

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE DOCTORAT EN RESSOURCES MINÉRALES

PAR

ABDELMOUNEM BENLAHCEN

ÉTUDE DES PROCESSUS CHIMIO-HYDRO-MÉCANIQUES DANS UN MASSIF
ROCHEUX FRACTURÉ PERTURBÉ PAR UNE EXPLOITATION MINIÈRE:
EXEMPLE DE LA MINE BOUCHARD-HÉBERT EN ABITIBI (QUÉBEC), CANADA

AOÛT 2003



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

Cette étude sur les processus chimiques, hydrauliques et mécaniques, et leur couplage, a été réalisée à la mine Bouchard-Hébert localisée dans le district minier de l'Abitibi au Québec, Canada. Dans cet environnement minier, les eaux acides migrant des anciennes excavations vers les nouvelles en combinaison avec la perturbation des contraintes géomécaniques causées par les excavations affectent la perméabilité du massif rocheux. Des travaux de terrain et des expériences au laboratoire ont été menés pour étudier ces processus, en particulier dans la partie du massif rocheux situé entre les anciennes et les nouvelles excavations de la mine (galerie du niveau 6A).

Les résultats de cartographie de fractures montrent que dans la partie ouest de la galerie au niveau 6A (de 10600E à 10900E), le massif rocheux est traversé par deux principales familles de fractures : une famille de fractures est subhorizontale (pendage entre 0° et 30°) avec une longueur de trace entre 1 et 1,5 m, et une autre famille de fractures est subverticale (pendage entre 75° et 90°). La famille de fractures subverticale est subdivisée en deux groupes selon la longueur de trace : un groupe a entre 0,5 et 2 m de longueur de trace et un autre entre 3 et 3,5 m. La densité de ces deux familles de fractures varie de 1 à 6 m⁻¹ et leurs veines ont une épaisseur d'environ 2 mm. Du côté est du niveau 6A (de 10900E à 11200E), le massif rocheux contient les deux familles de fractures rencontrées à l'ouest en plus d'une famille de fractures à pendage modéré (entre 15° et 45°) vers le nord-est. Cette famille de fractures est de plus faible effectif, d'une longueur de trace très variable, entre 0,5 et 2,5 m, et d'une épaisseur de veine d'environ 2 mm. La densité de l'ensemble des fractures est d'environ 1 à 4 m⁻¹. Bien que dans la partie est de la galerie 6A, le massif rocheux soit traversé par les trois familles de fractures, il semble moins perméable que celui situé à l'ouest étant donné sa plus faible densité de fractures. La circulation des eaux serait donc plus intense dans le massif rocheux de la partie ouest de la galerie 6A de la mine.

Les résultats des essais hydrauliques en forage dans le massif rocheux immédiatement sous la galerie 6A et sur une profondeur de 48 m ont montré que dans la partie est de cette galerie, la conductivité du massif rocheux fracturé est relativement faible et à peu près constante, variant entre 1 x10⁻¹⁰ et 1 x10⁻¹¹ ms⁻¹. Alors que dans la partie centrale de cette galerie, située en dessous des anciennes excavations, la conductivité hydraulique du massif rocheux est plus élevée et elle augmente avec la profondeur de 1 x10⁻¹¹ à 1 x10⁻⁶ ms⁻¹, en concordance avec la densité de fractures plus élevée observée dans cette partie de la galerie.

Du point de vue hydrogéochimique, les résultats montrent que les eaux échantillonnées dans les trous de forage à la mine ont un pH presque neutre et des concentrations élevées en Ca, SO₄ et en métaux. L'ion Ca proviendrait de la dissolution de la calcite, abondamment présente dans les fractures. L'ion SO₄ et les métaux proviendraient de l'oxydation des minéraux sulfurés qui font partie des minéraux de

remplissage dans les fractures mais aussi de la matrice rocheuse. Les eaux derrière les barricades aménagées sous les anciennes excavations et celles du bassin de sédimentation en surface sont acides, montrant des valeurs très faibles de pH, de 2 et de 2,5 respectivement, et des concentrations très élevées en ions, en particulier de SO_4 et des métaux (Fe, Zn, Cu et Mn). L'acidité des eaux provenant de l'ancienne mine reste très notable dans le bassin de sédimentation malgré leur dilution avec les eaux à pH plus neutre, provenant des autres parties de la mine.

Les résultats des essais au laboratoire sur les échantillons de fractures, provenant de la mine, montrent qu'une variation relativement faible de la composition chimique de l'eau et de son pH cause des réactions géochimiques différentes à l'intérieur des plans des fractures et des effets considérablement différents sur leur transmissivité. En effet, une eau à pH 2 et à concentration élevée en sulfate tend à faire augmenter la transmissivité des fractures d'une façon rapide, après quelques heures ou quelques jours, et indépendamment du rapport de la pression d'injection sur la pression de confinement (P_i/P_c). Cette forte augmentation de la transmissivité est due à un taux relativement élevé de dissolution de la calcite, principal minéral de remplissage. La chenalisation est le phénomène important qui se produit sous ces conditions. Pour des eaux avec une teneur moins élevée en sulfate et à pH 2,5, il y a une diminution de la transmissivité des fractures. Le taux plus faible de dissolution de la calcite dans ce cas serait principalement dû à l'importante précipitation d'hydroxydes de fer dans les fractures. La transmissivité de la fracture dans ce cas est fonction du rapport P_i/P_c . Les eaux à pH 4 et à pH 7 ont sur la transmissivité des fractures un effet similaire à celui de l'eau à pH 2,5, mais avec peu de dépôt d'hydroxydes, en particulier dans le cas de l'eau à pH 4. La dissolution de la calcite serait plutôt limitée aux points de contact entre les parois de fractures, permettant la réduction de leurs aspérités et, par conséquent, une diminution de la transmissivité.

Sur le terrain, toutes les conditions favorables à ces types de réaction géochimique sont réunies. Certaines évidences de la présence de ces types de réaction peuvent déjà être déduites. En effet, les eaux échantillonnées à la mine, riches en Ca, SO_4 et en métaux, témoignent de la présence de réactions de dissolution et d'oxydation des minéraux. De plus, la présence d'hydroxydes de fer a été constatée dans des fractures à plusieurs endroits de la galerie 6A. Comme les résultats des travaux expérimentaux l'ont montré, une eau à pH neutre dans le contexte de la mine n'implique pas nécessairement des conditions géochimiques et hydrauliques stables; au contraire, ceci peut être le résultat d'importantes réactions géochimiques entre les minéraux de remplissage dans les fractures et l'eau, lorsque celle-ci est acide comme c'est le cas sous les anciennes excavations à la mine. Les travaux de terrain et les essais au laboratoire montrent donc tous les deux que les processus chimiques de dissolution, d'oxydation et de précipitation sont très actifs et agissent à différentes échelles de temps. Le couplage entre ces processus chimiques et les processus hydrauliques se produit également aussi bien à l'échelle du massif rocheux qu'à l'échelle d'une fracture.

ABSTRACT

This study on the chemical, hydraulic and mechanical processes and their coupling, was conducted at the Bouchard-Hébert Mine, located in the Abitibi Mining District in Québec, Canada. In this mine environment, the acidic water migrating from the old mine workings to the new ones, in combination with the perturbed geomechanical stress field caused by the excavations, affect the rock mass permeability. Both field work and laboratory experiments were conducted in order to investigate these processes, particularly in the rock mass portion located between the two mine workings (drift at level 6A).

Results of discontinuity mapping show that at the western part of the drift at level 6A (from 10600E to 10900E), the rock mass contains two sets of fractures: one set is subhorizontal (dip between 0° and 30°) with a trace length between 1 and 1.5 m, and the other set is subvertical (dip between 75° and 90°). This subvertical set is divided into two groups depending on their trace length: one group includes fractures with a trace length between 0.5 and 2 m, and the second group comprises fractures with a trace length between 3 and 3.5 m. The fracture density of these two sets of fractures varies from 1 to 6 m^{-1} and their veins are 2 mm in width. At the eastern part of the drift at level 6A (from 10900E to 11200E), the rock mass contains the same two sets of fractures observed at the western part, plus a set of fractures with a moderate dip (between 15° and 45°) with NE trend. This later set of fractures is less frequent and has a variable trace length between 0.5 and 2.5 m; their veins have a width of 2 mm. The fracture density of all the fracture set is between 1 and 4 m^{-1} . Although the rock mass at the eastern part of the drift at the level 6A contains three sets of fractures, it is less permeable than the one located at the western part considering its lower fracture density. Consequently, groundwater flow would be more intense in the rock mass at the western part of the drift at the level 6A of the mine.

The results of hydraulic testing in boreholes in the rock mass located immediately under the drift 6A and over a length of 48 m, have shown that in the eastern part of this excavation, the hydraulic conductivity of the rock mass is low and constant, between 1×10^{-10} and $1 \times 10^{-11} \text{ ms}^{-1}$. In the central part of this drift, located just under the old excavations, the rock mass hydraulic conductivity is higher and increases with depth from 1×10^{-11} and $1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$, which is in accordance with the higher fracture density in this part of the drift.

Hydrogeochemical results show that waters sampled from boreholes at the mine are of neutral pH and contain high concentrations in ions, such as Ca, SO_4 and metals. Calcium originates from the dissolution of calcite which is in abundance in fractures. Sulfate and metals originate from sulfide mineral oxidation present in fractures as well as in the rock matrix. Waters at a bulkhead at the base of the old excavations and the mixing waters at the

surface, pumped from all of the mine excavations, are more acidic, with pH values as low as 2 and 2.5 respectively. These waters also have very high ion concentrations, in particular SO_4 and metals (Fe, Zn, Cu, and Mn). The presence of the acidic water of the old excavations is still noticeable in the mixed waters even after its dilution with waters of neutral pH, pumped from all of the other mine locations.

Results of laboratory experiments conducted on fractured rock samples from the mine show that relatively small variations in water chemistry and pH values cause different geochemical reactions within a fracture plane and considerably different effects on fracture transmissivity. Water at pH 2, and with a high sulfate concentration, tends to increase rapidly the fracture transmissivity, after a few hours or a few days, and independently of the ratio of water pressure over confining pressure (P_i/P_c). This important increase in transmissivity is due to a relatively high dissolution rate of calcite, the principal infilling mineral. Channeling is the most characteristic phenomenon taking place in fractures under these conditions. For waters with a lower sulfate concentration and at pH 2.5, the fracture transmissivity decreases. The precipitation of hydroxide minerals dominates the calcite dissolution reactions. The fracture transmissivity in this case is proportional to the P_i/P_c ratio. Waters at pH 4 and 7 have a similar effect on the fracture transmissivity as water at pH 2.5, but with very little deposition of hydroxide minerals, particularly for water at pH 4. Calcite dissolution may be mostly limited to the contact area between the fracture walls, resulting in the reduction of the asperities, and a decrease in transmissivity.

In the field, all the conditions are favourable to these types of chemical reactions, and evidences of their presence can be deduced. Waters sampled at the mine are rich in Ca, SO_4 and in metals; this strongly suggests that dissolution and oxidation reactions are taking place. Moreover, hydroxide minerals were identified in fractures at different locations in drift 6A. As demonstrated by the experimental results, water with a neutral pH in a mine context does not necessarily imply stable geochemical and hydraulic conditions; on the contrary, it could be the result of important geochemical reactions occurring between the infilling minerals in fractures and water, when the water is acidic as is in the old mine excavations. Both field work and laboratory experiments have therefore demonstrated that the processes of dissolution, oxidation, and precipitation are very active and at different time scales. The coupling between these processes and the hydraulic processes is also taking place at the scale of the rock mass as well as in the fractures.

REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse a été possible grâce à la contribution directe ou indirecte de plusieurs personnes à qui je tiens à exprimer ma gratitude.

Tout d'abord, je voudrais remercier mon directeur de thèse, M. Alain Rouleau, pour son encadrement et son soutien durant la réalisation de ce projet. J'ai bien apprécié ses conseils toujours judicieux et son esprit ouvert à la discussion et aux suggestions durant les diverses étapes de ce projet.

Je remercie M. Guy Archambault et M. Jacques Carignan, membres du comité de thèse, pour leur soutien et leurs conseils durant le cheminement de cette recherche, et aussi pour leurs corrections approfondies de cette thèse.

Je remercie M. Ian Clark, professeur à l'Université d'Ottawa, de bien vouloir agir comme examinateur externe de cette thèse.

Je remercie aussi M. Marcel Lapointe et M. Richard LeChasseur, techniciens à l'UQAC, pour leur précieux support dans mes travaux de terrain et de laboratoire. M. Marcel Lapointe a surtout démontré une compétence remarquable dans la planification et le développement de montages d'essais de terrain et des expériences au laboratoire.

Je remercie aussi M. Marc Ruel, géologue à la mine Bouchard-Hébert, et M. Pierre-Denis Gagnon, ingénieur à la mine Bouchard-Hébert, pour leur soutien technique durant la réalisation de travaux de terrain.

Le financement de ce projet a été rendu possible grâce au Fond du Développement Académique du Réseau de l'Université du Québec et à la bourse de la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi.

Enfin, mes grands remerciements à mon aimable famille : mes parents, Thami et Amina, mes frères Mohamed et Khalil, mes sœurs Faraj et Aouatif, et ma conjointe, Sara, pour tout l'effort et les encouragements exprimés durant mes études. Mon frère Mohamed a été en particulier la personne qui m'a poussé toujours vers l'avant; son appui m'a donné de l'énergie pour mener à terme cette thèse. À la famille Benlahcen je dédie cette thèse; cette thèse est aussi la leur.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
PARTIE I : ÉTAT DES CONNAISSANCES.....	3
1 INTRODUCTION SUR LE COUPLAGE DES PROCESSUS	4
2 ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES PROCESSUS CHIMIO-THERMO- HYDRO-MÉCANIQUES.....	7
2.1 CAS D'UNE FRACTURE INDIVIDUELLE.....	7
2.1.1 <i>Processus hydromécaniques</i>	7
2.1.2 <i>Processus chimio-thermo-hydro-mécaniques</i>	11
2.2 CAS D'UN SYSTÈME DE FRACTURES.....	14
2.2.1 <i>Processus hydromécaniques</i>	14
2.2.1.1 Études expérimentales	14
2.2.1.2 Modèles numériques.....	18
a) <i>Approche du milieu continu équivalent</i>	18
b) <i>Approche de blocs discrets</i>	20
c) <i>Approche des éléments joints (ROCMAS)</i>	25
2.2.2 <i>Processus hydrochimiques</i>	26
3 CONCLUSION DE LA PARTIE I.....	30
PARTIE II : CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE ET PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE DU SITE D'ÉTUDE	31
4 PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE LIÉE À LA MINE BOUCHARD-HÉBERT	32
4.1 LOCALISATION ET HISTORIQUE.....	32
4.2 GÉOLOGIE RÉGIONALE	33
4.3 GÉOLOGIE LOCALE.....	37
4.4 PROBLÉMATIQUE	40
5 ÉTUDE HYDROGÉOCHIMIQUE	43
5.1 ÉCHANTILLONNAGE ET MÉTHODE D'ANALYSE DES EAUX.....	43
5.2 RÉSULTATS HYDROGÉOCHIMIQUES	44
5.3 CAUSES D'ERREURS	49
6 CARTOGRAPHIE DES FRACTURES	50
6.1 RÉSULTATS DE LA CARTOGRAPHIE DES FRACTURES	50
6.1.1 <i>Orientation des fractures</i>	51

6.1.2	<i>Densité des fractures</i>	58
6.1.3	<i>Autres paramètres des fractures</i>	60
6.2	TYPOLOGIE DES FRACTURES AU NIVEAU 6A	62
6.3	CAUSES D'ERREURS	66
7	ESSAIS DE PERMÉABILITÉ	68
7.1	TYPE D'ESSAIS HYDRAULIQUES ET MÉTHODE D'ANALYSE DES RÉSULTATS	68
7.2	RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DES ESSAIS HYDRAULIQUES	71
7.3	CAUSES D'ERREURS	75
8	CONCLUSION DE LA PARTIE II	75
PARTIE III : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LE COUPLAGE DE PROCESSUS DANS UNE FRACTURE		79
9	INTRODUCTION À L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE	80
10	ÉTAPES PRÉCÉDANT LES ESSAIS	82
10.1	SÉLECTION ET PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS	82
10.2	MONTAGE EXPÉRIMENTAL	84
10.3	PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL	87
10.3.1	<i>Température du déroulement des essais</i>	87
10.3.2	<i>pH de l'eau d'injection</i>	88
10.3.3	<i>Contrainte de confinement</i>	89
10.3.4	<i>Pression d'injection d'eau</i>	89
10.3.5	<i>Échantillonnage et analyses chimiques</i>	90
11	ESSAIS EXPÉRIMENTAUX	91
11.1	ESSAIS MULTIPLES SUR UN MÊME ÉCHANTILLON	93
11.1.1	<i>Échantillon 1</i>	94
a)	Résultats hydrauliques	94
b)	Résultats hydrochimiques	95
11.1.2	<i>Échantillon 2</i>	98
a)	Résultats hydrauliques	98
b)	Résultats hydrochimiques	103
11.2	ESSAIS D'INJECTION À PH 2	110
11.2.1	<i>Échantillon 3</i>	110
a)	Résultats hydrauliques	110
b)	Résultats hydrochimiques	112
11.2.2	<i>Échantillon 4</i>	114
a)	Résultats hydrauliques	114
b)	Résultats hydrochimiques	116
11.2.3	<i>Échantillon 5</i>	118

a)	Résultats hydrauliques	118
b)	Résultats hydrochimiques	119
11.2.4	<i>Échantillon 6</i>	122
a)	Résultats hydrauliques	122
b)	Résultats hydrochimiques	124
11.2.5	<i>Échantillon 7</i>	127
a)	Résultats hydrauliques	127
b)	Résultats hydrochimiques	127
11.3	ESSAIS D'INJECTION À PH 2,5.....	131
11.3.1	<i>Échantillon 8</i>	131
a)	Résultats hydrauliques	131
b)	Résultats hydrochimiques	132
11.3.2	<i>Échantillon 9</i>	136
a)	Résultats hydrauliques	136
b)	Résultats hydrochimiques	136
11.3.3	<i>Échantillon 10</i>	140
a)	Résultats hydrauliques	140
b)	Résultats hydrochimiques	140
11.4	ESSAIS D'INJECTION À PH 4.....	144
11.4.1	<i>Échantillon 11</i>	144
a)	Résultats hydrauliques	144
b)	Résultats hydrochimiques	145
11.4.2	<i>Échantillon 12</i>	148
a)	Résultats hydrauliques	148
b)	Résultats hydrochimiques	149
11.5	ESSAIS D'INJECTION À PH 7.....	152
11.5.1	<i>Échantillon 13</i>	152
a)	Résultats hydrauliques	152
b)	Résultats hydrochimiques	153
11.5.2	<i>Échantillon 14</i>	156
a)	Résultats hydrauliques	156
b)	Résultats hydrochimiques	156

12 ANALYSES DES RÉSULTATS HYDRAULIQUES ET HYDROCHIMIQUES 160

12.1	ANALYSE DES RÉSULTATS HYDRAULIQUES	160
12.1.1	<i>Cas des essais à pH 2</i>	160
12.1.2	<i>Cas des essais à pH 2,5</i>	166
12.1.3	<i>Cas des essais à pH 4</i>	170
12.1.4	<i>Cas des essais à pH 7</i>	172
12.2	ANALYSE DES RÉSULTATS HYDROCHIMIQUES	174
12.2.1	<i>Cas des essais multiples sur un même échantillon</i>	175
a)	<i>Échantillon 1</i>	175

b)	Échantillon 2	176
12.2.2	<i>Essais d'injection à pH 2</i>	185
a)	Échantillon 3	185
b)	Échantillon 4	188
c)	Échantillon 5	192
d)	Échantillon 6	195
e)	Échantillon 7	198
12.2.3	<i>Essais d'injection à pH 2,5</i>	201
a)	Échantillon 8	201
b)	Échantillon 9	204
c)	Échantillon 10	208
d)	Comparaisons des résultats des essais à pH 2,5	211
12.2.4	<i>Essais d'injection à pH 4</i>	212
a)	Échantillon 11	212
b)	Échantillon 12	212
c)	Comparaisons des résultats des essais à pH 4	216
12.2.5	<i>Essais d'injection à pH 7</i>	216
a)	Échantillon 13	216
b)	Échantillon 14	218
c)	Comparaisons des résultats des essais à pH 7	218
13	INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	220
13.1	CAS DES ESSAIS MULTIPLES SUR UN MÊME ÉCHANTILLON	225
13.1.1	<i>Échantillon 1</i>	225
13.1.2	<i>Échantillon 2</i>	234
a)	L'injection à pH 7	234
b)	L'injection à pH 4	241
c)	L'injection à pH 2	247
13.2	CAS DES ESSAIS À PH 2	253
13.2.1	<i>Échantillon 3</i>	253
13.2.2	<i>Échantillon 4</i>	259
13.2.3	<i>Échantillon 5</i>	266
13.2.4	<i>Échantillon 6</i>	272
13.2.5	<i>Échantillon 7</i>	278
13.2.6	<i>Interprétation générale des essais à pH 2</i>	284
a)	Échantillons à évolution de type A	284
b)	Échantillons à évolution de type B	287
c)	Échantillon à évolution de type C	290
d)	Échantillon à évolution de type D	291
e)	Comparaisons entre les types d'évolution des échantillons.....	292
13.3	CAS DES ESSAIS À PH 2,5	295
13.3.1	<i>Échantillon 8</i>	295
13.3.2	<i>Échantillon 9</i>	302

13.3.3	<i>Échantillon 10</i>	308
13.3.4	<i>Interprétation générale des essais à pH 2,5</i>	315
13.4	CAS DES ESSAIS À PH 4.....	320
13.4.1	<i>Échantillon 11</i>	320
13.4.2	<i>Échantillon 12</i>	325
13.4.3	<i>Interprétation générale des essais à pH 4</i>	331
13.5	CAS DES ESSAIS À PH 7.....	335
13.5.1	<i>Échantillon 13</i>	335
13.5.2	<i>Échantillon 14</i>	338
13.5.3	<i>Interprétation générale des essais à pH 7</i>	345
14	DISCUSSION SUR LES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX	349
15	CONCLUSION SUR LES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX	352
	PARTIE IV : INTÉGRATION DES RÉSULTATS DE TERRAIN ET DE	
	LABORATOIRE	359
16	INTÉGRATION DES RÉSULTATS DE TERRAIN ET DE LABORATOIRE	360
16.1	FRACTURES ET VEINES	360
16.2	COMPORTEMENT HYDRAULIQUE	362
16.3	ASPECT GÉOCHIMIQUE	362
16.4	ESSAIS AU LABORATOIRE	363
16.5	RECOMMANDATIONS PRATIQUES	367
17	CONCLUSION SUR LES LIENS TERRAIN-LABORATOIRE	369
18	CONCLUSION GENERALE	370
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	372
	ANNEXES	380

