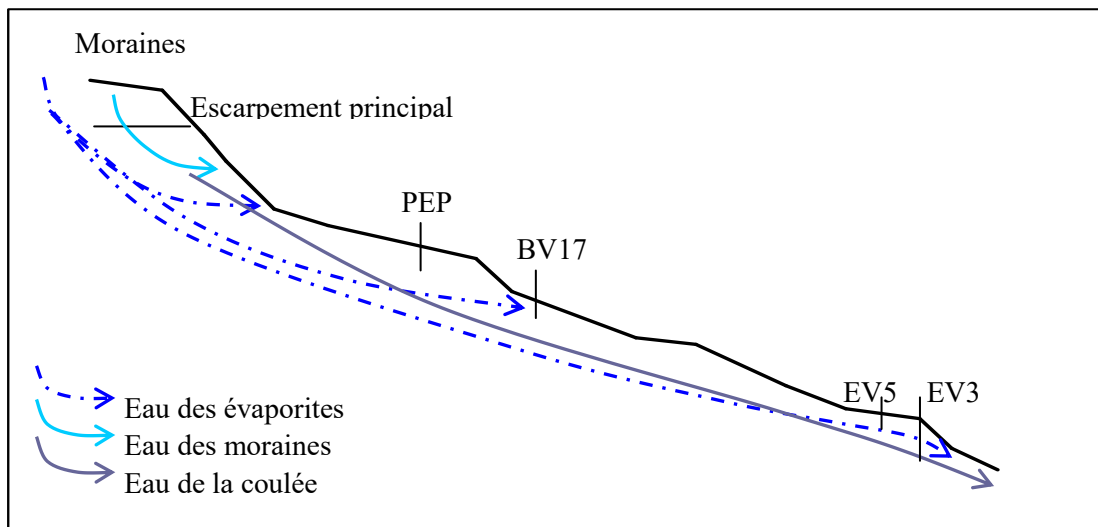


Figure 21 : Schéma d'hypothèse d'alimentation en eau du glissement

Mais cette hypothèse n'explique pas clairement l'augmentation des concentrations d'amont en aval. Une autre explication consisterait à ne plus penser en terme d'augmentation des concentrations mais en terme de diminution de la dilution d'amont en aval. En effet, on sait qu'il existe un aquifère peu minéralisé dans les moraines et seule la zone amont est directement en liaison avec celles-ci. De plus, toutes les mesures faites dans la partie Est de la zone de décrochement ont donné des conductivités faibles. Il y aurait donc une influence forte de l'eau des moraines à l'amont de la coulée qui diminuerait vers l'aval. Cette hypothèse est schématisée par la figure suivante.

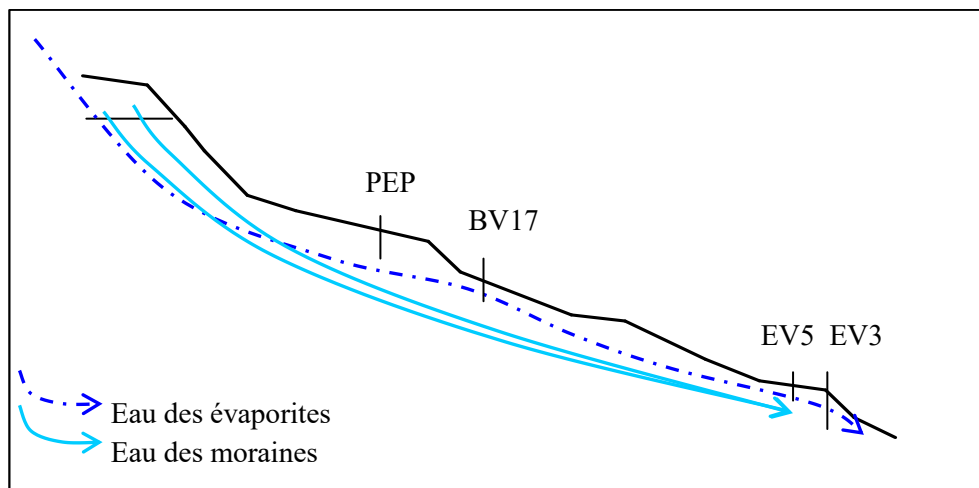


Figure 22: Schéma d'hypothèse d'évolution des concentrations au sein du glissement

Au niveau de la zone active du glissement, les fortes minéralisations peuvent s'expliquer par une augmentation des surfaces de contacts entraînant une dissolution plus importante de pyrite. Mais on peut également supposer que ces valeurs mettent en évidence une alimentation importante par l'eau des évaporites, ce qui provoquerait l'activité intense du glissement dans cette zone.

Conclusion

L'étude du chimisme de l'eau et de ses variations en fonction de la pluviométrie a permis de confirmer la présence de discontinuités transversales au sein du glissement et l'existence de trois unités hydrodynamiques différenciées. Mais elle a permis également de montrer que les matériaux du glissement-coulée ne peuvent pas être seuls responsables d'une telle minéralisation : l'influence d'évaporites semble incontestable. Ce qui suppose par ce fait, des relations hydrogéologiques entre le glissement-coulée et le contact anormal entre la klippe de la nappe du Parpaillon et les marnes.

On a pu montrer que de manière générale, la nappe est compartimentée transversalement par les paléo-échines ou les ravines. Par contre, elle est continue longitudinalement et présente une évolution générale des concentrations d'amont vers l'aval avec une augmentation pour le calcium, le magnésium et les sulfates et une diminution pour le sodium. Les évolutions systématiquement opposées du calcium et du sodium laissent penser que la coulée est le lieu d'échange de bases important.

Dans le détail, la coulée apparaît comme un milieu très complexe et hétérogène avec des zones plus imperméables notamment au point EV3. L'hydrochimie permet également de distinguer les zones actives de la coulée par leur enrichissement en sulfates et en sodium comme l'a montré l'étude du point BV17.

Le fonctionnement de la coulée présente différentes échelles à la fois au niveau spatial et temporel :

- Spatialement, on distingue, à l'amont, des arrivées d'eaux issues des évaporites (à travers la marne en place ou par le contact tectonique) et des moraines auxquelles se surimpose une recharge par la zone d'infiltration c'est à dire la surface de la coulée (infiltration matricielle et fissurale).
- Temporellement, on observe sur le long terme, une évolution amont-aval avec au départ des fortes concentrations dues à l'influence évaporitique. A cela s'ajoute une évolution au sein de la coulée, due à des processus divers (mélange avec de l'eau des moraines, échanges de base, dissolution de pyrite, dissolution-précipitation des carbonates...). A l'échelle événementielle ou saisonnière, l'infiltration provoque des effets de dilution de l'eau de base.

Enfin, un doute persiste quant à l'absence de sels de sulfate dispersés dans la marne. Des lixiviations lèveraient une partie des doutes à ce sujet. De plus, une prospection plus détaillée de la zone de contact entre les marnes et le gypse à cargneules permettrait de mieux préciser les interactions avec la coulée.

Bibliographie

Antoine P., Giraud A., Meunier M., Van Asch T.W.J., 1995 : *Geological and geotechnical properties of the 'Terres Noires' in the southeastern France : weathering, erosion, solid transport and instability.* Engineering Geology, 40, pp 57-62

Appelo C.A.J., Postma D., 1996 : *Géochimie, groundwater and pollution.* A.A Balkema, Rotterdam, 536 p

Banton.O, Bangoy L.M., 1997 : *Hydrogéologie. Multiscience environnementale des eaux souterraines.* Presses de l'université du Québec, Sainte-Foy, 460 p

B.R.G.M. (Bureau de recherches Géologiques et Minières), 1974 : *Notice et carte géologique de Barcelonnette, XXXV-39.* Orléans

Flageollet J.C., J.P. Malet, and O. Maquaire, 1999 : *The 3D structure of the Super-Sauze Earthflow : a first stage towards modelling its behaviour.* Physics and Chemistry of the Earth, 25(9), pp 785-791

Le Mignon G., 2004 : *Analyse de scénarios de mouvements de versants de type glissements-coulées. Application à la région de Barcelonnette (Alpes de Haute Provence, France).* Thèse de Doctorat en Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 158 p

Malet J.P., 2003 : *Les 'glissements de type écoulement' dans les marnes noires des Alpes du Sud. Morphologie, fonctionnement et modélisation hydro-mécanique.* Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 364 p

Malet J.P., Maquaire O., Van Asch T.W.J., 2003. *Invited lecture : Hydrological behaviour of earthflows developed in clay-shales. Investigation, concept and modelling.* Invited lecture at the International Workshop on 'The Occurrence and Mechanisms of Flows in Natural Slopes and Earthfills', Sorrento, Italy, Patron Editor, Bologna. [Http://www.unina2.it/flows2003/flows203/articoli/articoli.htm](http://www.unina2.it/flows2003/flows203/articoli/articoli.htm)

Maquaire O., 2002 : *Aléas géomorphologiques (mouvements de terrain). Processus, Fonctionnement, Cartographie.* Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 219 p

Maquaire O., Flageollet J.C., Malet J.P., Schmutz M., Weber D., Klotz S., Albouy Y., Descloîtres M., Dietrich M., Guérin R., et Schott J.J., 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, 95/96 : pp. 15-32

Maquaire O., Malet J.P., Remaître A., Locat J., Klotz S., Guillon J., 2003 : *Instability conditions of marly hillslopes : towards landsliding or gullyng? The case of the Barcelonnette Bassin, South East France.* Engineering Geology, 70(1-2) : pp. 109-130

Meybeck M., 1984 : *Les fleuves et le cycle géochimique des éléments.* Thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, pp. 26-52

Phan T.S.H., 1993 : *Propriétés physiques et caractéristiques géotechniques des Terres Noires du Sud-est de la France*. Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 246 p