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 : Exemples de couplage des processus chimiques, hydrauliques, mécaniques et thermiques dans un massif rocheux fracturé	5
Figure 2.1 : Écoulement dans les fractures naturelles à différentes valeurs de contrainte normale (tiré de Gale, 1982)	9
Figure 2.2 : Les différentes lois d'écoulement et leur domaine de validité (tiré de Louis, 1967)	9
Figure 2.3 : Influence de la contrainte normale sur une fracture individuelle (tiré de Makurat et al., 1990)	10
Figure 2.4 : L'effet des changements de contraintes sur la conductivité hydraulique du massif rocheux autour d'une excavation (comportement élastique) (tiré de Kelsall et al., 1984)	15
Figure 2.5 : L'effet des changements de contraintes sur la conductivité hydraulique du massif rocheux autour d'une excavation (comportement élasto-plastique) (tiré de Kelsall et al., 1984)	15
Figure 2.6 : Essai de macroperméabilité à Stripa (tiré de Nelson et Wilson, 1980)	17
Figure 2.7 : L'effet de la température sur le profil radial de la charge hydraulique du tunnel (tiré de Wilson et al., 1983)	17
Figure 2.8 : Analogie rhéologique de roches fracturées dans le concept multilaminaire (tiré de Vargas et al., 1995)	19
Figure 2.9 : Définition des domaines par UDEC (tiré de Lemos et Lorig, 1990)	21
Figure 2.10 : Entrée d'eau souterraine à l'intérieur de l'excavation (tiré d'Indraratna et Singh, 1994)	23
Figure 2.11 : Prévion de la quantité d'entrée d'eau à l'intérieur d'une excavation, basée sur plusieurs modèles de joint (tiré d'Indraratna et Singh, 1994)	23
Figure 2.12 : La quantité d'entrée d'eau dans une excavation en fonction de blocs normalisés (tiré d'Indraratna et Singh, 1994)	24

Figure 2.13 : Effet des paramètres des joints et du rapport des contraintes in-situ sur l'écoulement total (tiré d'Indraratna et Singh, 1994)	24
Figure 2.14 : Évolution de la pression à l'intérieur des fractures verticales durant le percement d'un tunnel	26
Figure 2.15 : Influence du pH sur le taux de dissolution de la calcite (tiré de Plummer et Wigley 1976)	29
Figure 2.16 : Influence de la température sur le produit de solubilité de la calcite (tiré de Hakami et al., 1991)	29
Figure 2.17 : Taux de dissolution de la calcite en fonction du taux de réaction de surface et du taux de transport (tiré de Plummer et Wigley 1976)	29
Figure 4.1 : Carte géologique de l'Abitibi montrant la localisation de la mine Bouchard-Hébert (modifié de Dion et Guha, 1994)	34
Figure 4.2 : Géologie générale dans la région de la mine Bouchard-Hébert (Mobrun) (tiré de Barret et al., 1992)	35
Figure 4.3 : Géologie locale de la mine Bouchard-Hébert (adapté de Barret et al., 1992)	36
Figure 4.4 : Section composite (11025E) de la mine Bouchard-Hébert (adapté de Ruel, 1995)	39
Figure 5.1 : Localisation des échantillons d'eau souterraines dans une coupe longitudinale regardant vers le nord de la mine Bouchard-Hébert (modifié de Ruel, 1995)	46
Figure 6.1 : Projection stéréographique sur l'hémisphère inférieure des pôles de l'ensemble des fractures mesurées au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert	52
Figure 6.2 : Projection stéréographique sur l'hémisphère inférieure des pôles des fractures le long de la galerie au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert	53
Figure 6.3 : Projection stéréographique sur l'hémisphère inférieure des pôles des fractures selon la lithologie au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert	55

Figure 6.4 : Projection stéréographique sur l'hémisphère inférieure des pôles des fractures selon la lithologie et la localisation au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert	57
Figure 6.5 : Densité de fracture le long de la galerie 6A de la mine Bouchard-Hébert	59
Figure 6.6 : Histogramme de fréquence de la longueur de trace (a) et de l'épaisseur (b) des veines au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert	61
Figure 7.1 : Localisation des trous de forages utilisés pour les essais hydrauliques dans une coupe longitudinale regardant vers le nord à la mine Bouchard-Hébert (modifié de Ruel, 1995)	69
Figure 7.2 : Schéma du montage du dispositif d'essais d'injection en forage (adapté de Lapcevic, 1988)	70
Figure 7.3 : Diagraphie de la conductivité hydraulique des forages 6A-01 et 6A-03 du niveau 6A à la mine Bouchard-Hébert	74
Figure 9.1 : Écoulement d'une eau acide et sa réaction avec les minéraux de remplissage dans une fracture	81
Figure 10.1 : Schéma du cheminement des échantillons fracturés destinés aux essais expérimentaux.	83
Figure 10.2 : Schéma du dispositif expérimental pour les essais d'injection	85
Figure 11.1 : Débit d'eau récupérée (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 1 à pH 2	96
Figure 11.2 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 1 à pH 2	97
Figure 11.3 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 7	100
Figure 11.4 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 4	101
Figure 11.5 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 2	102

Figure 11.6 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 7	104
Figure 11.7 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 4	108
Figure 11.8 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 2	109
Figure 11.9 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 3 à pH 2	111
Figure 11.10 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 3 à pH 2	113
Figure 11.11 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 4 à pH 2	115
Figure 11.12 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 4 à pH 2	117
Figure 11.13 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 5 à pH 2	120
Figure 11.14 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 5 à pH 2	121
Figure 11.15 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 6 à pH 2	123
Figure 11.16 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 6 à pH 2	126
Figure 11.17 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 7 à pH 2	129
Figure 11.18 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 7 à pH 2	130
Figure 11.19 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 8 à pH 2,5	134

Figure 11.20 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 8 à pH 2,5	135
Figure 11.21 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 9 à pH 2,5	138
Figure 11.22 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 9 à pH 2,5	139
Figure 11.23 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 10 à pH 2,5	142
Figure 11.24 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 10 à pH 2,5	143
Figure 11.25 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 11 à pH 4	146
Figure 11.26 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 11 à pH 4	147
Figure 11.27 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 12 à pH 4	150
Figure 11.28 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 12 à pH 4	151
Figure 11.29 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 13 à pH 7	154
Figure 11.30 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 13 à pH 7	155
Figure 11.31 : Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 14 à pH 7	158
Figure 11.32 : Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 14 à pH 7	159

Figure 12.1 : Différents types d'évolution du débit et de la transmissivité en fonction du temps avec les différentes phases dans le cas des essais à pH 2	162
Figure 12.2 : Différents types d'évolution du débit et de la transmissivité en fonction du temps pour les essais à pH 2,5	168
Figure 12.3 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 1 à pH 2	177
Figure 12.4 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO ₄ (a) et de l'alcalinité totale (b) pour l'échantillon 1 à pH 2	178
Figure 12.5 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 2 à pH 7	179
Figure 12.6 : Concentration en Ca en fonction de celle de SO ₄ (a) et de l'alcalinité totale (b) pour l'échantillon 2 à pH 7	180
Figure 12.7 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 2 à pH 4	181
Figure 12.8 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO ₄ (a) et de l'alcalinité totale (b) pour l'échantillon 2 à pH 4	183
Figure 12.9 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 2 à pH 2	184
Figure 12.10 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO ₄ pour l'échantillon 2 à pH 2	184
Figure 12.11 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 3 à pH 2	186
Figure 12.12 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO ₄ pour l'échantillon 3 à pH 2	187
Figure 12.13 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 4 à pH 2	190

Figure 12.14 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 4 à pH 2	191
Figure 12.15 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 5 à pH 2	193
Figure 12.16 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 5 à pH 2	194
Figure 12.17 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 6 à pH 2	196
Figure 12.18 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 6 à pH 2	197
Figure 12.19 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 7 à pH 2	199
Figure 12.20 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 7 à pH 2	200
Figure 12.21 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 8 pH 2,5	202
Figure 12.22 : Les concentrations de Ca (a) et de Fe (b) en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon à pH 2,	204
Figure 12.23 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 9 à pH 2,5	206
Figure 12.24 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 9 à pH 2,5	207
Figure 12.25 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 10 à pH 2,5	209
Figure 12.26 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 10 à pH 2,5	210
Figure 12.27 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 11 à pH 4	213

Figure 12.28 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 11 à pH 4	213
Figure 12.29 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 12 à pH 4	214
Figure 12.30 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 12 à pH 4	215
Figure 12.31 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 13 à pH 7	217
Figure 12.32 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 13 à pH 7	217
Figure 12.33 : Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 14 à pH 7	219
Figure 12.34 : Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 14 à pH 7	219
Figure 13.1 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 1 à pH 2	228
Figure 13.2 : Ca et SO_4 en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 1 à pH 2	232
Figure 13.3 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, $R'(R'=R/A)$, en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 1 à pH 2	233
Figure 13.4 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 7	238
Figure 13.5 : Ca et SO_4 en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 2 à pH 7	239
Figure 13.6 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, $R'(R'=R/A)$, en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 2 à pH 7	240

Figure 13.7 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 4	242
Figure 13.8 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 2 à pH 4	245
Figure 13.9 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' ($R'=R/A$), en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 2 à pH 4	246
Figure 13.10 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 2	248
Figure 13.11 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 2 à pH 2	251
Figure 13.12 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' ($R'=R/A$), en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 2 à pH 2	252
Figure 13.13 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 3 à pH 2	256
Figure 13.14 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 3 à pH 2	257
Figure 13.15 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' ($R'=R/A$), en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 3 à pH 2	258
Figure 13.16 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 4 à pH 2	260
Figure 13.17 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 4 à pH 2	264
Figure 13.18 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' ($R'=R/A$), en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 4 à pH 2	265
Figure 13.19 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 5 à pH 2	267

Figure 13.20 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 5 à pH 2	269
Figure 13.21 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, $R'(R'=R/A)$, en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 5 à pH 2	271
Figure 13.22 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 6 à pH 2	273
Figure 13.23 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 6 à pH 2	276
Figure 13.24 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, $R'(R'=R/A)$, en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 6 à pH 2	277
Figure 13.25 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 7 à pH 2	281
Figure 13.26 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 7 à pH 2	282
Figure 13.27 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, $R'(R'=R/A)$, en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 7 à pH 2	283
Figure 13.28 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 8 à pH 2,5	297
Figure 13.29 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 8 à pH 2,5	300
Figure 13.30 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, $R'(R'=R/A)$, en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 8 à pH 2,5	301
Figure 13.31 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 9 à pH 2,5	303

Figure 13.32 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 9 à pH 2,5	305
Figure 13.33 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' ($R'=R/A$), en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 9 à pH 2,5	307
Figure 13.34 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 10 à pH 2,5	310
Figure 13.35 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 10 à pH 2,5	313
Figure 13.36 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' ($R'=R/A$), en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 10 à pH 2,5	314
Figure 13.37 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 11 à pH 4	321
Figure 13.38 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 11 à pH 4	323
Figure 13.39 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' ($R'=R/A$), en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 11 à pH 4	324
Figure 13.40 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 12 à pH 4	328
Figure 13.41 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 12 à pH 4	329
Figure 13.42 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' ($R'=R/A$), en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 12 à pH 4	330
Figure 13.43 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps l'échantillon 13 à pH 7	336
Figure 13.44 : Ca et SO ₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 13 à pH 7	339

- Figure 13.45 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, $R'(R'=R/A)$, en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 13 à pH 7 340
- Figure 13.46 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 14 à pH 7 341
- Figure 13.47 : Ca et SO_4 en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 14 à pH 7 343
- Figure 13.48 : Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, $R'(R'=R/A)$, en fonction du temps (a) et R/A en fonction du débit moyen pour l'échantillon 14 à pH 7 344

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 : Données des points contacts A, B, C et D (tiré d'Indraratna et Singh, 1994)	22
Tableau 5.1: Résultats hydrogéochimiques à la mine Bouchard-Hébert	47
Tableau 6.1 : Fréquence des fractures relevées selon la longueur de trace et le pendage	63
Tableau 6.2 : Fréquence des fractures relevées selon l'épaisseur et le pendage	61
Tableau 6.3 : Fréquence des fractures relevées selon la longueur de trace et l'épaisseur	65
Tableau 11.1 : Sommaire des essais d'injection exécutés sur les échantillons de fractures	91
Tableau 11.2 : Largeur de la section d'écoulement estimée pour les échantillons de carotte utilisés pour les essais expérimentaux	93
Tableau 12.1 : Résumé des résultats hydrauliques et chimiques des essais à pH 2	163
Tableau 12.2 : Résumé des résultats des essais à pH 2,5	169
Tableau 12.3 : Résumé des résultats des essais à pH 4	171
Tableau 12.4 : Résumé des résultats des essais à pH 7	173
Tableau 13.1 : Estimation de la superficie de la fracture recouverte par la calcite pour les échantillons testés.	223
Tableau 13.2 : Résumé des résultats du taux de dissolution de la calcite par unité de surface pour les essais à pH 2	286
Tableau 13.3 : Résumé des résultats du taux de dissolution de la calcite par unité de surface pour les essais à pH 2,5	318
Tableau 13.4 : Résumé des résultats du taux de dissolution de la calcite par unité de surface pour les essais à pH 4	334
Tableau 13.5 : Résumé des résultats du taux de dissolution de la calcite par unité de surface pour les essais à pH 7	348

LISTE DES ANNEXES

	Page
Annexe 1 : Quelques photographies du mur cartographié de la galerie 6A à la mine Bouchard-Hébert.	381
Annexe 2 : Relevé de fractures sur le mur nord du niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.	382
Annexe 3 : Photos du montage utilisé pour les essais hydraulique en forage à la mine Bouchard-Hébert	387
Annexe 4a : Résultats des essais hydrauliques du forage 6A-03	388
Annexe 4b : Résultats des essais hydrauliques du forage 6A-01	390
Annexe 5 : Description macroscopique des échantillons.	391
Annexe 6 : Photos du montage expérimental des essais sur les échantillons de fractures	422
Annexe 7 : Schéma de la cellule tri-axiale avec la charpente métallique.	423
Annexe 8 : Photos de la cellule tri-axiale.	424
Annexe 9 : Description microscopique des échantillons.	425
Annexe 10 : Dépôt d'hydroxydes sur la barricade (a), et sur le mur de la galerie (b) au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.	456

INTRODUCTION

Les processus chimiques, hydrauliques et mécaniques, et leur couplage dans un massif rocheux fracturé, sont en perpétuelle interaction; ces processus agissent à différentes échelles de temps. Dans le cas d'un massif rocheux encaissant une mine, ces processus sont plus actifs à cause des perturbations subies par le champ de contraintes géomécaniques du massif rocheux, par le régime d'écoulement souterrain et par la chimie des eaux souterraines.

Ce travail de recherche porte sur l'étude des processus chimiques, hydrauliques et mécaniques, et leur couplage dans un massif rocheux fracturé encaissant une mine en exploitation, en l'occurrence la mine Bouchard-Hébert en Abitibi. Ce complexe minier est subdivisé en deux parties : une première partie représentant les anciennes excavations et une deuxième partie représentant la nouvelle exploitation plus profonde. Le caractère acide des eaux souterraines dans les anciennes excavations, en combinaison avec la perturbation des contraintes mécaniques autour des excavations, peut affecter la perméabilité de la portion du massif rocheux séparant les deux parties de ce complexe minier.

Pour évaluer ces effets, les travaux sur le terrain à la mine Bouchard-Hébert ont consisté en la caractérisation hydrogéochimiques des eaux à la mine, la cartographie de fractures et la réalisation d'essais hydrauliques en forage dans le massif rocheux séparant

les anciennes excavations des nouvelles. Les essais au laboratoire ont été exécutés sur des échantillons de veines fracturées issus du massif rocheux en-dessous des anciennes excavations dans le but d'investiguer le couplage entre la transmissivité et la géochimie. L'intégration des résultats des travaux sur le terrain et des essais au laboratoire permet de tirer des conclusions sur le couplage entre les processus chimiques et les processus hydrauliques se produisant à l'échelle du massif rocheux dans le contexte d'une mine en exploitation.

PARTIE I : ÉTAT DES CONNAISSANCES

1 INTRODUCTION SUR LE COUPLAGE DES PROCESSUS

En géologie, les processus mécaniques, hydrauliques, chimiques et thermiques interagissent en continuité; l'état actuel du milieu est le résultat de séquences complexes de couplage de ces processus. Le terme "couplage de processus" implique qu'un processus affecte l'initiation et le progrès d'un autre. La figure 1.1 illustre l'interdépendance de différents processus dans un massif rocheux fracturé. Il arrive souvent que l'on ne puisse comprendre le comportement d'un massif rocheux en considérant chacun de ces processus indépendamment, d'où l'importance de considérer les couplages des différents processus dans un massif rocheux fracturé.

Plusieurs travaux ont été réalisés sur l'étude du comportement soit d'une fracture individuelle ou d'un système de fractures, en fonction de la variation de certains paramètres, telles que les contraintes mécaniques, la pression hydraulique, la température et la chimie de l'eau. Dans la plupart de ces études, le couplage de ces différents facteurs n'est effectué que théoriquement par modélisation numérique de cas simples. Lorsqu'on a recours à des travaux expérimentaux menés sur le terrain ou au laboratoire, les couplages ne sont souvent réalisés qu'en partie. La réalisation d'études combinant des travaux de terrain, des travaux de laboratoire et des travaux théoriques sur le couplage de processus mécaniques, hydrauliques, chimiques et thermiques dans un massif rocheux fracturé s'avère

donc nécessaire pour combler des lacunes dans les connaissances sur ces couplages de processus.

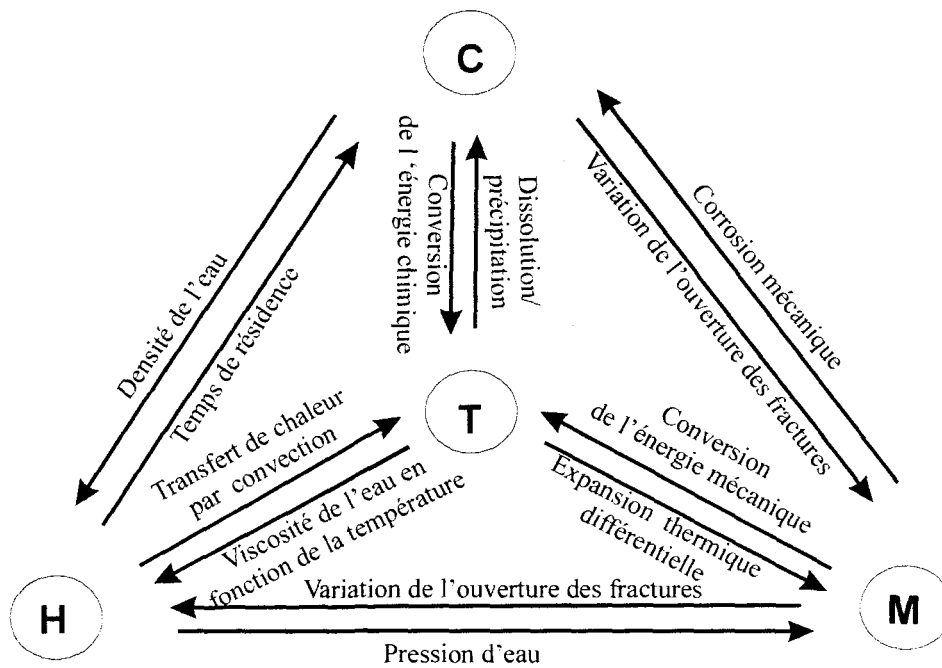


Figure 1.1 : Exemples de couplage des processus chimiques (C), hydrauliques (H), mécaniques (M) et thermiques (T) dans un massif rocheux fracturé.

Légende détaillée de la figure 1.1

- H ↔ M : - Une pression d'eau élevée peut causer l'érosion des aspérités d'une fracture et par conséquent la diminution de son ouverture.
 - La variation de l'ouverture de la fracture en fonction de la contrainte mécanique appliquée affecte la transmissivité de cette fracture.
- H ↔ C : - Les réactions chimiques (dissolution et oxydation) entre l'eau et les minéraux de remplissage de la fracture sont contrôlées par le temps de résidence de cette eau dans la fracture.
 - Les mêmes réactions chimiques induisent des changements dans le volume des vides où les fluides circulent.
- C ↔ M : - La dissolution des points de contact entre les surfaces d'une fracture aboutit à la variation de son ouverture.
 - L'écrasement des points de contact entre les surfaces d'une fracture sous l'effet d'une contrainte mécanique élevée permet la libération de substances dissoutes dans l'eau.
- T ↔ M : - Lors de l'application d'une contrainte mécanique à une fracture, une quantité de cette énergie est convertie en chaleur permettant l'augmentation de la température.
 - Les propriétés mécaniques de la matrice rocheuse varient en fonction de la température.
- T ↔ H : - La variation de la température affecte la viscosité de l'eau et par conséquent sa vitesse de circulation dans la fracture.
 - Le transfert de la chaleur d'un point donné à un autre à l'intérieur d'une fracture est fonction de la vitesse de l'eau.
- T ↔ C : - La température influence les réactions de dissolution et de précipitation des minéraux carbonatés, tels que la calcite, dans une fracture.
 - Les réactions chimiques entre l'eau et les minéraux de remplissage d'une fracture produisent de l'énergie thermique.

2 ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LES PROCESSUS CHIMIO-THERMO-HYDRO-MÉCANIQUES

2.1 CAS D'UNE FRACTURE INDIVIDUELLE

2.1.1 *Processus hydromécaniques*

Les premiers modèles sur le comportement hydraulique d'une fracture ont supposé que celle-ci est formée de deux plaques parallèles. Selon la loi cubique, l'écoulement dans cette fracture est proportionnel au cube de son ouverture. Pourtant, les travaux expérimentaux sur l'écoulement d'un fluide dans une fracture naturelle ou induite ont montré que l'écoulement ne respecte pas toujours cette loi (figure 2.1) (Iwai, 1976; Gale, 1982; et Raven et Gale, 1985). On a attribué ces déviations de la loi cubique à la rugosité de la surface de la fracture et à la tortuosité de l'écoulement. Par ailleurs, Louis (1967) a déterminé expérimentalement les différents domaines d'écoulement dans une fracture. Ces derniers apparaissent dans la figure 2.2.