Richy P., 1992 : *Contribution à l'étude des mécanismes et bilans de l'érosion chimique des « terres noires » du bassin de la Durance*. Mémoire de DEA, Géosciences de l'environnement, Université d'Aix-Marseille III, Paris VI, Paris VII, Perpignan et Toulouse III, 41 p

Schmutz M., 2000 : *Apport des méthodes géophysiques à la connaissance des glissements-coulées développés dans les marnes noires. Application à Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg, pp 115-137

Tullen P., 2002 : *Méthodes d'analyse du fonctionnement hydrogéologique des versants instables*. Thèse de l'Ecole Polytechnique de Lausanne (département Génie Civil), 192 p

Weber D., 2001 : *Contribution de la géomorphologie à la connaissance des mouvements de terrains dans les « Terres Noires » alpines : le glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France)*. Thèse de doctorat, Université de Strasbourg, pp. 201-214

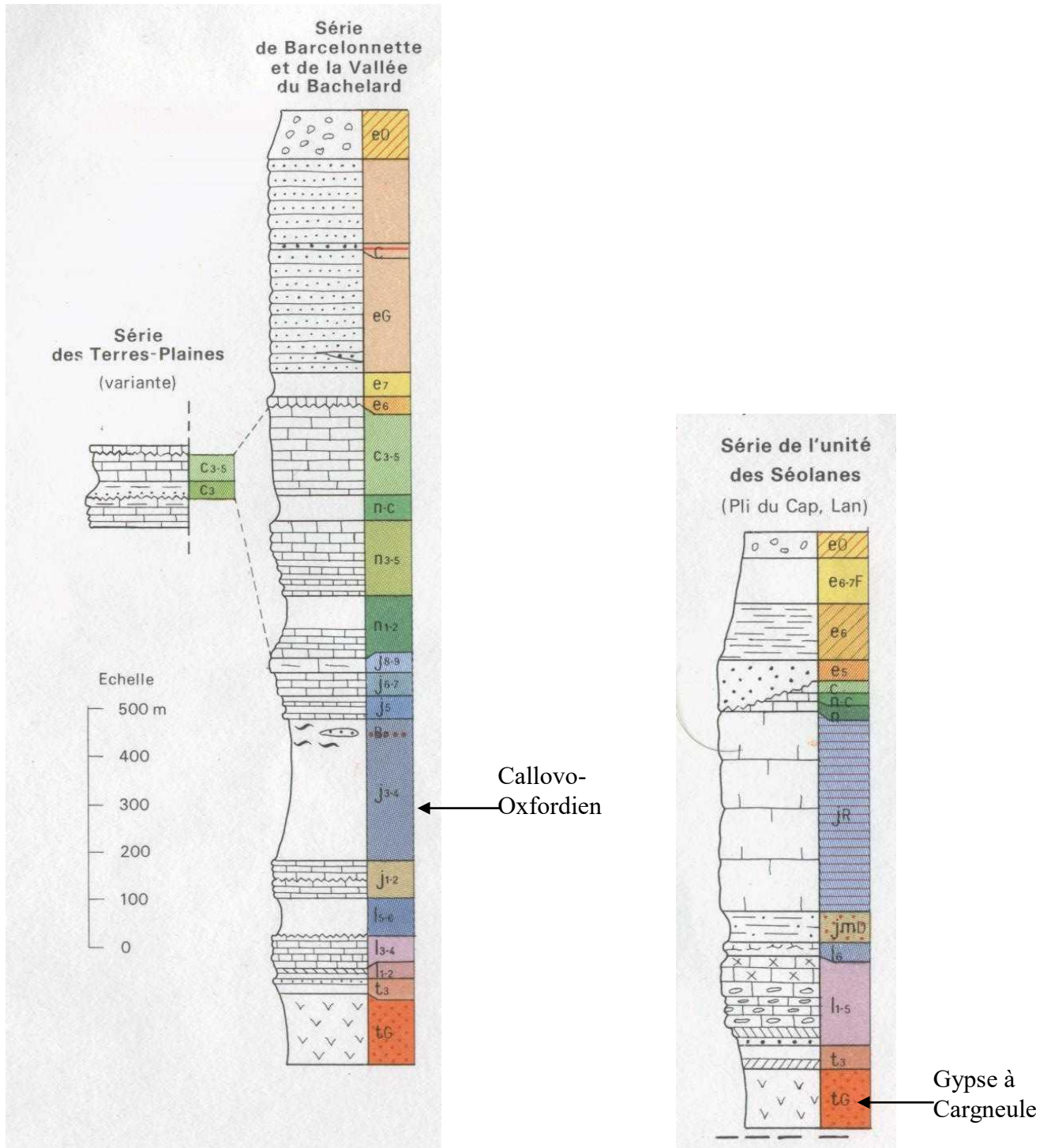
ANNEXES

Table des Annexes

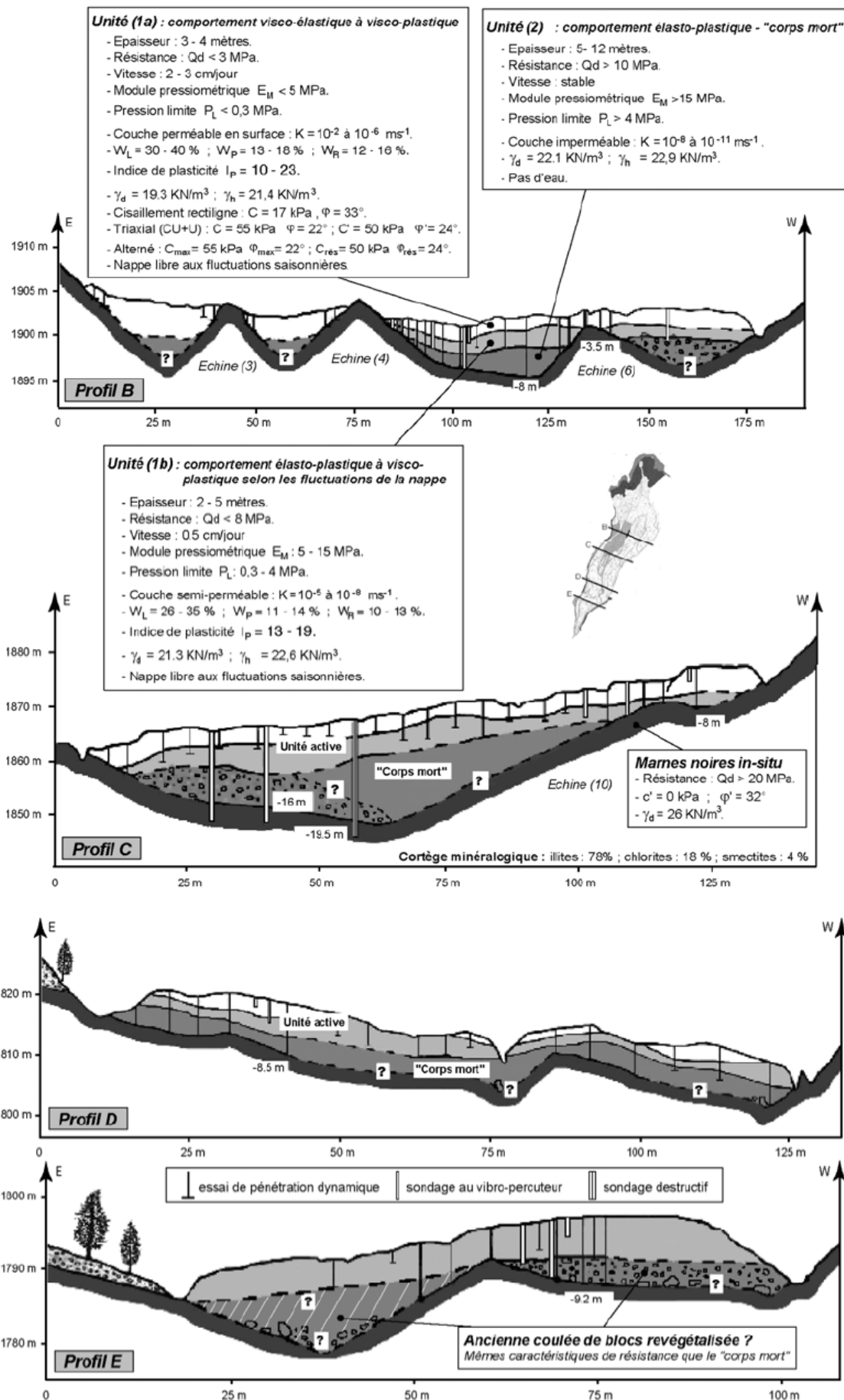
Annexe 1 : Colonne lithostratigraphique des terrains rencontrés au niveau du glissement-coulée de Super-Sauze	51
Annexe 2 : Structure interne de la zone d'accumulation de la coulée (Malet, 2003).....	53
Annexe 3 : Unités hydro-géomorphologiques du glissement-coulée et fluctuations piézométriques caractéristiques de chaque unité (période de trois mois en situation de drainage estival) (Malet, 2003)	53
Annexe 4 : Mesure de la transmissivité en BV5bis, EV4 et EV2b	54
Annexe 5 : Résultats des analyses chimiques	55
Annexe 6 : Variations des éléments le long d'une ligne de courant supposée.....	57
Annexe 7 : Variations du rapport $[Sr^{2+}]/[Ca^{2+}]$ par campagne	59

Annexe 1 : Colonne lithostratigraphique des terrains rencontrés au niveau du glissement-coulée de Super-Sauze

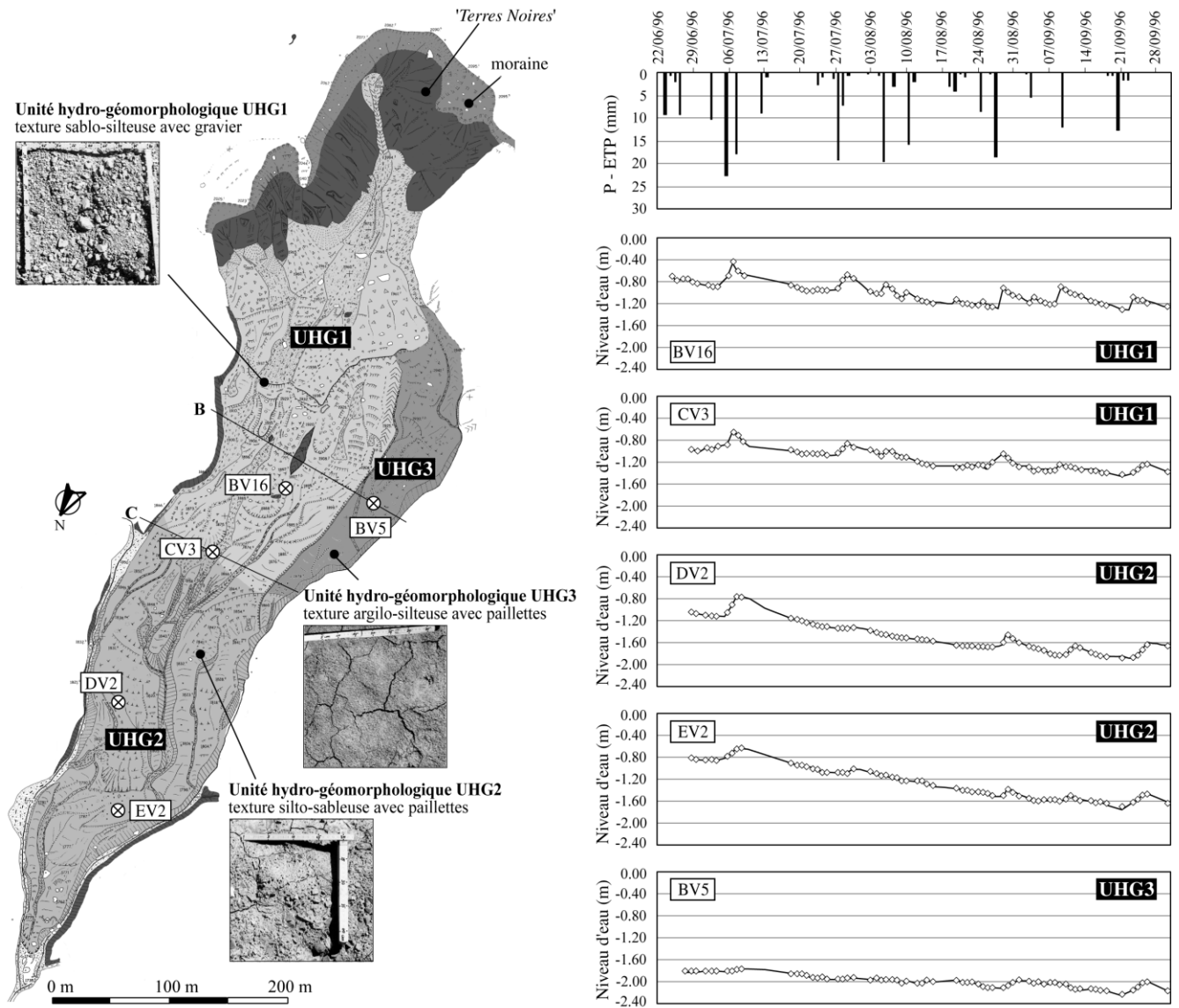
(Carte géologique de Barcelonnette au 1/50 000)