Plusieurs études ont montré l'influence de la contrainte normale sur la conductivité d'une fracture. Par exemple, les travaux de Iwai (1976), Tsang et Witherspoon (1981), Raven et Gale (1985), Barton et al. (1985), Gentier (1986) et Cook (1992), ont souligné que l'augmentation de la contrainte normale sur une fracture provoque une diminution rapide de

sa transmissivité. À des niveaux élevés de contrainte normale, cependant, la transmissivité de la fracture tend à devenir constante. Cette stabilité de la transmissivité de la fracture, même avec l'application subséquente d'un cycle de contraintes faibles, correspond à un rapprochement très étroit des deux surfaces de la fracture et à l'augmentation de la tortuosité de l'écoulement (figure 2.3).

Les études du comportement hydraulique d'une fracture en cisaillement sont, par contre, peu nombreuses. Il est connu, tout de même, que l'application de contraintes de cisaillement peut affecter significativement les surfaces de la fracture et donc l'écoulement dans celle-ci. Les résultats des travaux de Gale et al. (1990), et de Makurat et al. (1990) démontrent que la transmissivité de la fracture diminue avec le cisaillement quand la contrainte normale appliquée est suffisamment élevée pour causer la rupture des aspérités durant le cisaillement. Cette diminution est plus prononcée pour des fractures rugueuses (Olsson, 1992). Les travaux de Yeo et al. (1998) ont montré que la transmissivité peut augmenter mais dans la direction perpendiculaire à celle du cisaillement de la fracture. Lamontagne (2001) a démontré que l'augmentation générale de la transmissivité de la fracture en cisaillement et sous contrainte normale varie avec l'anisotropie de la morphologie de la rugosité des surfaces de la fracture. L'augmentation de la transmissivité de la fracture est plus prononcée dans la direction perpendiculaire au cisaillement.

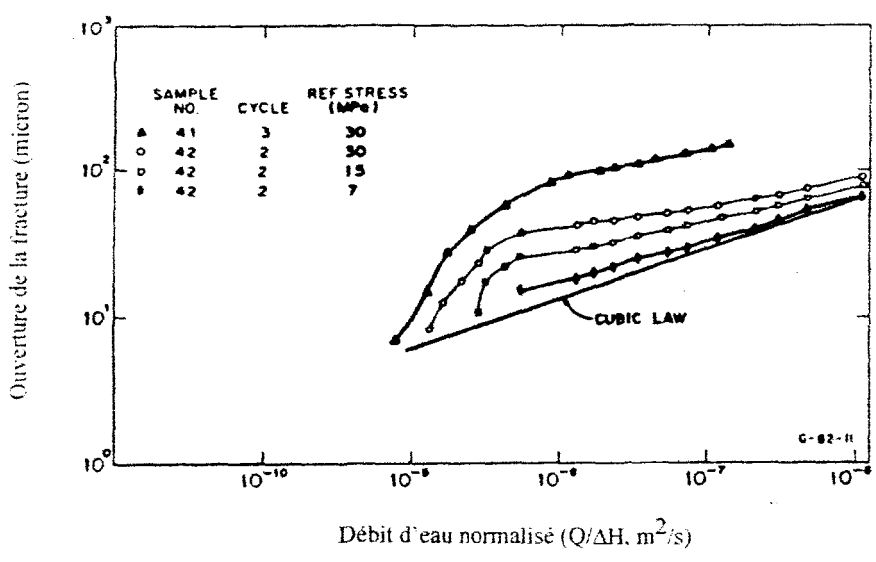


Figure 2.1: Écoulement dans les fractures naturelles à différentes valeurs de contrainte normale (tiré de Gale, 1982)

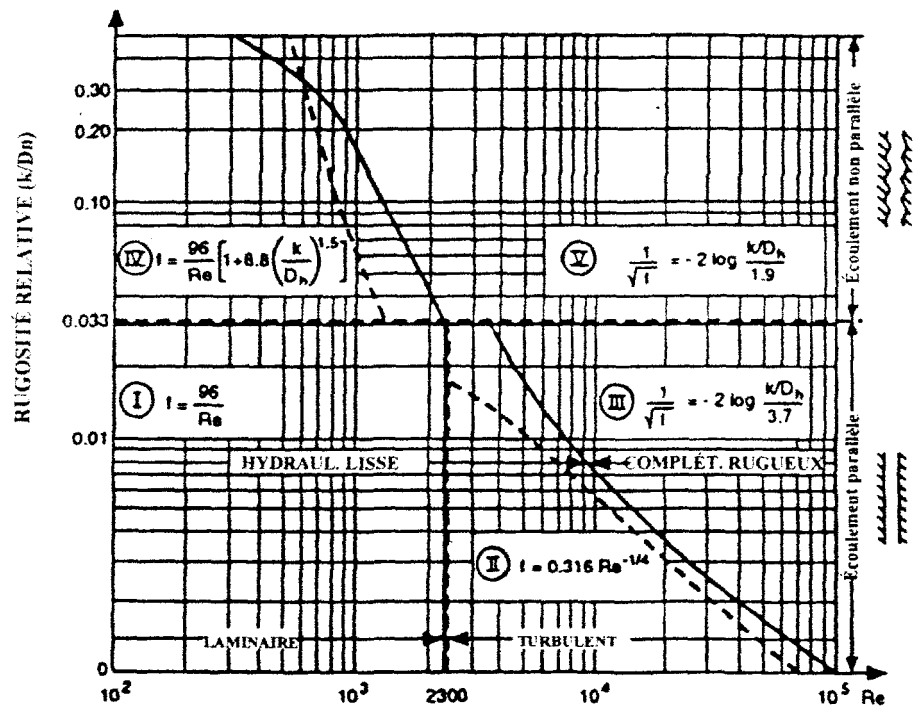


Figure 2.2: Les différentes lois d'écoulement et leur domaine de validité (tiré de Louis, 1967)

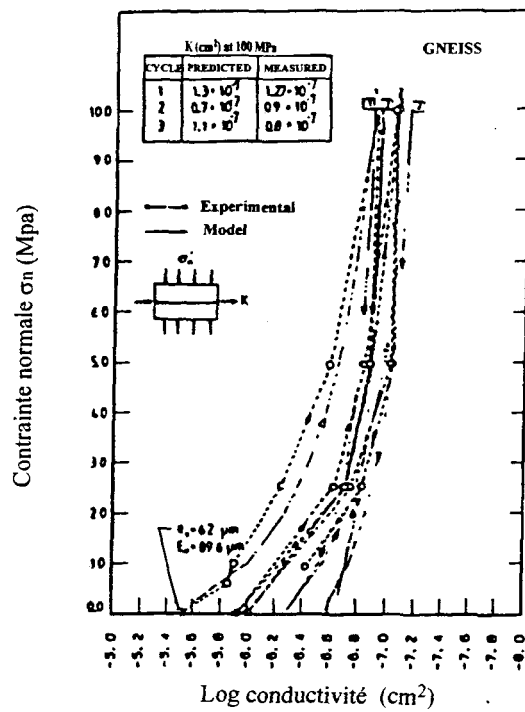


Figure 2.3: Influence de la contrainte normale sur une fracture individuelle
(tiré de Makurat et al., 1990)

2.1.2 *Processus chimio-thermo-hydro-mécaniques*

Gentier (1995) a étudié expérimentalement l'effet de la chimie de l'eau sur l'écoulement dans une fracture individuelle. Elle a analysé le comportement hydromécanique d'une fracture granitique soumise à des tests de percolation d'eau, en appliquant des variations de la chimie et de la température de cette eau. Des tests avec une eau acide (pH: 2 et 3) ont été intercalés avec une injection d'eau déminéralisée. Un bilan chimique de l'eau injectée et de celle récupérée à la sortie de la fracture a permis d'étudier les interactions eau-roche qui se sont produites au cours de la percolation. Les résultats de ces expériences suggèrent que lorsqu'il y a variation de la chimie de l'eau percolant dans la fracture, des instabilités hydrauliques sont induites dues à la formation de colloïdes. Gentier (1995) a aussi remarqué que les réactions chimiques sont très sensibles aux conditions hydrodynamiques du milieu.

Malgré qu'il y a peu de travaux réalisés à ce sujet, on peut présumer que les processus chimiques peuvent avoir un effet important sur l'écoulement dans une fracture. L'écoulement de l'eau le long d'une fracture peut y entraîner une précipitation ou une dissolution d'éléments chimiques ou de minéraux, ce qui influence directement la conductivité de cette fracture. Les travaux de Gale et Reardon (1984) sur la précipitation de la calcite le long des chenaux d'écoulement dans une fracture montrent une diminution de la conductivité de la fracture. Par ailleurs, une altération chimique des minéraux de remplissage d'une fracture peut augmenter sa porosité. La cinétique et les mécanismes de

réaction de dissolution ou de précipitation des minéraux sont donc à prendre en considération dans une étude de ce genre.

Les études portant sur le mécanisme de dissolution de la calcite dans les joints proposent deux modèles. Le premier modèle (Weyl, 1959) suppose que les processus de dissolution et de diffusion permettent la réduction du volume des aspérités. Le deuxième modèle (Bathurst, 1958) suggère une dissolution localisée, en particulier dans les régions adjacentes aux points de contact, où il y a de plus fortes pressions, résultant en l'écrasement lorsque la zone de contact est réduite à une certaine dimension critique. Selon la prédominance de l'un ou l'autre de ces deux mécanismes de dissolution, il y a soit une diminution ou une augmentation de la perméabilité de la fracture. Marone et Rubenstone (1988) montrent dans leur étude expérimentale d'injection d'eau distillée dans une fracture artificielle que la diminution de la perméabilité de celle-ci est due à la dissolution des points de contact des deux parois et que la morphologie des deux parois y joue un rôle important.

Durham et Bourcier (2001) ont étudié expérimentalement l'effet de l'injection d'une eau légèrement acide ($\text{pH} = 4,1$) sur la perméabilité d'une fracture. Leurs résultats expérimentaux montrent une diminution de la perméabilité de la fracture sous un faible confinement (0,2 MPa) due à la dissolution de la calcite. La dissolution de la calcite adoucit la topographie de la fracture et par conséquent permet une diminution de la tortuosité de l'écoulement; l'écoulement se concentre dans un seul chenal.

Durham et Bourcier (2001) ont utilisé dans leurs calculs du taux de dissolution de la calcite les paramètres sans dimensions que sont le nombre de Peclet (Pe) et le nombre de Damköhler (Da). Ces paramètres nécessitent des connaissances sur la topographie des surfaces de la fracture et ils sont définis par les relations suivantes :

$$Pe = v L / D \quad ; \quad Da = AkL / v$$

avec v : la vitesse de l'écoulement de l'eau (ms^{-1}); L : la longueur de fracture dans la direction d'écoulement (m); D : le coefficient de diffusion (m^2s^{-1}); A : la surface de réaction; et k : le taux de réaction (Ak est en s^{-1}).

Ce type d'équation est appliqué le plus souvent dans des études de modélisations numériques (Dijk et Berkowitz 1998; Bekri et al. 1997) et dont les résultats ne concordent pas toujours avec ceux des études expérimentales utilisant les mêmes équations.

La température peut aussi avoir un effet important sur le comportement hydromécanique d'une fracture. D'une part, sa variation peut affecter l'état des contraintes effectives appliquées à une fracture (Millard et al., 1995). D'autre part, son influence est considérable, même à basse température, sur les réactions de dissolution et de précipitation de minéraux de remplissage d'une fracture, tels que les carbonates. La température joue un rôle déterminant sur le taux de réaction chimique, lequel augmente avec l'augmentation de la température (Golubev et Garibyants, 1971).

2.2 CAS D'UN SYSTÈME DE FRACTURES

2.2.1 *Processus hydromécaniques*

Le couplage des processus hydromécaniques dans un massif rocheux fracturé a été, depuis plus de deux décennies, le sujet de plusieurs travaux de recherche numériques et expérimentaux.

2.2.1.1 Études expérimentales

Nelson et Wilson (1980), et Montazer et al. (1982) ont effectué des travaux expérimentaux sur le comportement d'un massif rocheux fracturé autour d'une excavation. Montazer et al. (1982) ont mesuré la perméabilité du massif rocheux à l'aide de tests de perméabilité dans des trous de forage, dont certains sont parallèles alors que d'autres sont perpendiculaires à un tunnel situé à une profondeur de 100 m. Leurs résultats semblent confirmer le modèle théorique du comportement mécanique élastique d'un massif situé à faible profondeur. En général, dans le cas d'une déformation élastique au voisinage des murs d'une excavation (figure 2.4), la contrainte radiale est réduite tandis que la contrainte tangentielle est augmentée. Par conséquent, la transmissivité des fractures orientées tangentiellement à l'excavation devrait augmenter alors que celle des fractures radiales devrait diminuer. Cependant, dans le cas d'une déformation plastique (figure 2.5), les contraintes radiale et tangentielle sont toutes les deux réduites dans la zone proche de l'excavation et provoquent une augmentation de la transmissivité des fractures tant radiales que tangentielles.

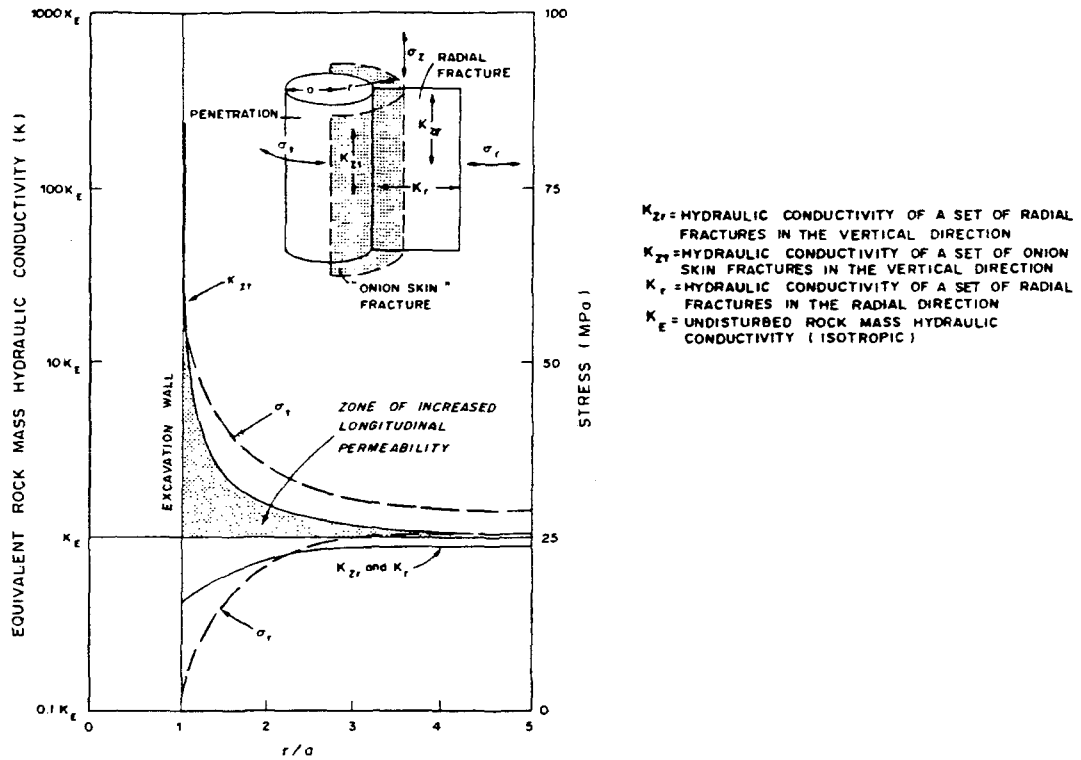


Figure 2.4 : L'effet des changements de contraintes sur la conductivité hydraulique du massif rocheux autour d'une excavation (comportement élastique) (tiré de Kelsall et al. 1984)

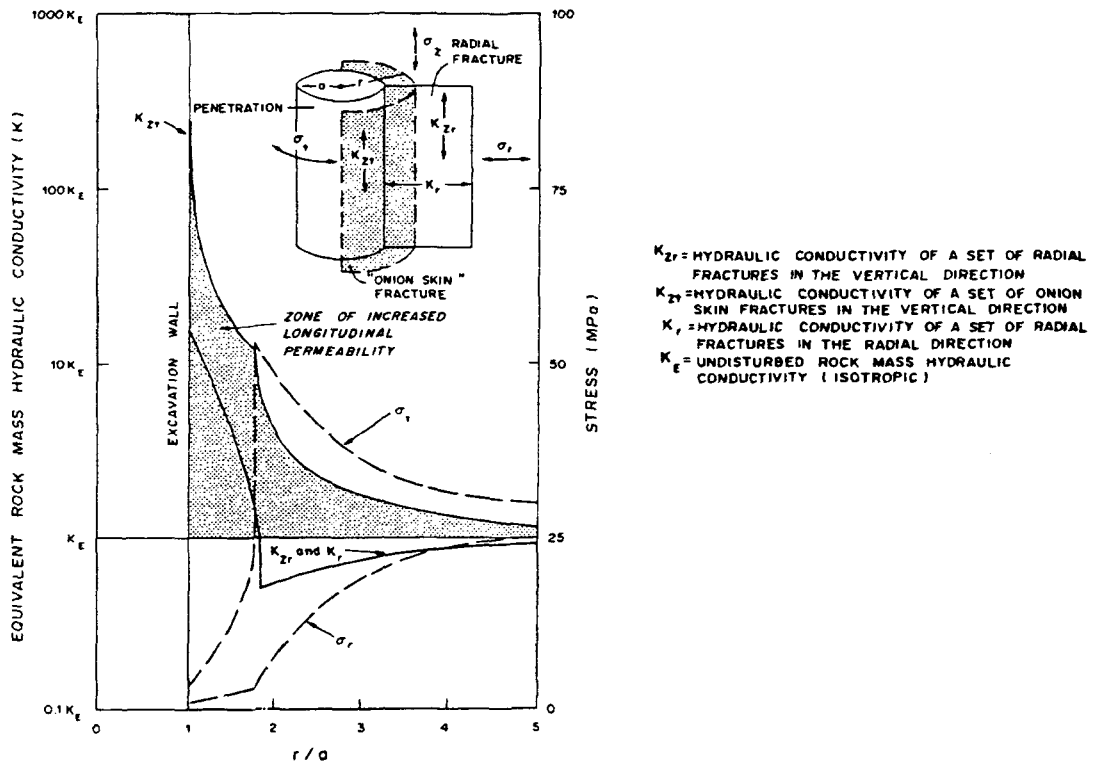


Figure 2.5 : L'effet des changements de contraintes sur la conductivité hydraulique du massif rocheux autour d'une excavation (comportement élasto-plastique) (tiré de Kelsall et al. 1984)

Nelson et Wilson (1980) ont réalisé un test de macroperméabilité dans un tunnel situé à 340 m de profondeur à la mine Stripa. Ils ont obtenu des résultats différents du modèle théorique. La figure 2.6 suggère une diminution de la perméabilité du massif rocheux fracturé par un facteur de trois dans une zone de 2,5 m proche du tunnel. Ce comportement a été attribué aux contraintes thermo-élastiques, puisque des tests réalisés à 30 °C ont montré une diminution d'environ 30% du débit par rapport à celui mesuré pour des tests exécutés à 20 °C (figure 2.7). On présume que l'effet du chauffage du tunnel entraîne une augmentation des contraintes tangentielles et, par conséquent, réduit la perméabilité radiale et le débit d'entrée d'eau dans ce tunnel.

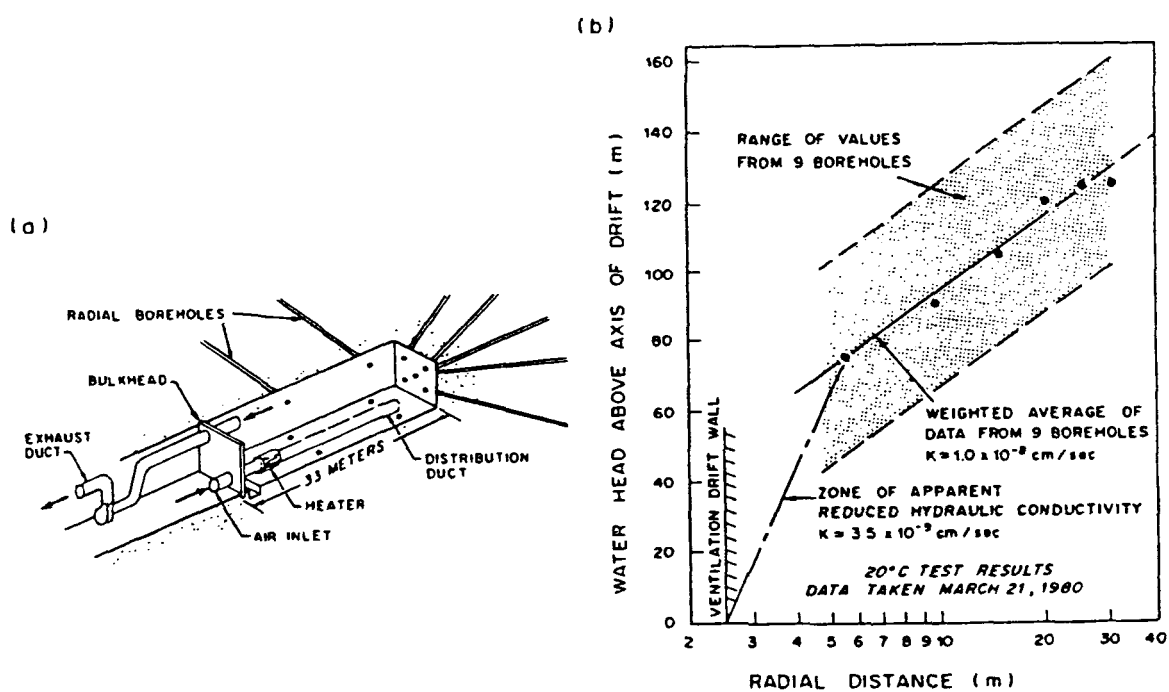


Figure 2.6 : Essai de macroperméabilité à Stripa (tiré de Nelson et Wilson, 1980)
 a) configuration de l'essai, b) résultats des mesures de charge hydraulique dans les forages, durant le test réalisé à 20 °C.