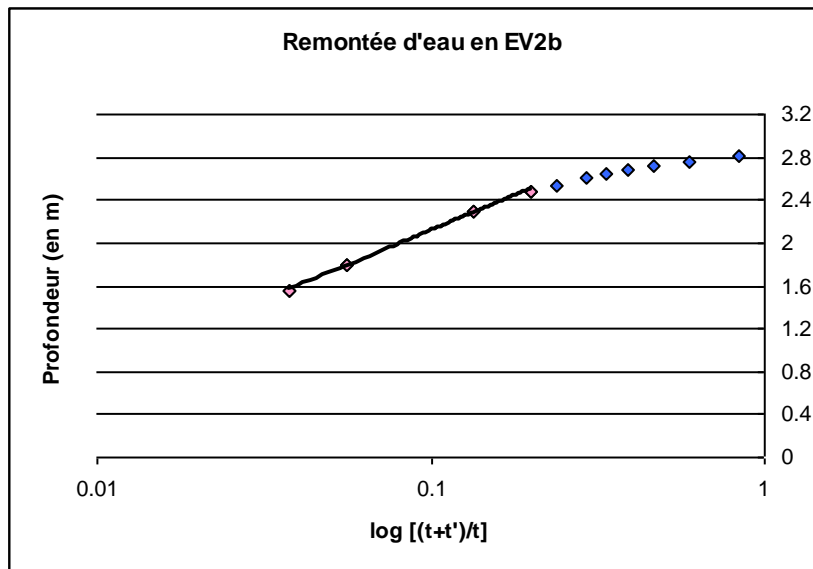
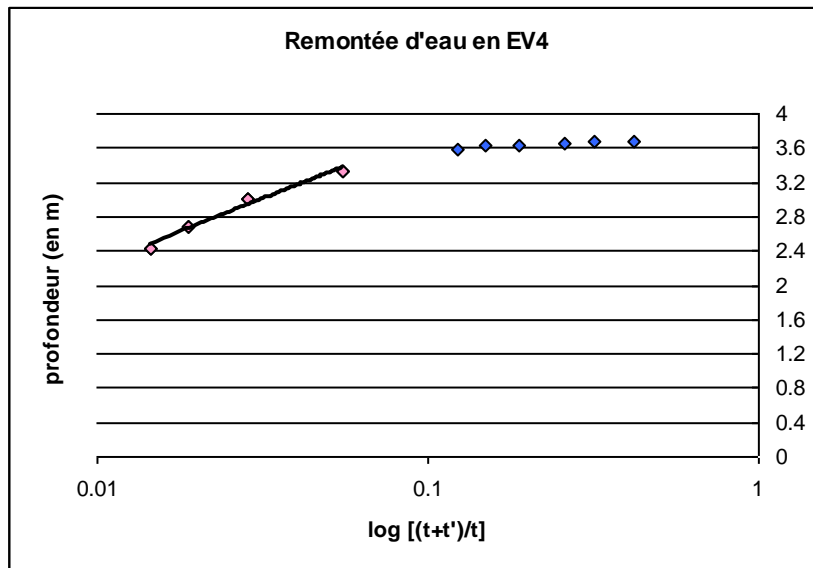
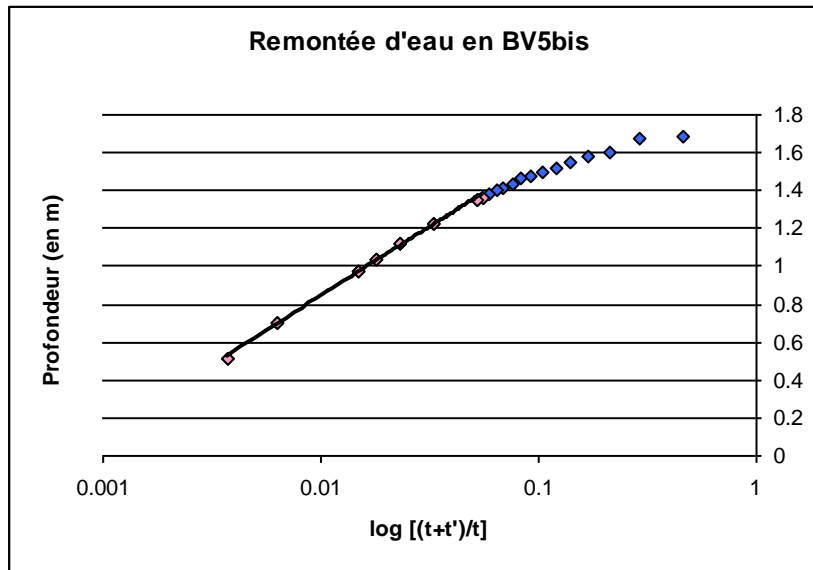
Annexe 2 : Structure interne de la zone d'accumulation de la coulée (Malet, 2003)



Annexe 3 : Unités hydro-géomorphologiques du glissement-coulée et fluctuations piézométriques caractéristiques de chaque unité (période de trois mois en situation de drainage estival) (Malet, 2003)