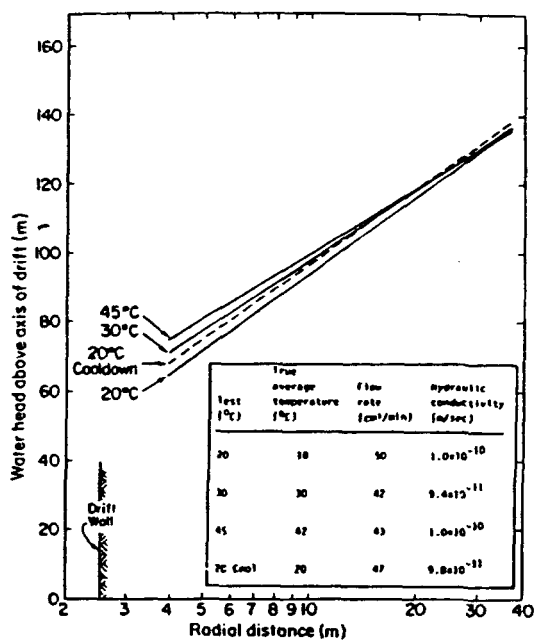


Figure 2.7 : L'effet de la température sur le profil radial de la charge hydraulique autour du tunnel (tiré de Wilson et al., 1983).

2.2.1.2 Modèles numériques

Les travaux de modélisation numérique de processus couplés hydro-mécaniques dans un système de fractures ont été réalisés soit en considérant un couplage total, où la déformation volumique des fractures est fonction du temps, ou bien en considérant l'écoulement en régime permanent d'un fluide incompressible (Vargas et al., 1995). Différentes approches ont été mises au point pour la modélisation hydromécanique d'un système de fractures. Mentionnons l'approche du milieu continu équivalent ("continuum equivalent"), l'approche de blocs discrets ("discrete block") et l'approche des éléments joints ("joint elements").

a) *Approche du milieu continu équivalent*

Dans cette approche, les fractures se comportent comme de minces imperfections dans un continuum élastique, et chaque fracture peut être représentée par un équivalent hydromécanique de plaques planaires et parallèles reliées par deux ressorts (figure 2.8). L'écoulement du fluide prend place exclusivement le long des joints. Comme ces derniers se déforment, les ouvertures mécaniques et hydrauliques changent. La loi cubique est supposée valide pour le calcul du débit d'eau dans chaque joint. Par la suite, le tenseur de la perméabilité équivalente est déterminé pour chaque famille de joints et pour l'assemblage de toutes les familles de joints. La loi cubique est définie par l'équation :

$$q = \frac{1}{12\mu} a^3 \frac{\Delta p}{l}$$

où μ est la viscosité dynamique du fluide, a , l'ouverture hydraulique, Δp , la variation de la pression dans la fracture et l , la longueur de la fracture.

Vargas et al. (1995) ont appliqué cette approche pour analyser les fondations d'un barrage qui se situe sur un massif rocheux traversé par deux familles de fractures, l'une, verticale, l'autre, horizontale. Les deux hypothèses de couplage et de non couplage ont été considérées, dans un premier temps, avec une petite ouverture initiale de fracture (0,5 mm) et dans un deuxième temps, avec une ouverture initiale plus grande (10 mm). Les résultats ont montré que les effets du couplage (milieu compressible) semblaient être plus remarquables dans le cas de la plus petite ouverture.

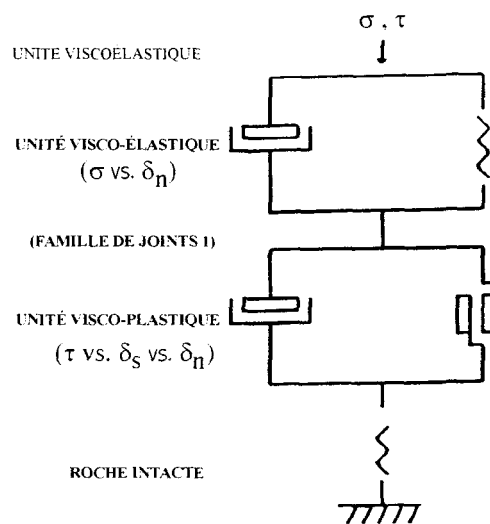


Figure 2.8 : Analogie rhéologique de roches fracturées dans le concept multilaminaire (tiré de Vargas et al. 1995)

b) *Approche de blocs discrets*

Cette approche, appelée aussi sous le nom de la méthode des éléments distincts ou code universel des éléments distincts (UDEC), considère un massif rocheux comme des blocs qui définissent un réseau d'interconnexion de vides et de chenaux (figure 2.9), appelés domaines, dans lesquels il y a un écoulement (Lemos et Lorig, 1990). L'écoulement est contrôlé par le différentiel de la pression entre deux domaines adjacents. Le débit d'écoulement est calculé de deux façons différentes dépendant du type de contact. Pour un point de contact coin-bordure (i.e. le contact F dans la figure 2.9) ou coin-coin, le débit est donné par

$$q = -k_C \Delta p \quad \text{avec} \quad \Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1)$$

où k_C est la perméabilité du point de contact, p_1 et p_2 sont les pressions des domaines 1 et 2 respectivement, ρ_w , la densité du fluide, g , l'accélération et y_1 et y_2 , les coordonnées du centre des domaines.

Dans le cas de contact bordure-bordure (i.e. le contact D dans la figure 2.9), la loi cubique pour l'écoulement dans une fracture plane (Witherspoon et al., 1980) est appliquée.

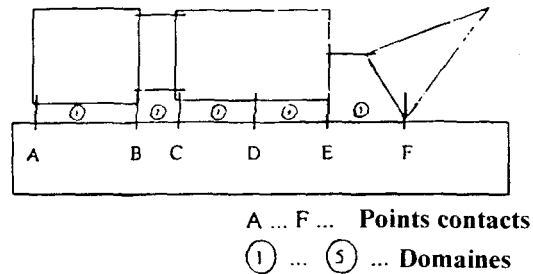


Figure 2.9 : Définition des domaines par UDEC (tiré de Lemos et Lorig, 1990)

Dans le programme UDEC, à chaque pas de temps, de nouvelles valeurs sont calculées pour l'ouverture de tous les contacts et pour les volumes de tous les domaines. Les débits à travers les contacts sont ensuite calculés suivant les équations déjà données. En plus, les pressions sont mises à jour en tenant compte de l'écoulement net à l'intérieur du domaine. Ensuite, les forces exercées par le fluide sur les bords entourant les blocs peuvent être déterminées. Ces forces sont ajoutées aux autres forces appliquées sur les grilles des points du bloc, telles que les forces de contact mécanique et les charges externes. En conséquence de cette procédure, les contraintes totales à l'intérieur des blocs imperméables peuvent être obtenues, et les contraintes normales effectives peuvent donc être déduites pour les contacts mécaniques.

Indraratna et Singh (1994) ont utilisé l'approche UDEC pour estimer les risques d'inondation ou d'entrée d'eau dans des excavations d'une mine située dans un massif rocheux traversé par deux familles de fractures, l'une verticale, l'autre horizontale (figure 2.10). Leurs résultats révèlent que plus grand est le rapport de la contrainte horizontale sur la contrainte verticale *in situ*, plus faibles sont les entrées d'eaux à l'intérieur d'une excavation horizontale (tableau 2.1 et figure 2.11). En outre, ils ont pu donner des estimations de la quantité des entrées d'eaux en fonction de la taille des blocs (figures 2.12 et 2.13): plus petite est la taille des blocs normalisée, plus grand est le nombre de joints interceptant la limite de l'excavation, et donc plus grande est la quantité d'entrée d'eau.

Tableau 2.1: Données des points contacts A, B, C et D (tiré d'Indraratna et Singh, 1994)

Point	a_0 (mm)	a (mm)	u_w (MPa)	σ_n (MPa)	q (litres/s)
A	1.0	0.67	0.10	3.35	3.79
B	1.0	0.50	0.25	5.49	1.62
C	1.0	0.62	0.21	3.84	3.04
D	1.0	0.50	0.4	6.29	1.42
			Total	Flow	9.87

a_0 = joint aperture at zero normal stress; a = current joint aperture near the opening

u_w = joint (domain) water pressure; σ_n = normal stress at joint

q = water flow into opening

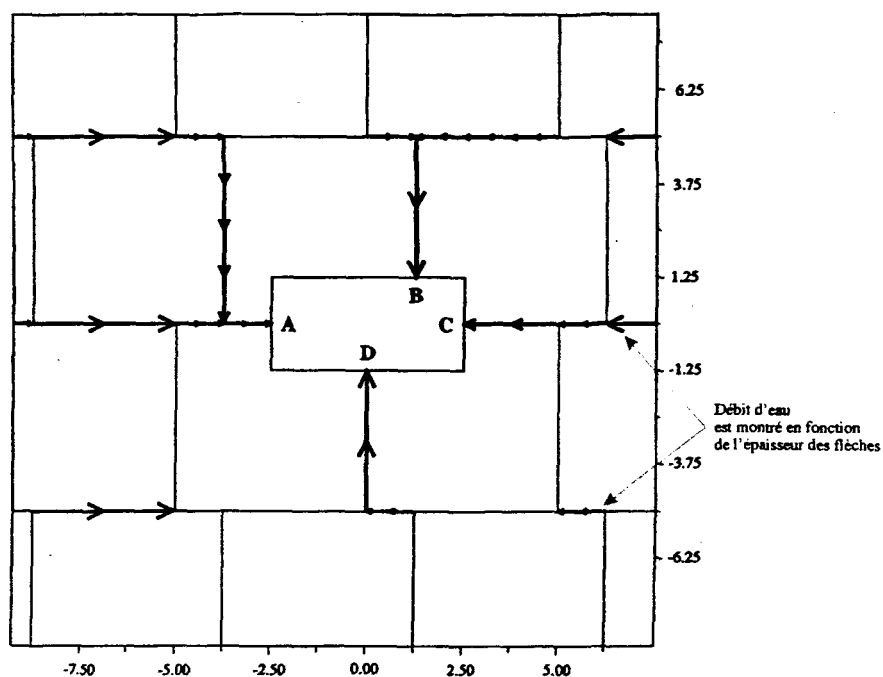


Figure 2.10: Entrée d'eau souterraine à l'intérieur de l'excavation (tiré d'Indraratna et Singh, 1994).

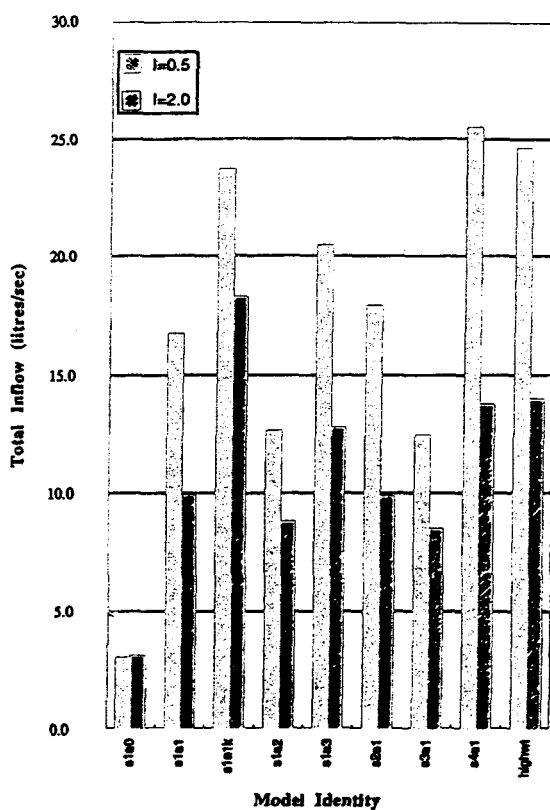


Figure 2.11: Prédiction de la quantité d'entrée d'eau à l'intérieur d'une excavation, basée sur plusieurs modèles de joint ($I = \sigma_r / \sigma_v$) (tiré d'Indraratna et Singh, 1994).

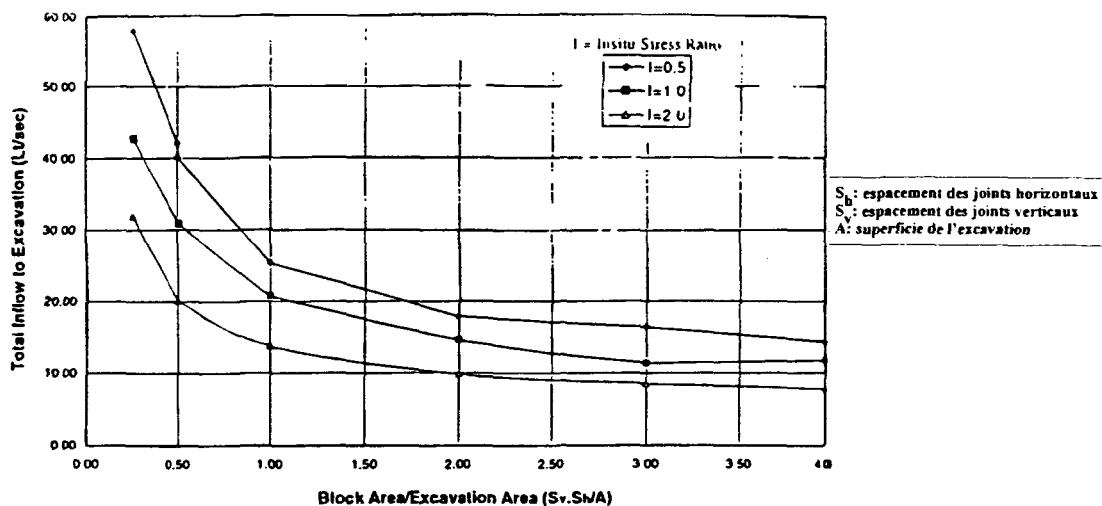


Figure 2.12 : La quantité d'entrée d'eau dans une excavation en fonction du nombre de blocs normalisés (tiré d'Indraratna et Singh, 1994)

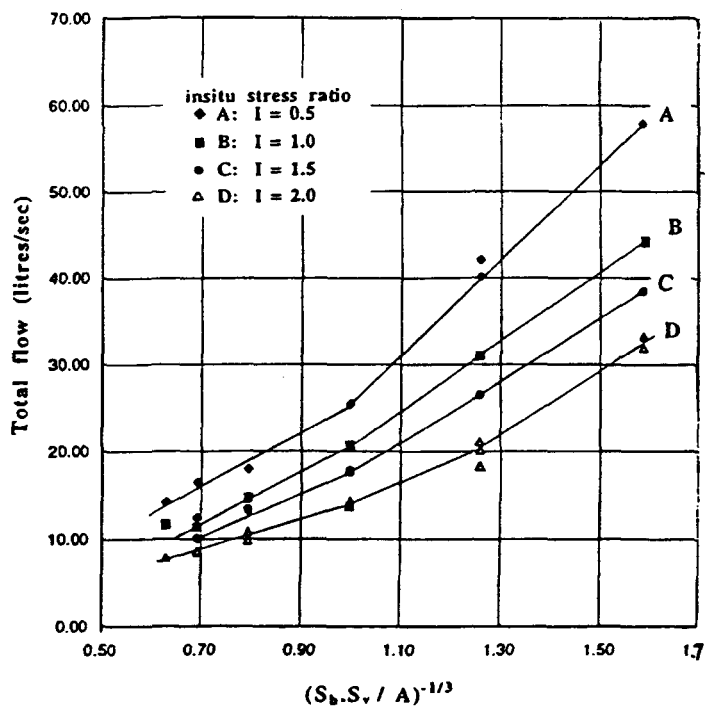


Figure 2.13 : Effet des paramètres des joints et du rapport des contraintes in-situ sur l'écoulement total (tiré d'Indraratna et Singh, 1994)

c) *Approche des éléments joints (ROCMAS)*

Noorishad et al. (1982; 1992) ont développé l'approche des éléments joints, dans le logiciel appelé ROCMAS, qui permet d'étudier le phénomène de couplage entre les contraintes mécaniques et l'écoulement d'un fluide dans un milieu poreux, fracturé et saturé. Un deuxième logiciel, nommé ROCMASII, a été élaboré également par Noorishad et al. (1992) pour résoudre les équations matricielles fortement non linéaires.

Le comportement hydraulique d'un milieu poreux fracturé sous certaines conditions est formulé par deux types d'équations: l'une exprimant l'écoulement dans le milieu poreux (l'élément poreux) élastique, l'autre, l'écoulement dans les fractures (l'élément de fracture).

La méthode des éléments joints est une approche numérique utile pour traiter quelques discontinuités majeures, telles que les failles; les travaux de Noorishad et al. (1982; 1992) et de Rutqvist et al. (1992) en sont des exemples. Il n'est pas pratique, cependant, de représenter toutes les discontinuités (fractures) par des éléments joints. En outre, bien que les petits joints ne puissent jouer un rôle dominant individuellement, ils tendent à être connectés pour créer un patron d'écoulement majeur.

À titre d'exemple, Noorishad et al. (1992) ont étudié l'effet de la perturbation des contraintes mécaniques autour d'une excavation minière sur l'écoulement des eaux souterraines. Ils ont simulé cet effet en suivant la variation de la pression hydraulique dans

les fractures verticales pendant et après l'excavation d'une galerie (figure 2.14). La pression hydraulique atteint des valeurs quatre fois plus grande que sa valeur naturelle.

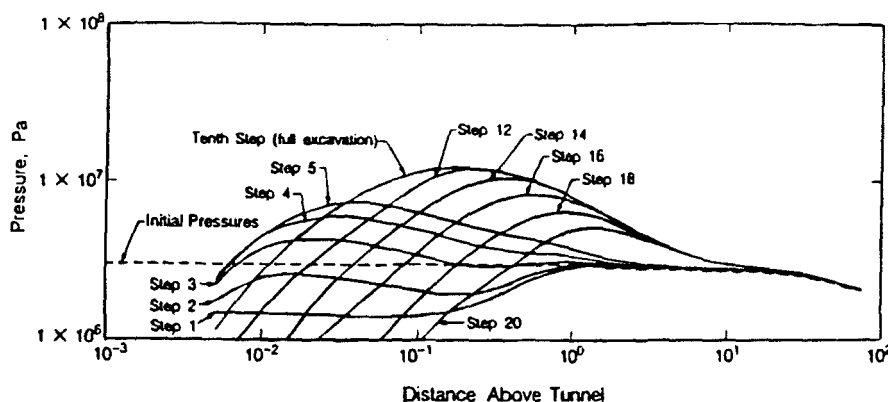


Figure 2.14: Évolution de la pression à l'intérieur des fractures verticales durant le percement d'un tunnel (Noorishad et al., 1992).

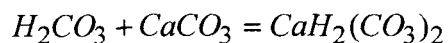
2.2.2 *Processus hydrochimiques*

Dyke (1995) a étudié l'effet chimique sur la perturbation de la perméabilité d'un massif rocheux constituant des réservoirs naturels d'hydrocarbure. Il souligne que dans des réservoirs d'hydrocarbure la perméabilité des fractures ne diminue pas nécessairement avec l'augmentation des contraintes effectives. La dissolution ou la cimentation partielle des minéraux de remplissage à l'intérieur des plans des fractures s'avère y jouer un rôle primordial. En effet, Dyke (1995) explique que les fractures peuvent rester ouvertes de

plusieurs millimètres et demeurer très conductrices même sous des conditions de contraintes *in situ* élevées.

Dans le but de protéger certains dykes contre l'importante agressivité de l'eau, Hakami et al. (1991) ont réalisé des expériences d'injection d'eau saturée en hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) dans des trous de forage. Ils ont constaté un effet secondaire qui est la précipitation de la calcite dans les joints, ce qui les a encouragé à prendre en considération les phénomènes chimiques pouvant aider à étancher les joints dans un massif rocheux sous un barrage, et contrôler ainsi les fuites d'eau.

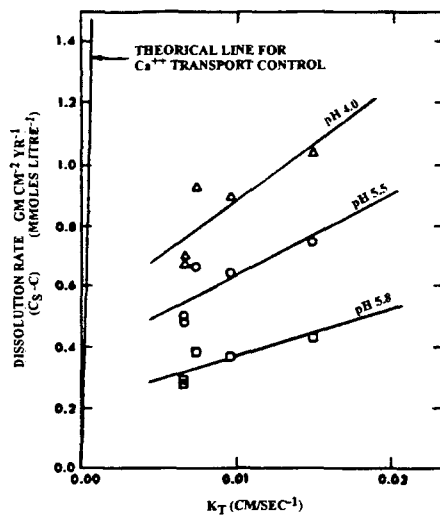
D'un autre côté, Talobre (1967) décrit le comportement du calcaire dans l'eau. Il explique que le carbonate de calcium est à peu près insoluble dans l'eau. L'altération des calcaires qui prend les apparences d'une dissolution n'est que l'action chimique du gaz carbonique présent dans le sol. En effet, en milieu humide et en présence d'oxygène, le gaz a le comportement de l'acide carbonique. Ce dernier attaque le calcaire suivant la réaction:



Le produit de la réaction étant soluble, d'après Talobre, il suffit de 44 g de gaz carbonique pour enlever à la roche 100g de CaCO_3 . Il est, par conséquent, important de mentionner que la vivacité de l'attaque dépend de la surface de contact avec l'eau (dans notre cas, la surface de la fracture), de la vitesse de circulation de l'eau souterraine et de sa teneur en CO_2 .

Les équations fondamentales de la dissolution de la calcite décrites dans Sjöberg (1976) et Plummer et Wigley (1976) tiennent compte essentiellement de la variation de la concentration des ions Ca et CO_3^{2-} par rapport au temps. D'autres paramètres ont un effet sur ce taux de dissolution, entre autres le pH de l'eau (Sjöberg et Richard, 1984), le volume d'eau écoulé et la surface de contact de la calcite (Plummer et Wigley, 1976; Dreybrodt et al., 1996), et la température (Golubev et Garibyants, 1971; Sjöberg et Richard, 1984). Par ailleurs, la présence de certains ions, tels que les métaux, peut ralentir les réactions de dissolution de la calcite (Plummer et Wigley, 1976).

En effet, le taux de dissolution de la calcite augmente avec la diminution du pH de l'eau (Plummer et Wigley, 1976) (figure 2.15). Ce taux de dissolution peut varier beaucoup dans un petit intervalle de pH et dans une condition de température basse entre 0 à 35 °C (Morse, 1974). La figure 2.16 tirée de Hakami et al. (1991) montre l'influence de la température sur le produit de solubilité de la calcite. Par ailleurs, Plummer et Wigley (1976) mentionnent l'importance des processus de transport et de réactions de surface sur la dissolution de la calcite (figure 2.17).



C_s : concentration d'équilibre à la surface
 C : concentration à la surface à un temps donné
 $C_s - C$: déficit de saturation en Ca
 K_T : coefficient de transport de masse
 $= \text{flux de masse} / (C' - C)$ avec C' concentration à la surface et C concentration dans la solution.

Figure 2.15: Influence du pH sur le taux de dissolution de la calcite (tiré de Plummer et Wigley 1976).