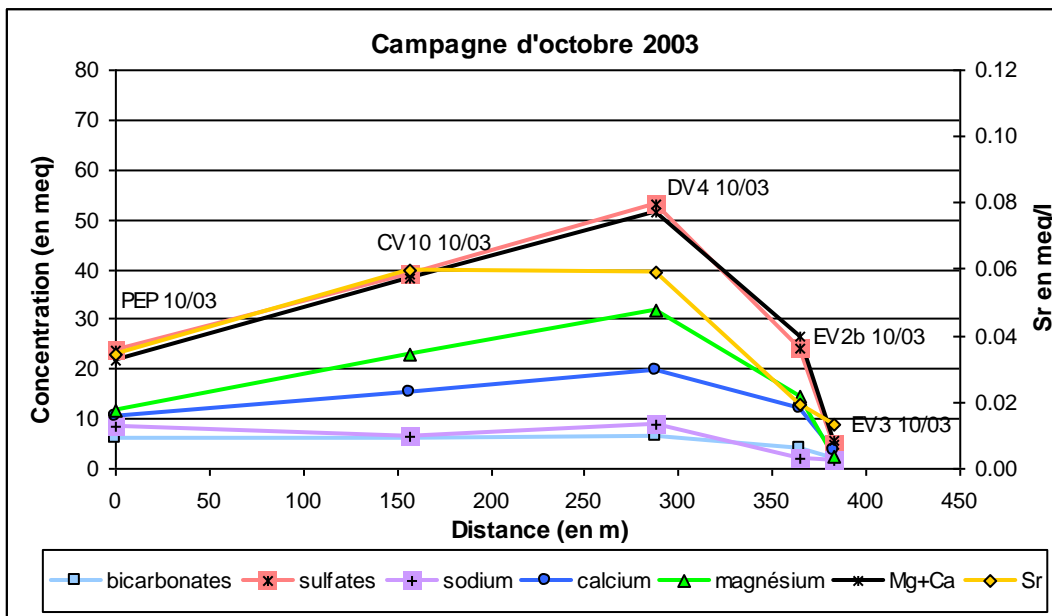
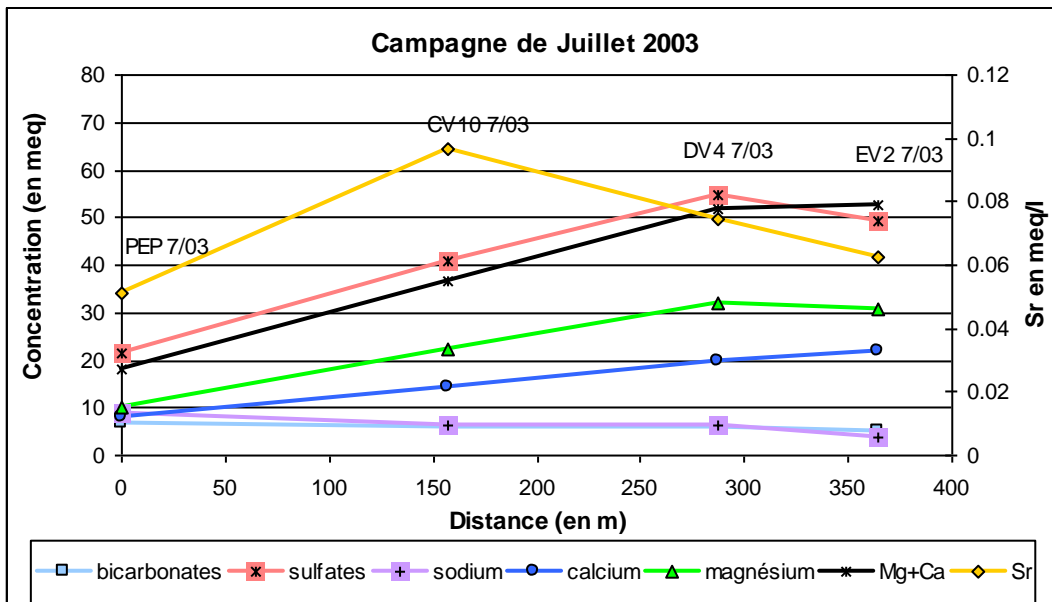
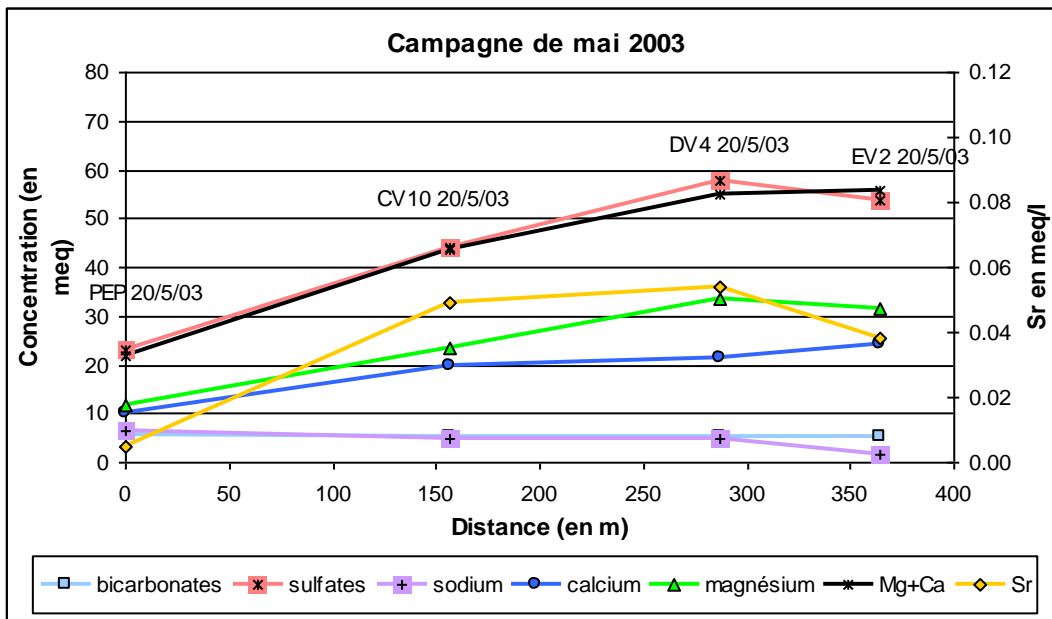