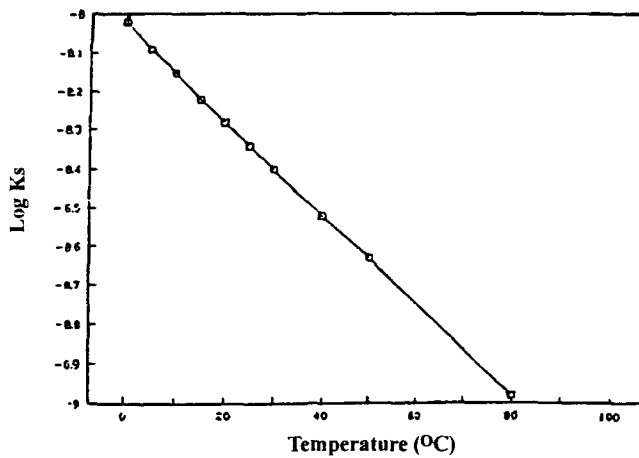
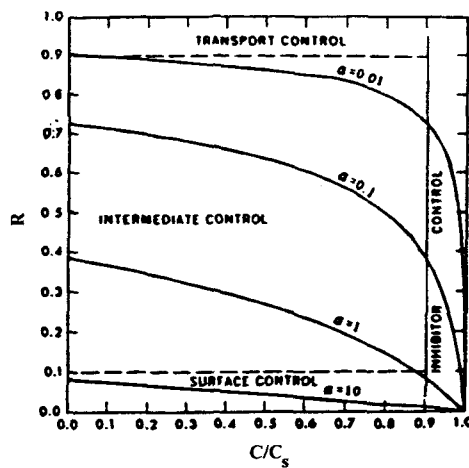


Figure 2.16: Influence de la température sur le produit de solubilité de la calcite (tiré de Hakami et al. 1991).



R : flux de mass/flux de mass contrôlé par le transport
 α = est l'importance relative des effets du taux de réaction de surface et du taux de transport
 pour $\alpha=0.01$, dissolution contrôlée principalement par le taux de transport
 C_s : concentration d'équilibre à la surface
 C : concentration à la surface à un temps donné

Figure 2.17: Taux de dissolution de la calcite en fonction du taux de réaction de surface et du taux de transport (tiré de Plummer et Wigley 1976).

3 CONCLUSION DE LA PARTIE I

La plupart des travaux sur le couplage des processus à l'échelle d'une fracture ou d'un massif rocheux sont réalisés, le plus souvent sur le coupage des processus hydrauliques et mécaniques. Ces travaux ont eu pour objectif d'étudier l'effet des contraintes mécaniques sur le comportement hydraulique des fractures. Quelques travaux ont cependant démontré l'important effet des processus chimiques sur le comportement hydrauliques des fractures, d'où l'importance de considérer ce type de processus lors d'une étude sur le couplage des processus. La température est un autre paramètre à tenir en compte étant donné son influence sur les réactions chimiques entre l'eau et les minéraux de remplissage des fractures, en particulier les carbonates.

**PARTIE II : CARACTÉRISATION HYDROGÉOLOGIQUE ET
PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE DU SITE D'ÉTUDE**

4 PROBLÉMATIQUE SPÉCIFIQUE LIÉE À LA MINE BOUCHARD-HÉBERT

Un site de mine en exploitation constitue un contexte approprié pour l'étude du couplage des processus hydrauliques, chimiques, mécaniques et thermiques. En effet, dans un tel contexte les contraintes mécaniques dans le massif rocheux ainsi que le régime d'écoulement des eaux souterraines sont perturbés; le premier par les excavations et le deuxième par le pompage pour maintenir les excavations à sec. Du point de vue géochimique, les eaux souterraines dans un tel contexte se trouvent aussi affectées par la présence de l'air et souvent aussi par l'enfouissement de résidus.

Le site utilisé pour cette recherche sur les phénomènes de couplage des processus chimiques, hydrauliques et mécaniques dans un massif rocheux est celui de la mine Bouchard-Hébert en Abitibi. Avant d'entamer la problématique liée au site de la mine Bouchard-Hébert, il est opportun d'introduire son contexte géographique, historique et géologique.

4.1 LOCALISATION ET HISTORIQUE

La propriété de la mine Bouchard-Hébert, connue aussi sous le nom de Mobrún, est localisée dans le Canton Dufresnoy, à quelque 30 km au nord-est de Rouyn-Noranda au Québec (figure 4.1). Elle est située près de la limite de roches volcaniques archéennes du groupe de Blake River, partie intégrante de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi de la

province du Supérieur (Baragar 1968; Gélinas et al. 1984) (figure 4.2). Les premiers dépôts de sulfures massifs, constituant la lentille principale, ont été découverts en 1954 par *Rio Canadian Exploration Ltd* à l'aide de relevés électromagnétiques. L'exploitation a débuté par la mine à ciel ouvert pour exploiter la lentille principale et a continué par la suite sous terre pour des lentilles satellites. Une deuxième lentille (lentille 1100) plus profonde, à quelques 250 m au sud de la lentille principale, a été découverte vers 1987 par Ressources Audrey à l'aide de forages d'exploration en surface. Alors que les réserves des lentilles principale et satellites se sont épuisées vers 1992, l'exploitation de la lentille 1100 a débuté sous terre avec la naissance d'une nouvelle mine.

4.2 GÉOLOGIE RÉGIONALE

Les masses minéralisées sont englobées dans la formation Renault qui est limitée au nord et au sud par les roches de la formation Destor (figure 4.2). La formation Renault est formée d'unités massives et fragmentaires de composition rhyolitique et andésitique (Gélinas et al., 1977, 1984; Trudel, 1979), qui ont une direction NO-SE et un pendage subvertical vers le nord à l'approche des dépôts. La partie inférieure de la stratigraphie dans la propriété de Mobrún commence avec l'unité rhyolitique de Copper Hill qui est superposée par des séries andésite-rhyolite-andésite et de l'unité de roches pyroclastiques felsiques, qui contiennent la lentille 1100 (figures 4.3).

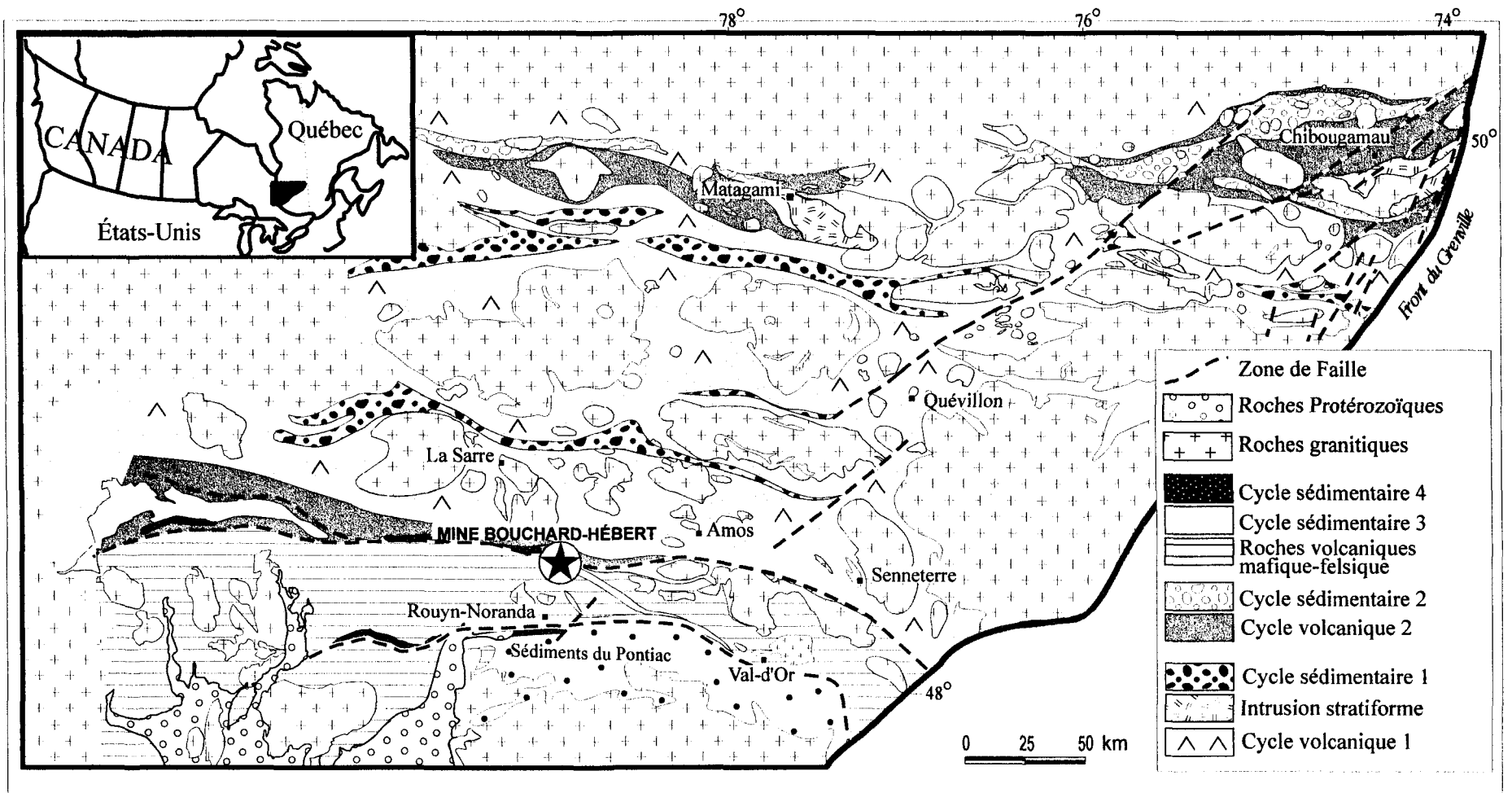


Figure 4.1 : Carte géologique de l'Abitibi montrant la localisation de la mine Bouchard-Hébert (modifié de Dion et Guha, 1994).

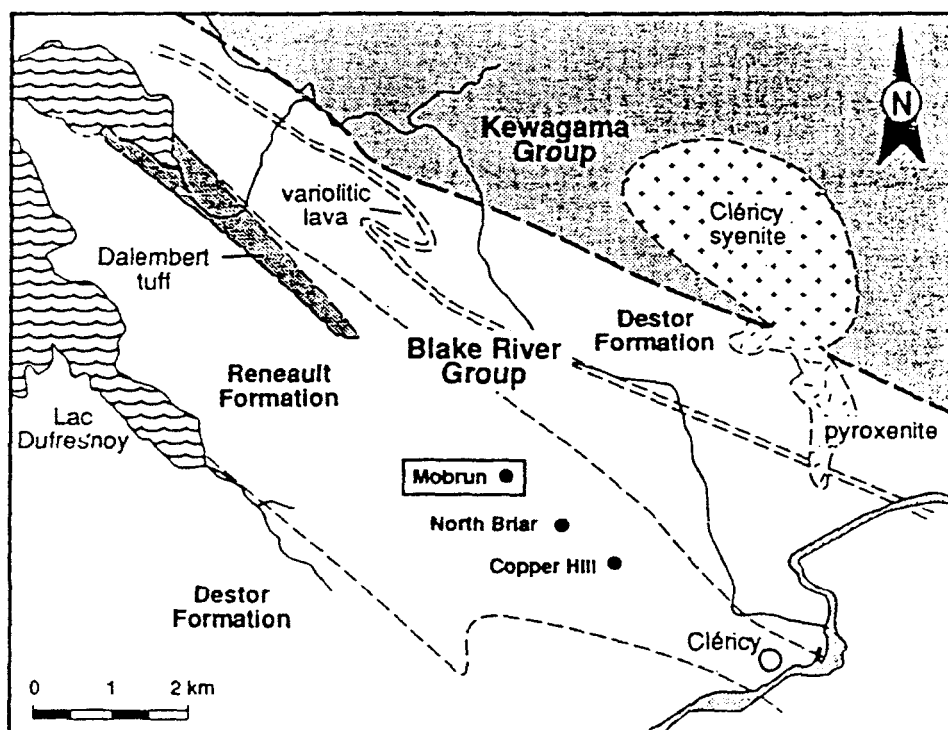


Figure 4.2 : Géologie générale dans la région de la mine Bouchard-Hébert
(tiré de Barret et al., 1992)

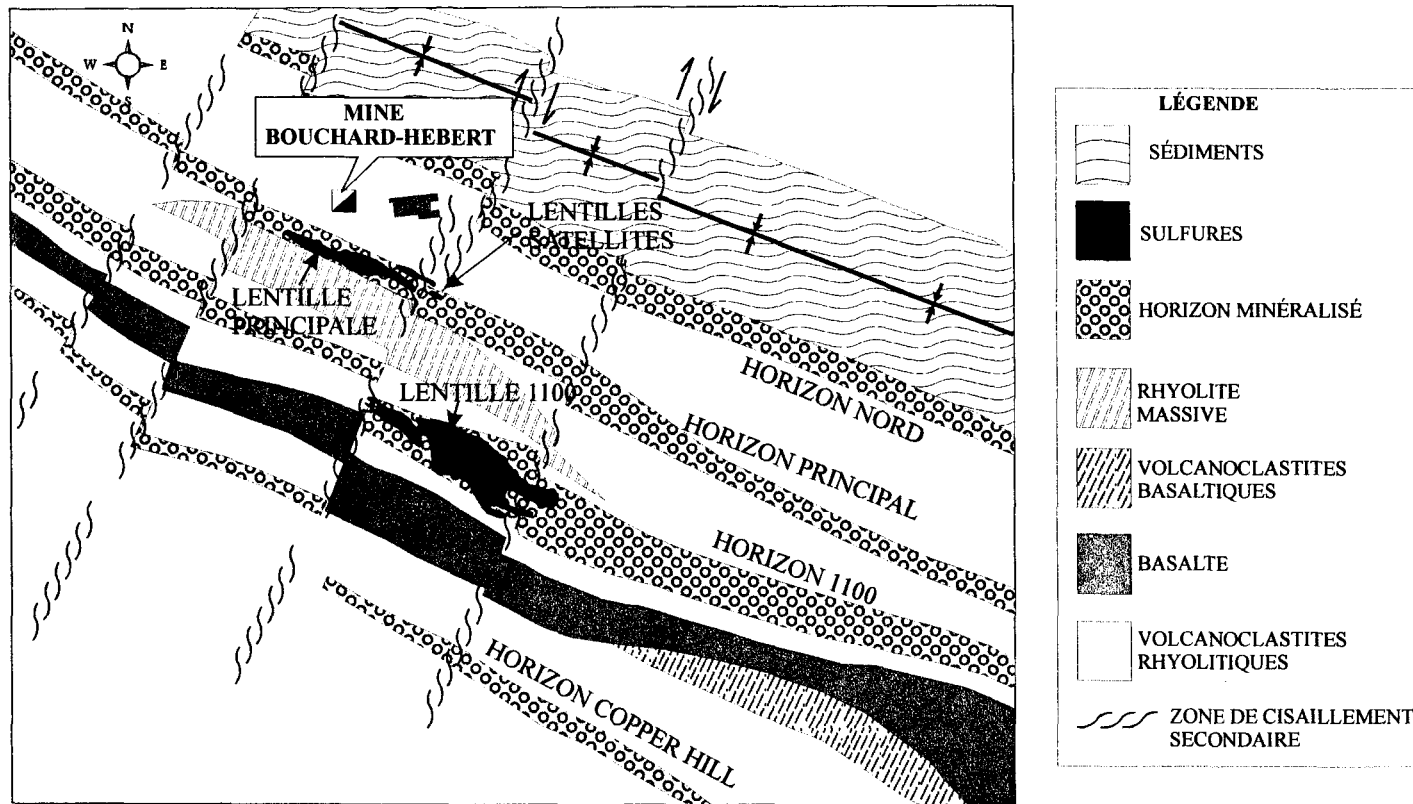


Figure 4.3: Géologie locale de la mine Bouchar-Hébert (adapté de Barret et al., 1992)

4.3 GÉOLOGIE LOCALE

La propriété de Mobrún (Bouchard-Hébert) est traversée par quatre zones de cisaillement subverticales orientées à 110° correspondant à des horizons minéralisés différents (figure 4.3). Nous retrouvons du nord au sud: l'horizon nord, l'horizon principal, l'horizon de la Lentille 1100 (North Briar) et l'horizon Copper Hill. La lentille supérieure ou principale, et la Lentille 1100 se retrouvent à l'intérieur des horizons du même nom. Les quatre zones de cisaillement sont caractérisées par une augmentation progressive de l'intensité de la déformation qui s'exprime par une schistosité pénétrative parallèle à la stratigraphie.

La Lentille 1100 et les unités adjacentes ont une orientation de 110° à 120° avec un pendage subvertical vers le sud. Il y a six unités lithologiques présentes dans un intervalle de 250 mètres de part et d'autre de la Lentille 1100. Du sud au nord, et de la plus ancienne unité vers l'unité la plus jeune (figures 4.3 et 4.4), nous retrouvons les unités suivantes:

- Coulées andésitiques: cette unité est composée de laves intermédiaires à basiques ayant une épaisseur de 80 à 100 mètres.
- Coulées rhyolitiques: cette unité recouvre l'andésite, mais s'amincit considérablement en profondeur. Le flanc nord de cette rhyolite a un pendage variable dû à la présence d'une épaisse unité pyroclastique qui est l'hôte de la Lentille 1100.

- Pyroclastites intermédiaires à felsiques: cette unité hétérogène est composée de différentes coulées pyroclastiques et de petites unités rhyolitiques.
- Sulfures massifs: les sulfures sont constitués de 85% de pyrite à grains fins à moyens contenant de 5 à 15% de sphalérite, et de 1 à 5% de chalcopyrite à grains fins.
- Rhyolite massive: cette unité de 250 mètres d'épaisseur recouvre la Lentille 1100.

La lentille principale et des lentilles satellites, plus petites et distribuées en échelon, sont sus-jacentes à ces unités lithologiques. Elles ont donné lieu aux anciennes exploitations de la mine. Elles ont comme hôte l'unité de roches pyroclastiques felsiques fortement schistosée, qui est superposée au nord par une unité de rhyolite massive (Barrett et al., 1992). Au nord de cette dernière, on trouve l'unité pyroclastique andésitique de Dalembert.

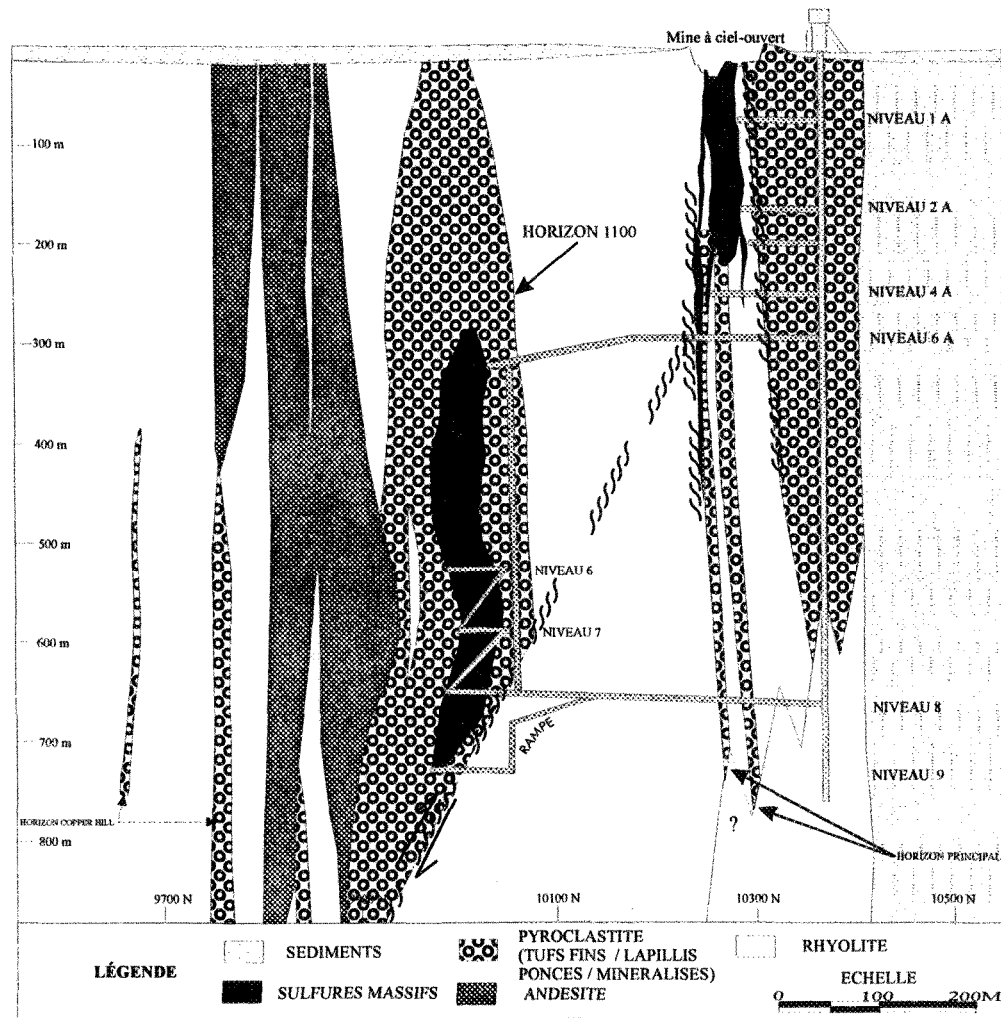


Figure 4.4: Section composite (11025E) de la mine Bouchard-Hébert (adapté de Ruel, 1995)

4.4 PROBLÉMATIQUE

L'un des problèmes majeurs qui affectent une exploitation minière située dans un contexte de roches sulfurées, tel est le cas de la mine Bouchard-Hébert, est la qualité des eaux souterraines qui y circulent. L'eau qui se trouve dans ce contexte entre en contact avec les minéraux sulfurés qui s'oxydent en présence d'oxygène. Les produits d'oxydation des minéraux sulfurés sont l'acide sulfurique et les métaux solubles (Fernandez-Rubio et al., 1987).

Ladwing (1985) a souligné que, dans une mine inondée, la qualité de l'eau s'améliore et son pH augmente, car l'eau acide, emmagasinée dans une ancienne mine, est remplacée par l'eau souterraine naturelle suivant un processus lent qui peut durer plusieurs années. Il a pu constater qu'une grande quantité des métaux issus de l'oxydation des sulfures a été réduite grâce à ces eaux souterraines dont le pH a augmenté jusqu'à la neutralité.

À la mine Bouchard-Hébert, l'ancienne mine n'est pas ennoyée actuellement. Le maintien hors de l'eau de ses excavations favorise la présence de l'air avec l'eau, ce qui accentue les processus d'oxydation des minéraux sulfurés et la génération continue de l'acidité. De plus, l'ancienne mine à ciel ouvert, en partie remplie par du stérile (riche en

sulfures), constitue un milieu propice pour la production d'eau acide; cette eau pouvant s'infiltrer par la suite à l'intérieur de la mine.

Il nous semble "a priori" que les eaux souterraines acides dans les excavations de l'ancienne mine pourraient avoir un effet notable sur la perméabilité du massif rocheux fracturé qui les séparent des excavations de la nouvelle mine, puisque ses fractures sont en partie ou majoritairement remplies par des matériaux carbonatés, tels que la calcite. La cinétique de dissolution de ce minéral, et aussi d'autres minéraux carbonatés qui sont possiblement présents comme minéraux de remplissage de fractures, est donc un paramètre à prendre en compte. Elle peut varier beaucoup dans un petit intervalle de pH et dans une condition de température basse entre 0 à 35 °C (Morse, 1974). La température est donc aussi un paramètre à considérer puisqu'elle affecte la cinétique des réactions chimiques entre les minéraux de remplissage des fractures et les eaux qui y percolent, surtout lorsqu'il s'agit de minéraux carbonatés. Il est à noter aussi que le gradient géothermique résulte en une augmentation de la température d'environ 30°C par km de profondeur dans la croûte (Lewis, 1990). Les études sur la cinétique de dissolution de la calcite sont généralement menées dans les conditions de température ambiante et avec différentes solutions d'injection, à base de HCl ou de H₂SO₄. Par ailleurs, Sjöberg et Richard (1983) mentionnent la problématique de la variation des résultats du taux de dissolution de la calcite en fonction du type de protocole expérimental utilisé.

À la mine Bouchard-Hébert, la galerie du niveau 6A représente un endroit approprié pour la caractérisation hydrogéologique de la partie du massif rocheux séparant les anciennes excavations des nouvelles plus profondes, et la plus susceptible d'être affectée par les perturbations hydrogéomécaniques et géochimiques.

5 ÉTUDE HYDROGÉOCHIMIQUE

L'étude hydrogéochimique a été réalisée dans le but d'évaluer la qualité des eaux souterraines à différents endroits de la mine Bouchard-Hébert et en particulier dans le massif rocheux séparant l'ancienne mine de la nouvelle mine.

5.1 ÉCHANTILLONNAGE ET MÉTHODE D'ANALYSE DES EAUX

Une campagne d'échantillonnage et d'analyse d'eau a été exécutée dans plusieurs niveaux de la mine Bouchard-Hébert durant l'été 1997 (figure 5.1), incluant l'eau à la sortie des barricades des anciennes excavations au niveau 6A de la mine, l'eau dans les réservoirs d'eau des pompes au niveau 6A, l'eau provenant de trous de forage et l'eau coulant des fractures. Les mesures physico-chimiques qui ont été réalisées lors de l'échantillonnage des eaux à la mine comprennent le pH, le Eh, le O₂ dissout, la température et la conductivité électrique. Des analyses chimiques plus détaillées ont été exécutées au laboratoire, à savoir l'analyse des cations par la méthode d'absorption atomique (K, Na, Mg, Zn, Sr, Ca, Mn, Fe et Cu) et des anions par la méthode de titration ou de spectrophotocolorimétrie (alcalinité, Cl et SO₄).

5.2 RÉSULTATS HYDROGÉOCHIMIQUES

Les résultats de calcul d'équilibre de charges électriques des échantillons d'eau prélevés à la mine (Tableau 5.1) montrent un déséquilibre variant entre 5 % et 90 %. Les résultats des analyses chimiques (cations et anions) des échantillons dont le déséquilibre de charges est supérieur à 15 % n'ont pas été considérés dans l'interprétation. Les six résultats dont le déséquilibre de charges est plus faible que 15 % suffisent pour appuyer le volet chimique du protocole expérimental décrit au chapitre 10. Dans la majorité des cas, le déséquilibre de charges est dû à un excès de charges positives. Ce déséquilibre serait liée à la méthode d'analyses chimiques des ions (analyse tardive des ions bicarbonates et dilution des échantillons concentrés).

Les résultats hydrogéochimiques (Tableau 5.1) démontrent une large variété de types d'eau à la mine Bouchard-Hébert allant d'une eau acide à une eau neutre. L'eau provenant des barricades au niveau 6A est la plus acide avec des valeurs de pH d'environ 2 (échantillon no. 1). Cette eau a une forte conductivité électrique, elle est riche en SO_4 et en métaux, tels que Fe, Zn, Cu, Mg et Mn. Elle a aussi des concentrations plus élevées en Cl et Ca. La chimie de cette eau témoigne du phénomène important d'oxydation des minéraux sulfurés contenus dans les résidus utilisés comme remblais dans les anciennes excavations;

cette oxydation est responsable de la génération de l'acidité et de l'enrichissement des eaux en métaux. Les eaux des barricades sont acheminées vers les réservoirs d'eau du niveau 6A. Le pH de l'eau échantillonnée dans ces derniers (échantillons no. 9 et 10) est un peu moins acide (environ 2,8 à 3) dû à leur dilution par les eaux pompées des niveaux inférieurs. Le résultat de l'échantillon 9 d'un des réservoirs d'eau montre des concentrations moins élevées en ions, tels que le SO_4 et les métaux. Cette faible concentration en ions dans cette eau serait due aussi à la dilution de cette eau par les eaux pompées des niveaux inférieurs. Comme les résultats de Chapman et al. (1983) le montrent dans une autre étude, les métaux peuvent précipiter au fond du réservoir.

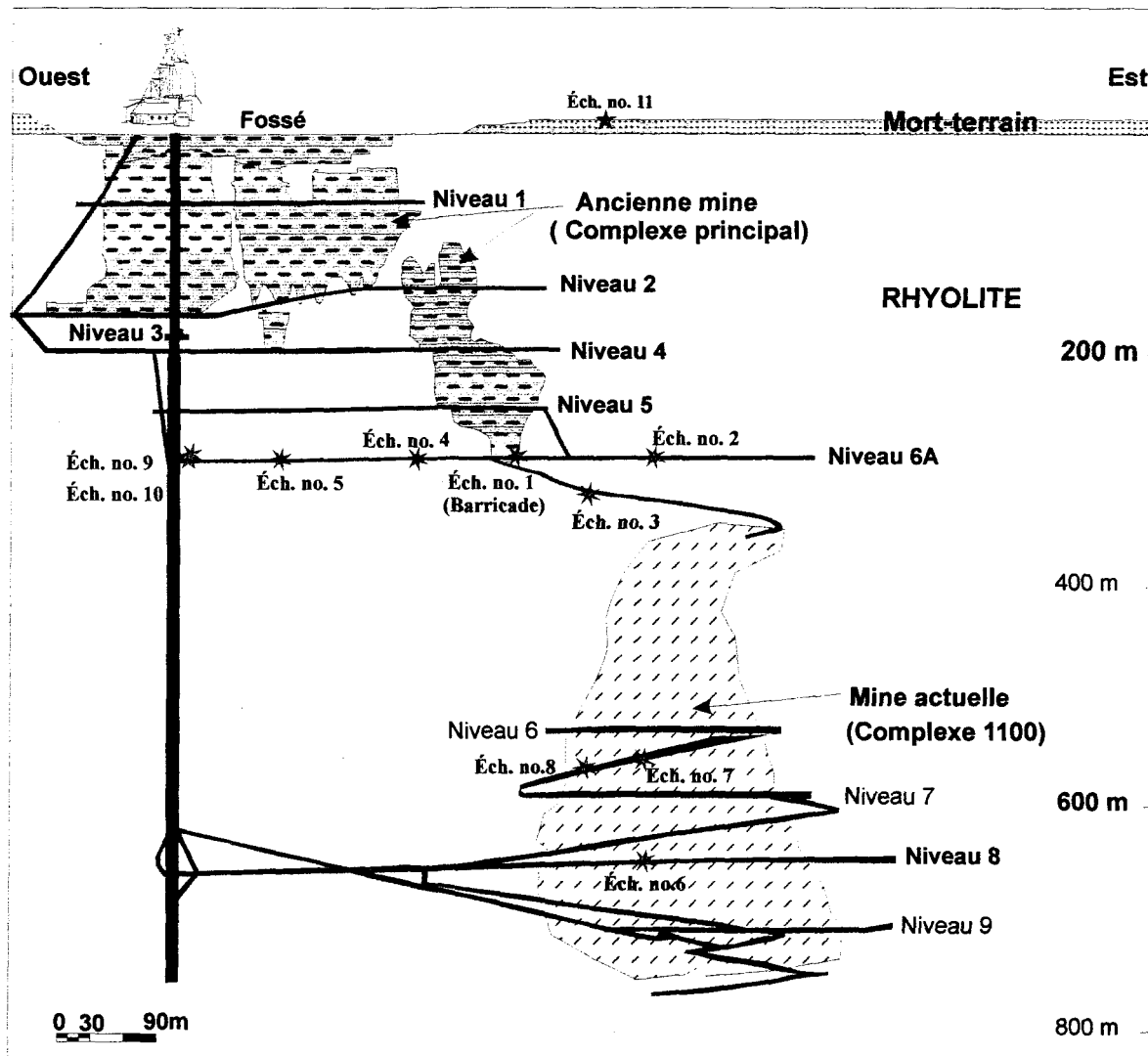


Figure 5.1: Localisation des échantillons d'eau souterraines dans une coupe longitudinale regardant vers le nord de la mine Bouchard-Hébert (modifiée de Ruel, 1995).

Tableau 5.1: Résultats hydrogéochimiques à la mine Bouchard-Hébert.

Échantillon	T °C	TSD (g/l)	pH	Eh (mV)	O ₂ dissout (mg/l)	Alc. tot. (mg/l de CaCO ₃)	K (ppm)	Na (ppm)	Mg (ppm)	Zn (ppm)	Sr (ppm)	Cl (ppm)	SO ₄ (ppm)	Ca (ppm)	Mn (ppm)	Fe (ppm)	Cu (ppm)	Déséquilibre de charges %
no. 1 (Barricade Niv. 6A)	11.1	8.96	2.00	397	241	<1	0.1	19	500	4500	<0.1	2200	29270	590	128	8400	1820	8
no. 2 *(90-TP3 Niv. 6A)	8.4	0.63	7.64	-200	10	92	3.3	125	20	<0.1	9.7	56	394.2	111	<0.1	0.2	<0.1	5
no. 3 *(90-11-66; rampe Niv.6A)	11.5	0.15	7.44	156	16	109.2	1.6	18	8	<0.1	0.4	2.8	20.9	30	<0.1	<0.1	<0.1	5
no. 4 (10254N,10824E; Fracture Niv.6A)	12.6	0.20	7.01	145	18	99.2	2.4	63	7	1.3	0.4	8	68.19	31	<0.1	0.7	<0.1	18
no. 5 (10289N,10713E; Fracture Niv.6A)	12.9	0.96	7.05	131	25	368.4	3.6	120	110	0.1	5.4	6.2	672.2	380	1.6	0.2	<0.1	21
no. 6 *(90-11-36; Niv.8)	12.8	0.77	7.30	220	21	64	1.7	80	16	0.4	8.2	15.6	586.9	370	0.2	1.9	<0.1	26
no. 7 *(7-85; rampe Niv.6-7)	13.0	1.30	7.26	274	21	38	1.4	150	31	0.8	9.7	39.6	1614	590	0.3	10.2	<0.1	5
no. 8 *(7-82- rampe Niv.6-7)	15.6	1.47	6.48	224	8	10	5.9	120	130	280	7	30.4	96.2	420	13	290	0.2	90
no. 9 (Réservoir pompe Fontaine; Niv. 6A)	18.2	2.24	2.81	447	—	—	57	200	120	400	3	6.4	3078	330	24	250	39	4
no. 10 (Réservoir pompe Waterloo; Niv. 6A)	17.8	1.95	3.07	423	—	—	62	220	120	560	2.5	12.3	1604	380	22	61	18	29
no. 11 (Bassin de sédimentation)	32.1	2.5	3.01	487	—	—	52	210	140	500	1.8	9.1	4525	300	25	510	52	13

* : référence du trou dans la documentation à la mine.

Le résultat des analyses chimiques (cations et anions) des échantillons dont le déséquilibre de charges est supérieur à 15% a été négligé.

Toutes les autres eaux échantillonnées ailleurs dans la mine (échantillons no. 2, 3, 4, 5, 7 et 8) ont un pH en général proche de la neutralité. Le résultat des analyses chimiques des échantillons no. 2, 3 et 7 montre des concentrations beaucoup plus faibles en ions, en particulier pour les métaux, dans ces eaux. Le bassin de sédimentation en surface (échantillon no. 11), où s'accumulent toutes les eaux pompées de la mine, présente à peu près les mêmes caractéristiques chimiques que celles des eaux dans le réservoir du niveau 6A (échantillon no. 9). On remarque donc que l'effet des eaux acides provenant des barricades reste très notable même lorsque ces eaux sont mélangées dans le bassin de sédimentation avec les eaux des niveaux inférieurs dont le pH est généralement proche de la neutralité.

Du point de vue hydrogéochimique, il y a deux types d'eau à la mine. Le premier type d'eau est très acide, avec un pH autour de 2, et riche en métaux, correspondant aux eaux des anciennes excavations. Le deuxième type d'eau montre un pH neutre et est moins riche en métaux, correspondant aux eaux dans le massif rocheux à une certaine distance des anciennes excavations, soit au même niveau 6A ou à un niveau inférieur.

5.3 CAUSES D'ERREURS

Parmi les causes d'erreur liées aux résultats hydrogéochimiques, on peut citer :

- Les erreurs liées aux prises des mesures physico-chimiques des eaux sur le terrain.
À cause des conditions de température froide à la mine (température autour de 12 °C), certains équipements, tels que le pH-mètre, nécessitaient un réétalonnage plus fréquent.
- Les erreurs liées à la méthode d'analyse chimique des eaux au laboratoire (dilution des échantillons concentrés, méthodes de titration, de colorimétrie et d'absorption atomique).

6 CARTOGRAPHIE DES FRACTURES

Dans un contexte de roches massives, comme c'est le cas à la mine Bouchard-Hébert, l'écoulement des eaux souterraines est contrôlé principalement par les discontinuités. Une caractérisation de la fracturation du massif rocheux à la mine Bouchard-Hébert est donc essentielle pour déterminer les principales familles de fractures qui contrôlent cet écoulement, en particulier dans la partie du massif rocheux séparant les anciennes excavations (au-dessus du niveau 6A) et les nouvelles excavations de la mine (sous le niveau 6A). Pour un échantillonnage représentatif, les travaux de cartographie ont été exécutés plus spécifiquement dans la galerie du niveau 6A, niveau intermédiaire entre l'ancienne mine et la nouvelle.

6.1 RÉSULTATS DE LA CARTOGRAPHIE DES FRACTURES

La cartographie des fractures, réalisée durant l'été 1996 et l'été 1997, a consisté à relever toutes les fractures sur le mur nord de la galerie du niveau 6A, dont la longueur de trace est supérieure ou égale à 50 cm. Différents paramètres ont été mesurés, telles que la direction, le pendage, la longueur de trace, l'épaisseur et le type de remplissage, et la terminaison des fractures. Les résultats de cette cartographie sont présentés dans l'annexe 1. Certains

endroits de la galerie 6A n'ont pas été cartographiés étant donné l'altération intense des murs.

6.1.1 Orientation des fractures

La projection stéréographique de l'ensemble des fractures au niveau 6A (figure 6.1), montre un groupe de fractures subverticales ayant des directions variables, un groupe de fractures subhorizontales et un groupe de fractures de direction NE-SO et à pendage intermédiaire.

L'interprétation des résultats d'orientation des fractures est réalisée, par la suite, sur quatre segments de la galerie du niveau 6A. Le long du segment 1 (figure 6.2), on note une famille de fractures subhorizontales, une deuxième famille de fractures subverticales de direction variée, allant de est-ouest à nord-nord-est, et à pendage vers le nord-ouest ou vers le sud-est.

Dans le segment 2, on retrouve à peu près les mêmes familles de fractures que celles identifiées dans le segment 1 à l'exception de la famille de fractures subverticales de direction nord-nord-est et à pendage vers le sud-est qui est presque absente.

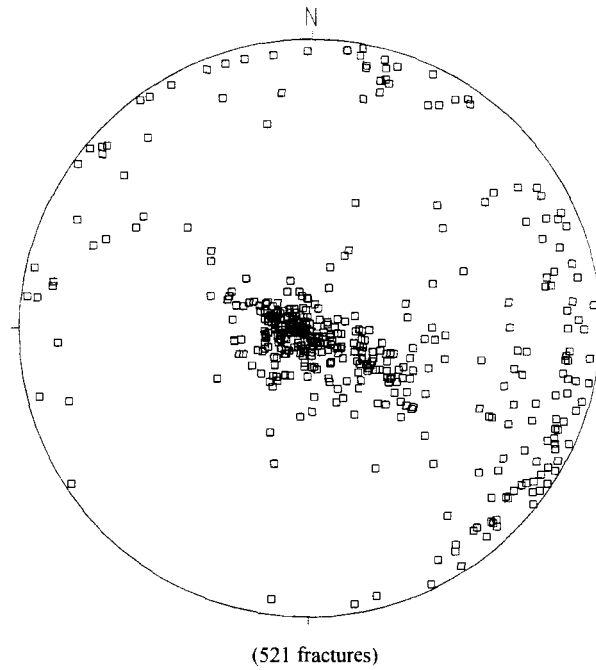


Figure 6.1: Projection stéréographique sur l'hémisphère inférieur des pôles de l'ensemble de fractures mesurées au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.

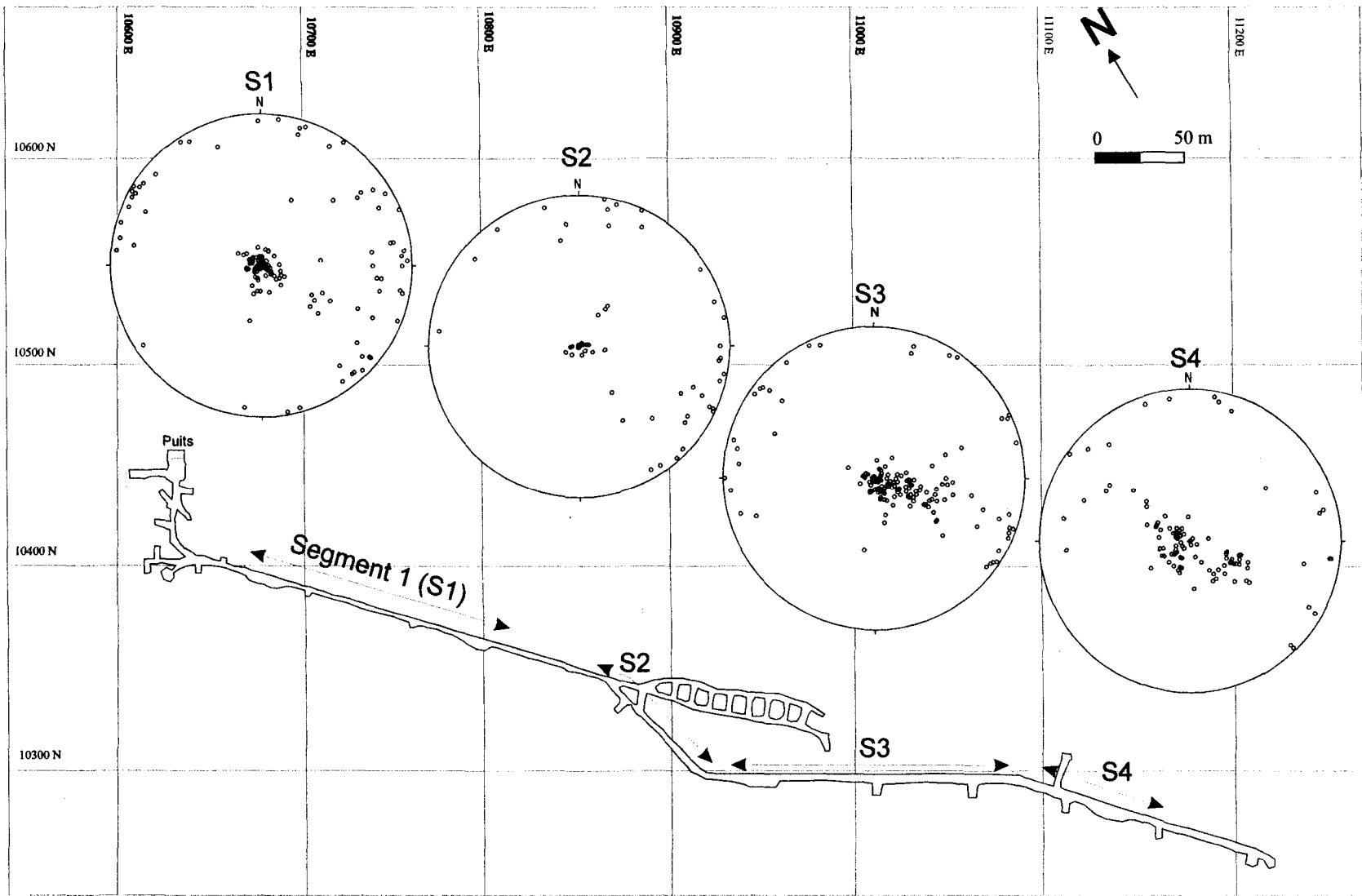


Figure 6.2: Projection stéréographique sur l'hémisphère inférieure des pôles des fractures le long de la galerie au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.

Dans le segment 3, on trouve une famille de fractures de direction nord-nord-est et de pendage variant de 0° à 50° vers l'ouest-nord-ouest; la deuxième famille de fractures est de direction nord-est et subverticale.

Dans le segment 4, il existe une première famille de fractures subhorizontales de pendage variant entre 0° et 30° vers le sud-est, une deuxième famille de direction nord-est et à pendage variant de 20° à 40° vers le nord-ouest. On y retrouve aussi la famille de fractures de direction nord-nord-est et à pendage subvertical vers l'est ou vers l'ouest.

L'analyse de la fracturation le long de la galerie du niveau 6A montre qu'il y a une variation des familles de fractures présentes de l'ouest à l'est de la galerie. Cette variation peut être due en partie à la variation lithologique.

L'analyse de la fracturation selon la lithologie (figure 6.3) montre que, dans la rhyolite, on rencontre toutes les familles de fractures retrouvées le long de la galerie: une famille de fractures subhorizontales, une deuxième famille de direction nord-nord-est et à pendage entre 10° et 40° vers le nord-ouest et une autre famille de fractures de direction est-ouest et subverticales.