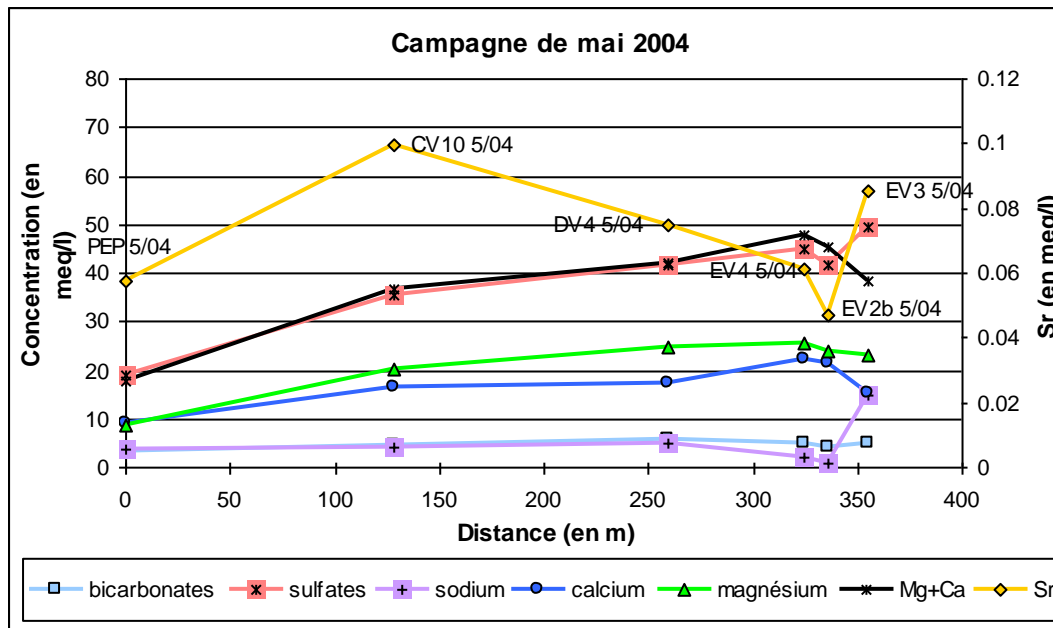
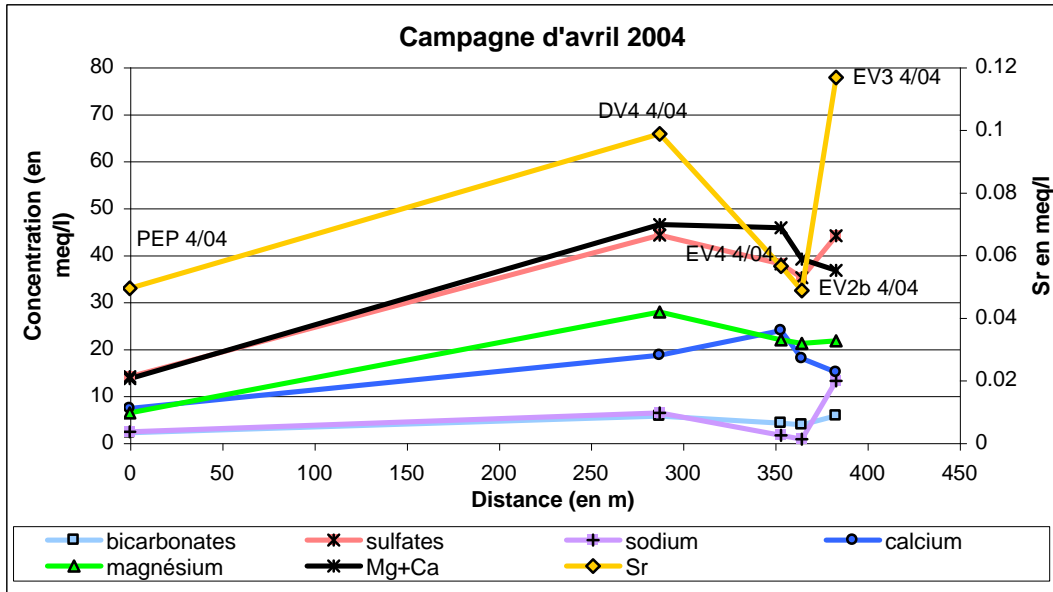
Annexe 4 : Mesure de la transmissivité en BV5bis, EV4 et EV2b



Annexe 5 : Résultats des analyses chimiques

Annexe 6 : Variations des éléments le long d'une ligne de courant supposée





Annexe 7 : Variations du rapport $[Sr^{2+}]/[Ca^{2+}]$ par campagne