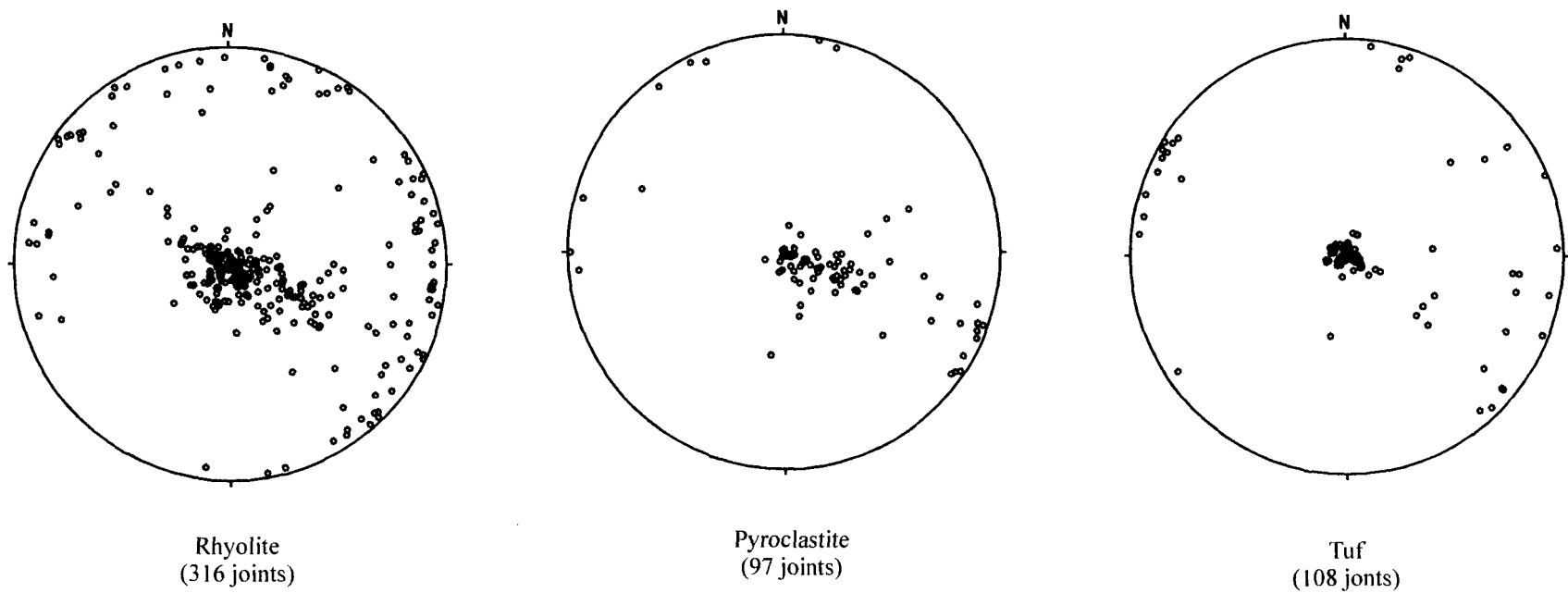


Figure 6.3: Projection stéréographique sur l'hémisphère inférieure des pôles des fractures selon la lithologie au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.

Dans la pyroclastite et le tuf, on retrouve moins de familles de fractures. Dans le cas de la pyroclastite, la famille de fractures subhorizontales est présente, ainsi que celle de direction nord-est et dont le pendage varie entre 10° et 40° vers le nord-ouest. La famille de fractures subverticales de direction nord-nord-est est peu présente. Dans le tuf, par contre, la famille de fractures subverticales de direction nord-nord-est est un peu plus abondante. La famille de fractures subhorizontales est aussi présente.

Un troisième type d'analyse consiste à étudier la fracturation selon la lithologie et la localisation le long du niveau 6A de la mine (figure 6.4). On note une variation du nombre de familles de fractures d'une lithologie à une autre et d'une zone à une autre à l'intérieur d'une même lithologie. La famille de fractures subhorizontales est toujours présente de l'ouest à l'est du niveau 6A. Les fractures subverticales varient en direction et la famille de fractures de direction nord-est et à faible pendage (10° à 40°) est parfois absente.

On remarque qu'en général les fractures subverticales sont moins présentes que les fractures subhorizontales, et ceci malgré le biais d'orientation qui défavorise ces dernières dans le cas de cartographie de galeries horizontales. Ceci est peut être dû à la présence d'une foliation subverticale abondante à la mine qui masquerait les fractures subverticales. Une deuxième hypothèse serait tout simplement que les fractures subverticales sont moins présentes en réalité.

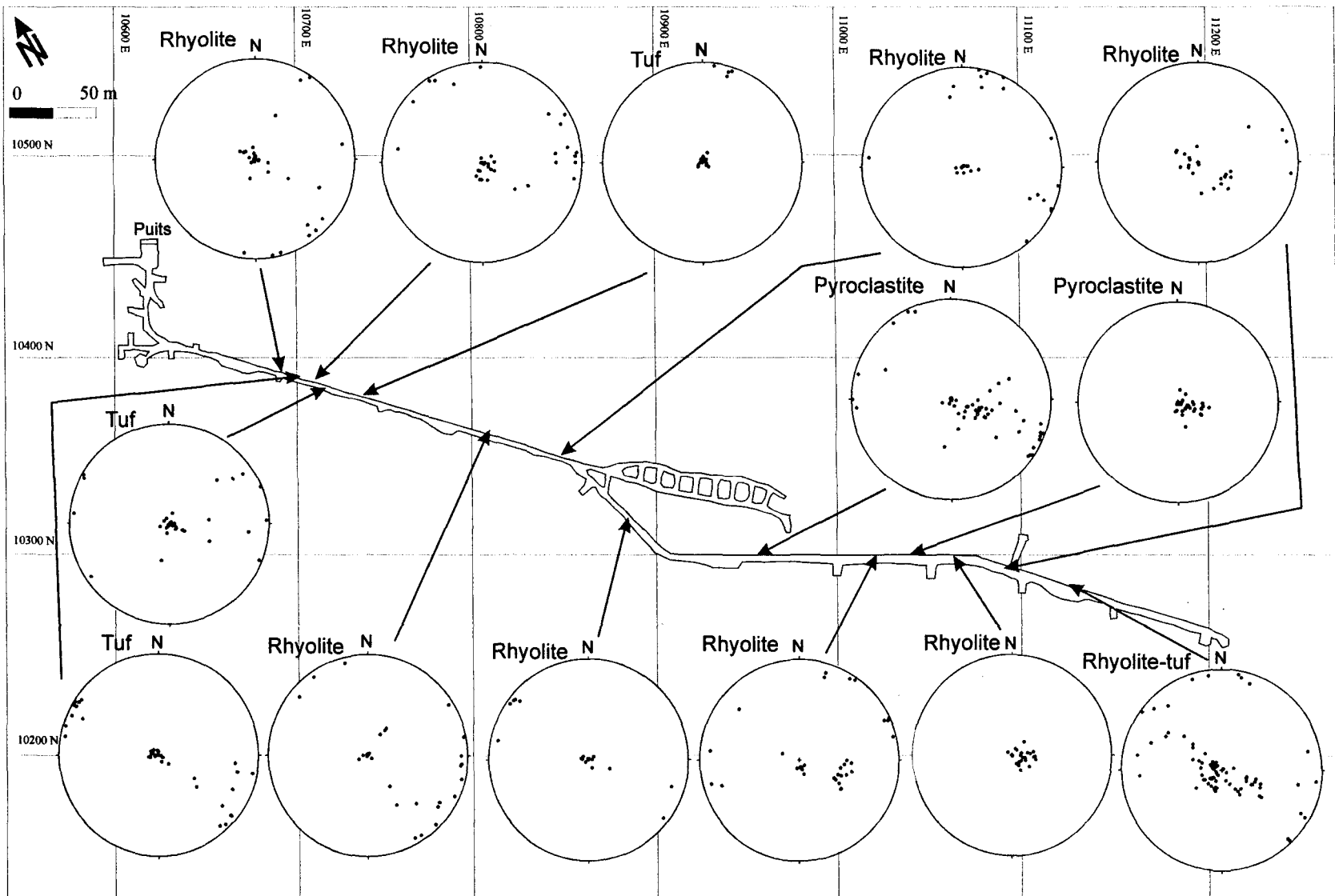


Figure 6.4: Projection stéréographique sur l'hémisphère inférieure des pôles des fractures selon la lithologie et la localisation au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.

6.1.2 Densité des fractures

Une des méthodes d'estimation de la densité de fractures est le calcul de la longueur cumulée des traces de fractures divisée par la superficie d'une face de mesure (Dershowitz & Herda, 1992). Dans notre cas, nous avons choisi d'analyser les données par maille de 3m x 3m étant donnée la hauteur des murs des galeries d'environ 3 m. Les données pourraient être affectées par un biais de troncature puisque les fractures dont la longueur de trace est inférieure ou égale à 0,5 m n'ont pas été cartographiées. Cependant, ces petites fractures n'ont probablement pas un rôle hydraulique important puisqu'elles semblent constituer des fractures isolées. De plus, pour les joints dont la trace dépasse les limites du mur de la galerie, la longueur de trace ne peut être déterminée. Ces dernières fractures forment un seul groupe de fractures dont la longueur de trace est supérieure ou égale à 3 mètres.

La densité de fractures a été calculée sans tenir compte de l'orientation des fractures. Elle est représentée sous forme d'histogrammes le long du niveau 6A de la mine (figure 6.5). Elle est variable le long de la galerie 6A avec une valeur maximale ne dépassant pas $6,5 \text{ m}^{-1}$. On peut noter cependant que cette densité est en général plus élevée à l'ouest qu'à l'est, passant d'une gamme de densité de 1 à 6 m^{-1} à environ 1 à 4 m^{-1} respectivement. La variation lithologique le long de ce niveau serait une cause de la variabilité de la densité de fracture puisque les pyroclastites et le tuf présentent moins de fractures que la rhyolite (annexe 1).

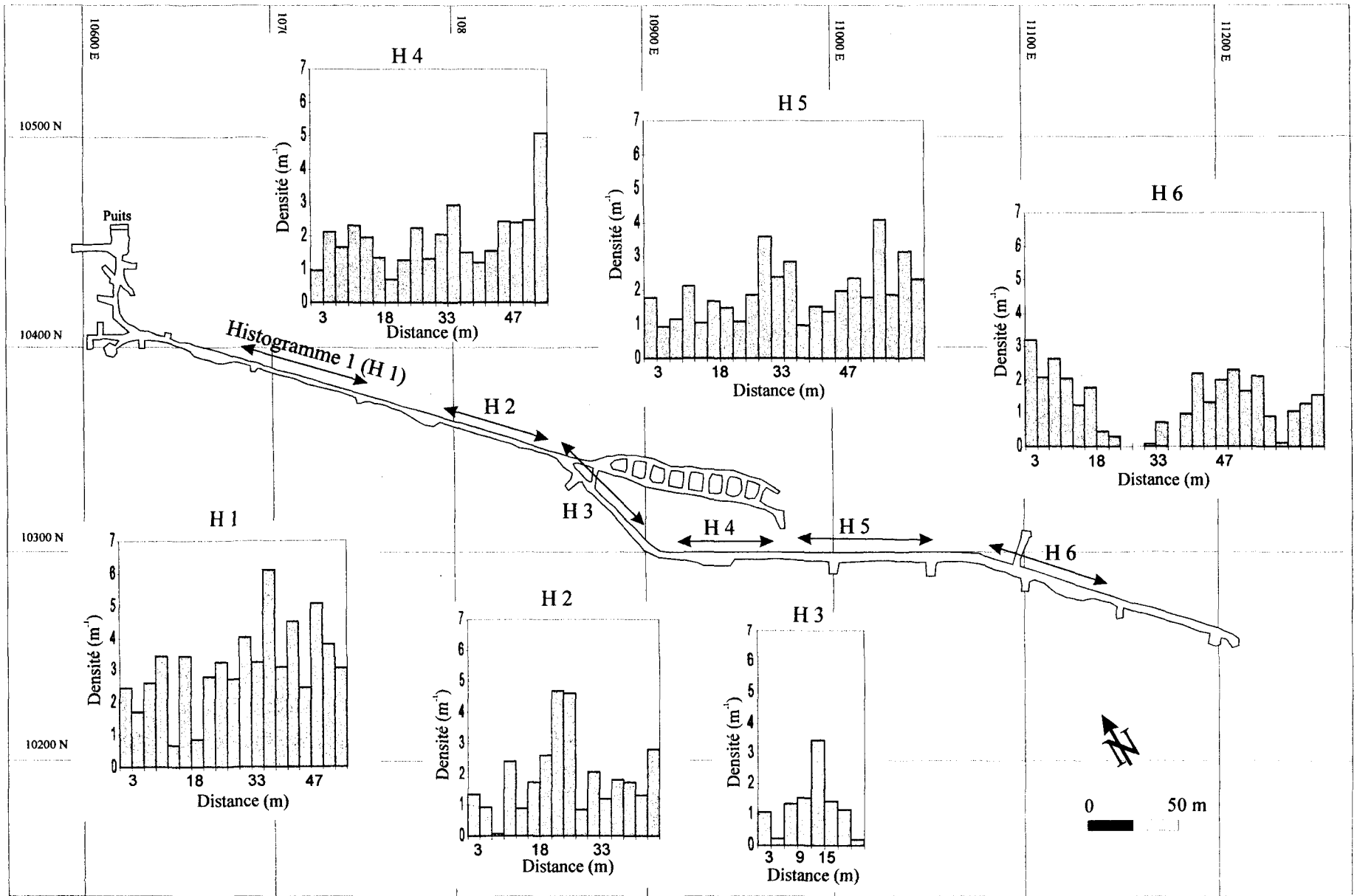


Figure 6.5: Densité de fracture le long de la galerie 6A de la mine Bouchard-Hébert.

6.1.3 *Autres paramètres des fractures*

Selon l'histogramme de la longueur de trace des fractures (figure 6.6a), on constate la présence d'un groupe de fractures dominant ayant une longueur de trace comprise entre 1 et 2 m. Dans un deuxième groupe à plus faible effectif que le premier, les fractures ont une longueur de trace comprise entre 3 et 3,5 m. Une proportion des fractures de ce groupe est affectée par le biais de censure (Rouleau, 1984), puisque leur longueur de trace dépasse les limites du mur de la galerie.

La majorité des fractures mesurées sont plus exactement des veines contenant des minéraux de remplissage et présentent donc une certaine épaisseur. L'analyse statistique de l'épaisseur des veines (figure 6.6b) montre qu'il y a une population de veines centrée autour de l'intervalle 1-3 mm d'épaisseur. Cette population de veines est dominante dans le massif rocheux au niveau 6A. Ces veines contiennent essentiellement de la calcite et du quartz comme minéraux de remplissage. Ces minéraux sont, par ailleurs, présents dans toutes les veines dont l'épaisseur est supérieure à 1 mm. Par endroits, on peut constater la présence de minéraux sulfurés (chalcopyrite par exemple) dans les veines.

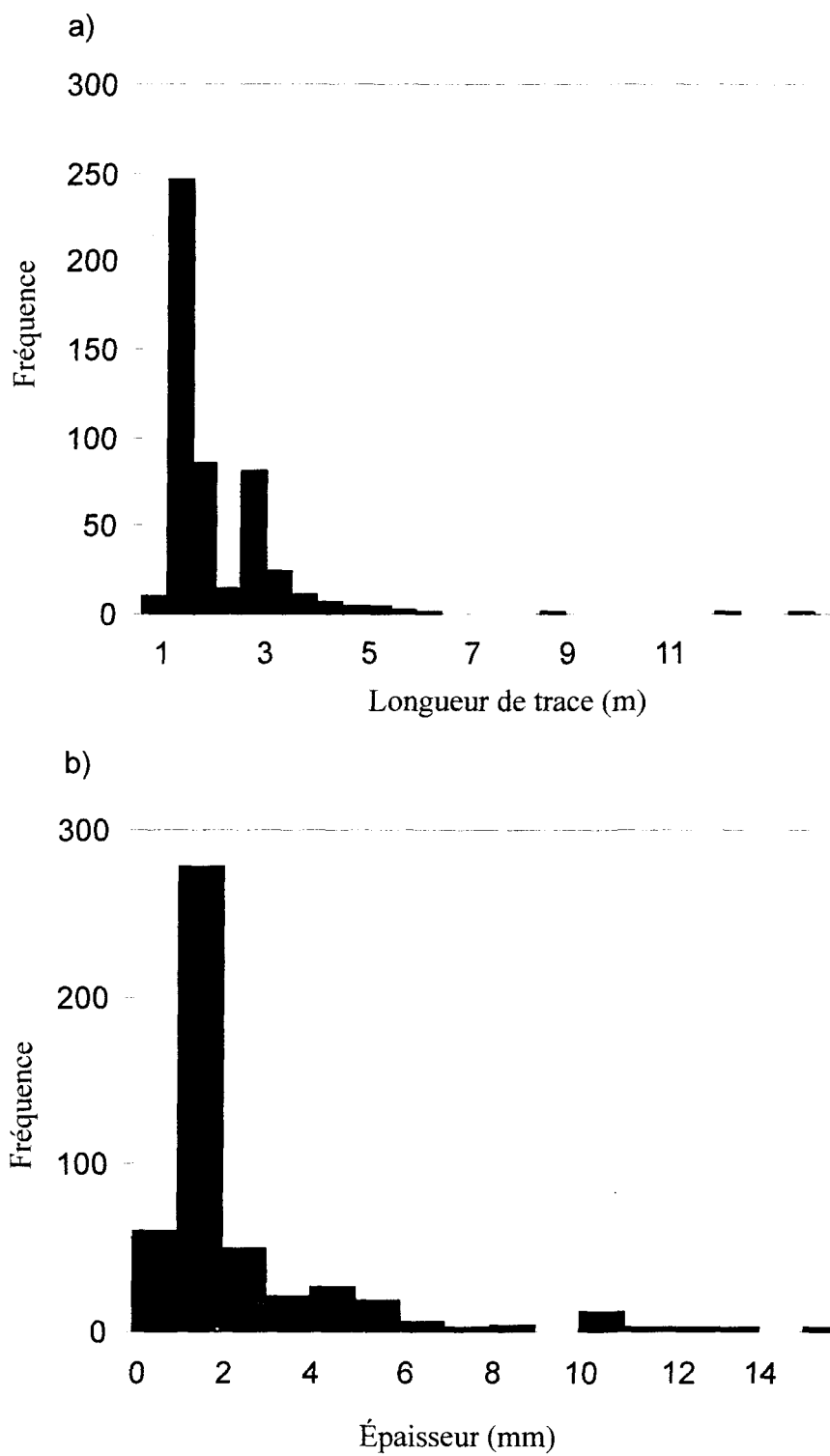


Figure 6.6: Histogrammes de fréquence de la longueur de trace (a) et de l'épaisseur (b) des veines au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.

6.2 TYPOLOGIE DES FRACTURES AU NIVEAU 6A

L'étude de la fréquence d'un paramètre des fractures par rapport à un autre permet de déterminer la typologie des fractures dans le massif rocheux environnant le niveau 6A à la mine Bouchard-Hébert. Pour un paramètre donné, une fréquence de fractures inférieure à 12 a été considérée comme non significative.

Le tableau 6.1 montre la fréquence des fractures relevées selon leur longueur de trace et leur pendage. On remarque deux importants groupes de fractures : le premier groupe a un pendage subhorizontal ($0-30^\circ$) et une longueur de trace largement répartie sur l'intervalle 0,5 - 2,5 m; presque 50 % de ce groupe est réparti sur l'intervalle de longueur de trace 1-1,5 (par rapport aux autres intervalles : 0,5 - 1; 1,5 - 2 et 2 - 2,5). Un deuxième groupe important de fractures est subvertical ($75-90^\circ$) avec deux intervalles de longueur de trace dominants. Le premier intervalle de longueur de trace est compris entre 0,5 et 2 m et le deuxième intervalle est compris entre 3 et 3,5 m.

Tableau 6.1: Fréquence des fractures relevées selon la longueur de trace (L.T.) et le pendage.

Pendage	0-15°	15-30°	30-45°	45-60°	60-75°	75-90°	Total
L.T. (m)							
0,5 - 1	48	20	9	3	3	18	101
1 - 1,5	75	16	10	0	3	17	121
1,5 - 2	38	14	1	3	9	22	87
2 - 2,5	34	12	7	2	1	8	64
2,5 - 3	7	3	4	0	3	5	22
3 - 3,5	11	4	5	1	4	57	82
3,5 - 4	3	2	1	0	1	2	9
4 - 4,5	3	3	0	1	3	0	10
4,5 - 5	4	1	2	1	0	0	8
5 - 5,5	1	0	1	0	0	0	2
5,5 - 6	0	1	2	0	0	0	3
6 - 6,5	0	0	2	0	0	0	2
6,5 - 7	0	1	0	0	0	0	1
9 - 9,5	1	0	0	0	0	0	1
13,5 - 14	1	0	0	0	0	0	1
14 - 14,5	1	0	0	0	0	0	1
Total	227	77	44	11	27	129	515

Tableau 6.2: Fréquence des fractures relevées selon l'épaisseur et le pendage.

Pendage	0-15°	15-30°	30-45°	45-60°	60-75°	75-90°	Total
Épaisseur (mm)							
1	37	10	1	0	1	12	61
2	136	41	17	7	18	74	293
3	19	9	7	3	3	17	58
4	10	5	7	0	0	3	25
5	6	5	4	0	1	10	26
6	5	1	3	1	0	3	13
7	1	3	2	0	0	0	6
8	0	0	0	0	0	1	1
9	0	0	1	0	1	1	3
10	13	3	2	0	0	3	21
15	0	0	0	0	0	1	1
20	0	0	0	0	2	2	4
30	0	0	0	0	0	1	1
50	0	0	0	0	1	0	1
60	0	0	0	0	0	1	1
Total	227	77	44	11	27	129	515

Selon l'épaisseur des veines et leur pendage (tableau 6.2), on constate que la majorité des fractures subhorizontales ($0-15^\circ$) forme des veines d'une épaisseur comprise entre 1 et 3 mm avec une majorité possédant une épaisseur d'environ 2 mm. Les fractures à pendage modéré ($15-45^\circ$), de plus faible effectif, forment des veines d'une épaisseur moyenne de 2 mm. Les fractures subverticales ($75-90^\circ$) forment, en général, des veines d'une épaisseur comprise entre 1 et 3 mm avec une majorité ayant une épaisseur de 2 mm.

Comme le résultat de projection stéréographique de l'ensemble des fractures au niveau 6A (figure 6.1) l'a montré, il existe un groupe de fractures subverticales ayant des directions très variables, un groupe de fractures subhorizontales et un groupe de fractures de direction NE-SO et à pendage intermédiaire. Les deux derniers groupes de fractures forment, cependant, la majorité des fractures au niveaux 6A de la mine.

Le tableau 6.3 de la fréquence de la longueur de trace en fonction de l'épaisseur des veines des fractures montre que la majorité des veines ont une épaisseur de l'ordre de 2 mm avec un intervalle de longueur de trace entre 0,5 et 3,5 m. Un deuxième groupe de veines de plus faible effectif comprend un sous-groupe avec une épaisseur de 3 mm et un intervalle de longueur de trace aussi entre 0,5 et 3,5 m, et un autre sous-groupe avec une épaisseur de 1 mm et une longueur de trace comprise entre 0,5 et 2 m.

Tableau 6.3: Fréquence des fractures relevées selon la longueur de trace (L.T.) et l'épaisseur.

Épaisseur (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	50	60	Total
L.T. (m)																
0,5 - 1	22	64	6	4	4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	101
1 - 1,5	22	71	15	3	4	1	0	0	0	5	0	0	0	0	0	121
1,5 - 2	10	60	7	2	2	1	1	0	0	3	1	0	0	0	0	87
2 - 2,5	3	35	6	9	3	2	3	0	0	3	0	0	0	0	0	64
2,5 - 3	0	10	5	1	1	2	0	0	2	1	0	0	0	0	0	22
3 - 3,5	3	43	12	3	6	4	1	1	1	3	0	3	1	0	1	82
3,5 - 4	1	4	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	9
4 - 4,5	0	1	3	0	3	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	10
4,5 - 5	0	2	3	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	8
5 - 5,5	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
5,5 - 6	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	3
6 - 6,5	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
6,5 - 7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9 - 9,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
13,5 - 14	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14 - 14,5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Total	61	293	58	25	26	13	6	1	3	21	1	4	1	1	1	515

Du point de vue minéralogique, les veines contiennent de la calcite et du quartz comme minéraux de remplissage; dans certains cas, il y a présence de minéraux sulfurés (chalcopryrite par exemple). Les veines échantillonnées pour les essais expérimentaux au laboratoire (annexe 5), ayant dans la plupart des cas une épaisseur entre 0 et 3 mm, ont le même type de minéraux de remplissage (calcite et quartz). Le détail microscopique de ces veines montre l'existence de deux générations de minéraux de remplissage : une génération formant les cristaux de calcite allongés et de plus grande taille (entre 1 et 3 mm de longueur moyenne), et une génération de cristaux de quartz de plus petite taille, ne dépassant pas 0,2 mm, et disposés le long de la veine entre la matrice rocheuse et les cristaux de calcite (annexe 9).

6.3 CAUSES D'ERREURS

Plusieurs causes d'erreur peuvent affecter la mesure de la fracturation d'un massif rocheux :

- Erreurs dues au biais d'orientation des fractures défavorisant les fractures subhorizontales dans le cas de cartographie d'une galerie horizontale
- Erreurs dues au biais de troncature puisque les fractures dont la longueur de trace est inférieure ou égale à 0,5 m n'ont pas été cartographiées
- Erreurs liées à la mesure de longueur de trace réelle des fractures qui dépasse les limites du mur de la galerie.

- Erreurs liées à la cartographie des fractures subverticales puisque la foliation verticale présente dans le massif rocheux peut masquer ces fractures et donc les défavoriser.

7 ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

Des essais hydrauliques en forage ont été réalisés à la mine Bouchard-Hébert pendant l'hiver 1998 pour estimer la perméabilité du massif rocheux entre les anciennes et les nouvelles excavations. Deux trous de forage ont été sélectionnés pour réaliser ces essais : le forage 6A-03 dont le collet est situé au milieu de la galerie du niveau 6A en dessous des anciennes galeries et le forage 6A-01 situé à l'extrémité est de cette galerie (figure 7.1). Ces deux trous de forage traversent le massif rocheux sous ce niveau et ont une plongée de 75° et 60° respectivement. La longueur testée dans chacun des deux forages est d'environ 50 m. Elle correspond à la longueur disponible des tubulures qui relient les obturateurs et l'intervalle d'essais, avec le système d'injection et d'acquisition des données.

7.1 TYPE D'ESSAIS HYDRAULIQUES ET MÉTHODE D'ANALYSE DES RÉSULTATS

La méthode utilisée pour les tests hydrauliques en forage est celle des essais d'injection à charge constante. Elle consiste à injecter de l'eau sous une pression constante dans un intervalle de forage isolé par deux obturateurs (figure 7.2). La longueur de l'intervalle testé correspond à la distance entre les deux obturateurs; dans notre cas, elle est de 1,5 m. Les résultats des essais sont représentés par un profil continu de la conductivité hydraulique de la masse rocheuse environnant le trou de forage.

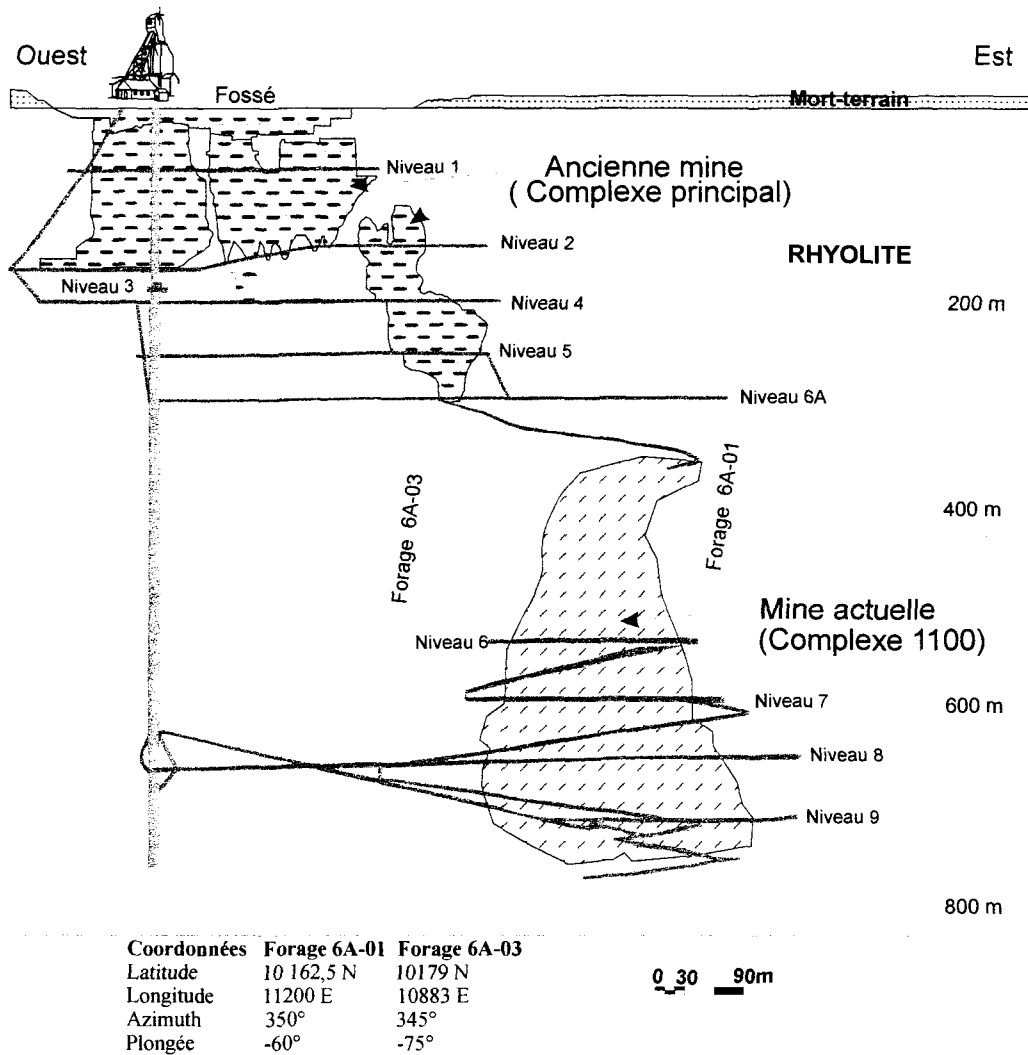


Figure 7.1: Localisation des trous de forages utilisés pour les essais hydrauliques dans une coupe longitudinale regardant vers le nord à la mine Bouchard-Hébert (modifiée de Ruel, 1995).

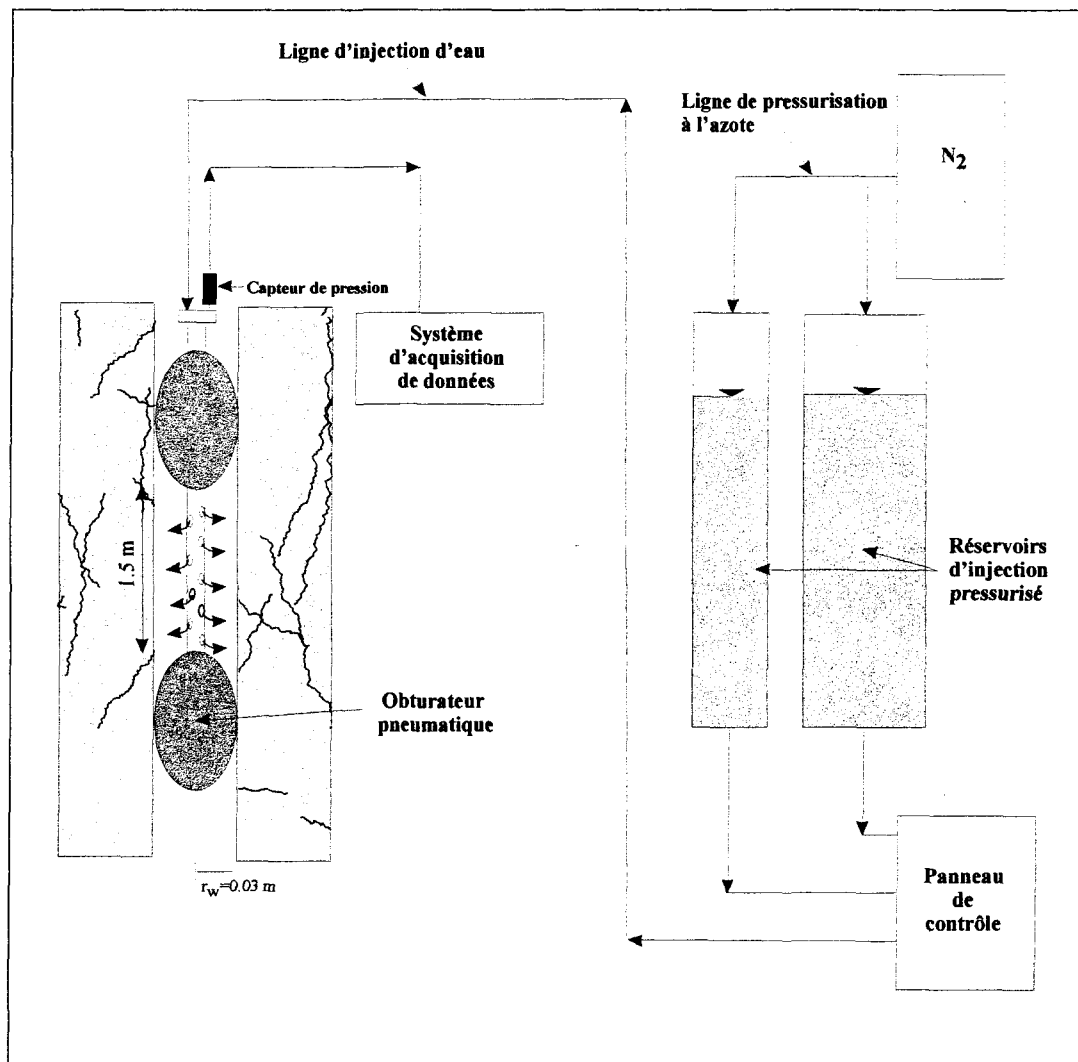


Figure 7.2: Schéma du montage du dispositif d'essais d'injection en forage (adapté de Lapcevic, 1988).

Étant donné le type de roches massives traversées par les forages, la conductivité hydraulique mesurée reflète plutôt celle des fractures environnant le trou de forage. La conductivité hydraulique de chaque intervalle d'essai a été déterminée en utilisant la relation de Thiem (1906), laquelle suppose que le régime d'écoulement est permanent et que la géométrie d'écoulement est radiale :

$$K = \frac{Q}{\Delta H 2\pi L} \ln \frac{r_e}{r_w}$$

Q : débit en régime d'écoulement permanent (m³/s)

ΔH : surcharge d'injection (m)

L : longueur de l'intervalle d'essai (1,5 m)

r_e : rayon d'influence (10 m)

r_w : rayon du forage dans le roc (0,03 m)

7.2 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION DES ESSAIS HYDRAULIQUES

Les résultats des tests hydrauliques dans les deux trous de forages sélectionnés sont donnés dans les annexes 4 et 5. Les profils de la conductivité hydraulique versus la distance par rapport au collet du trou de forage sont montrés dans la figure 7.3a et 7.3b. Dans le cas du trou de forage 6A-01, le profil de la conductivité hydraulique montre peu de variation en général; la conductivité hydraulique demeure dans la gamme de 10⁻¹⁰ à 10⁻⁹ m/s. La conductivité hydraulique du massif rocheux est particulièrement constante, de

l'ordre 10^{-9} m/s pour une distance de 20 m à partir du collet du trou; et elle diminue progressivement jusqu'à environ 10^{-10} m/s après cet intervalle. D'après les données géologiques établies par les géologues de la mine, le massif rocheux est formé principalement d'une rhyolite apparemment plus fracturée dans la première vingtaine de mètres de profondeur à partir du collet du trou (RQD : 70%) comparativement au reste du trou (RQD : 80%), ce qui peut expliquer en partie une perméabilité plus élevée dans cet intervalle.

Le trou de forage 6A-03 démontre, par contre, un profil de conductivité hydraulique plus variable en fonction de la distance. À l'opposé du premier profil, la conductivité hydraulique du massif rocheux environnant le trou de forage augmente avec la distance à partir du collet du trou. Elle passe de 10^{-11} m/s à une distance de 4 m à partir du collet du trou jusqu'à 10^{-6} m/s à une distance de 21 m, puis le profil de conductivité devient variable entre 10^{-10} à 10^{-7} m/s pour l'intervalle de distance de 21 à 34 m. Pour des distances plus grandes, de 34 à 48 m, la conductivité hydraulique du massif rocheux est à peu près constante de l'ordre de 10^{-6} m/s, pour diminuer à environ 10^{-9} m/s dans les quelques derniers essais entre 48 et 50 m. D'après les données géologiques recueillies par les géologues de la mine, le massif rocheux environnant le forage 6A-03 est plus hétérogène que dans le forage 6A-01. On note la présence d'une rhyolite bréchique entre 0 et 30 m de distance à partir du collet du trou (RQD : 90%), des pyroclastites entre 30 et 33 m de profondeur (RQD : 90%) et d'une rhyolite bréchique entre 33 et 50 m (RQD : 70%). On ne

remarque donc pas de corrélation entre le profil de la conductivité hydraulique et la variation de lithologie. On peut supposer que la conductivité hydraulique est plutôt reliée aux fractures recoupées par les trous de forage.

En comparant les résultats des tests hydrauliques avec ceux de la densité de fractures dans la galerie du niveau 6A, on constate un lien entre la densité de fractures et la conductivité hydraulique. Le massif rocheux dans la partie est de la galerie du niveau 6A présente une densité de fractures plus faible et montre des valeurs de conductivité hydraulique également plus faibles. Cette faible conductivité hydraulique du massif rocheux environnant le trou de forage 6A-01 serait donc due à la faible densité de fractures dans cette zone. Dans le cas du trou de forage 6A-03, situé vers le milieu de la galerie 6A, la faible conductivité hydraulique dans le massif rocheux moins profond (entre 2 et 17 m) peut être due à la fermeture des fractures à cause de la perturbation plus intense des contraintes mécaniques autour des excavations à cet endroit. Cet effet de perturbation des contraintes mécaniques devient de moins en moins intense avec l'augmentation de la profondeur. De même, au fur et à mesure qu'on s'éloigne des endroits excavés, l'effet de perturbation des contraintes mécaniques serait moins important comme c'est le cas du trou de forage 6A-01, situé à l'extrémité est de la galerie 6A.

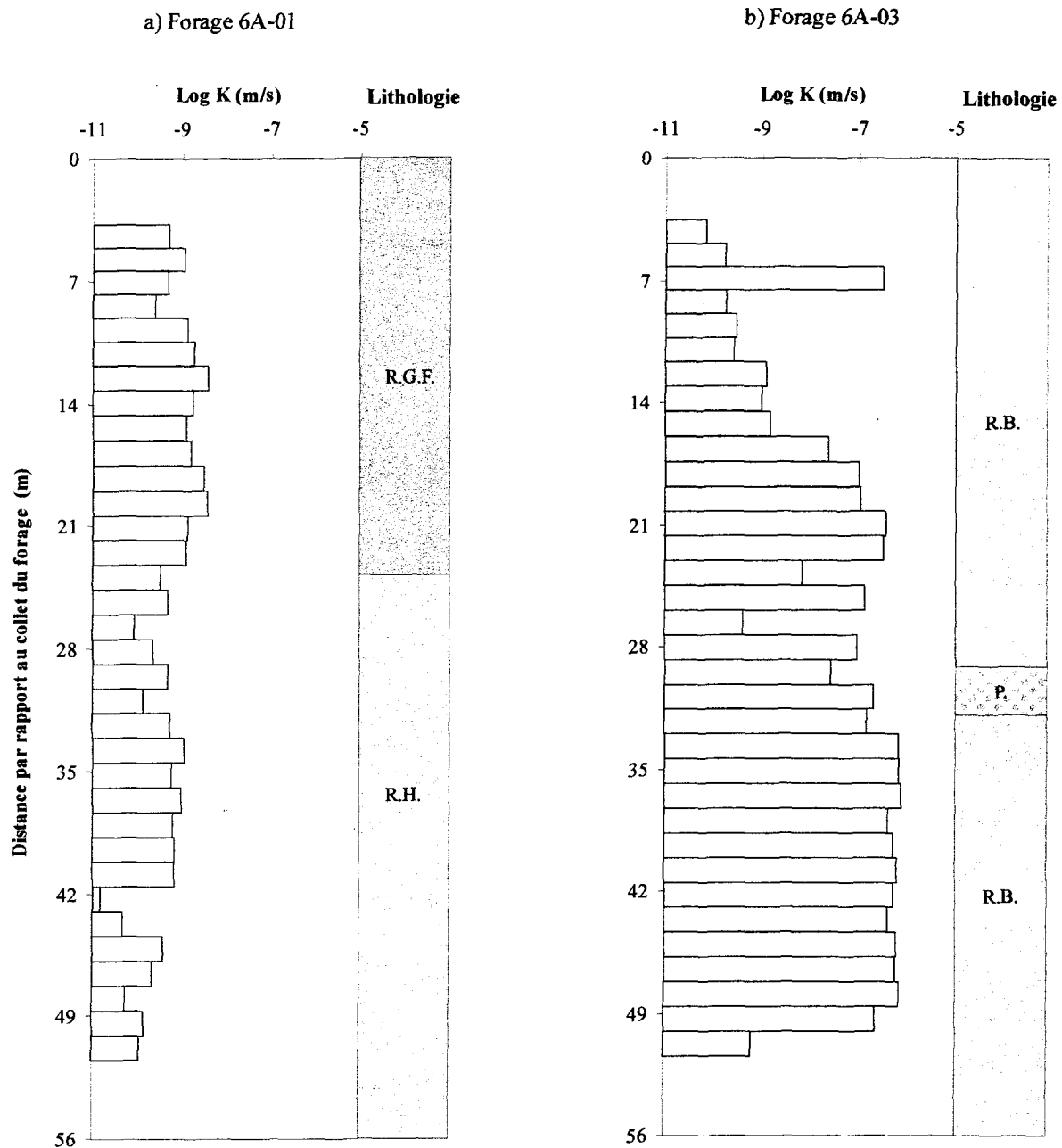


Figure 7.3: Diagraphie de la conductivité hydraulique des forages 6A-01 (a) et 6A-03 (b) du niveau 6A à la mine Bouchard-Hébert.

7.3 CAUSES D'ERREURS

Différents types d'erreur peuvent être liés aux résultats des essais hydrauliques en forage, à savoir la précision des mesures des paramètres sur le terrain et les paramètres calculés par la méthode théorique. Parmi ces sources d'erreurs, on peut citer :

- Les erreurs liées aux fuites d'eau le long des différentes valves et connexions du montage.
- Les erreurs liées aux fuites d'eau des obturateurs dans les conditions profondes de l'essai; les pressions hydrauliques élevées autour du forage exerceraient une force plus grande sur les obturateurs.
- Les erreurs induites en supposant un débit d'eau constant lors de l'essai.
- Les erreurs liées à la méthode d'interprétation qui se résument à la non-conformité aux hypothèses émises sur la géométrie d'écoulement et sur le régime d'écoulement.

8 CONCLUSION DE LA PARTIE II

Les travaux hydrogéochimiques à la mine Bouchard-Hébert ont montré la présence de différents types d'eau. Les eaux échantillonnées dans les trous de forage et les fractures à la mine ont un pH presque neutre et des concentrations élevées en ions Ca, SO₄ et en métaux, reflétant l'environnement géologique de la mine. Les eaux souterraines circulant

principalement dans les discontinuités, telles que les fractures, entrent en contact avec les minéraux de remplissage de ces dernières, essentiellement la calcite, et s'enrichissent en Ca. L'ion SO_4 et les métaux proviendraient de l'oxydation des minéraux sulfurés qui font partie des minéraux de remplissage dans les fractures mais aussi de la matrice rocheuse.

Les eaux des barricades (anciennes excavations) et du bassin de sédimentation sont plus acides avec des valeurs extrêmes de pH de 2 et 2,5 respectivement, et des concentrations très élevées en ions, en particulier le SO_4 et les métaux (Fe, Zn, Cu et Mn). L'acidité des eaux provenant de cette partie de la mine reste très notable dans le bassin de sédimentation en surface malgré leur dilution avec les eaux à pH plus neutre provenant des autres localités de la mine.

Les résultats de la cartographie des fractures ont permis d'identifier les familles de fractures qui peuvent jouer un rôle dans la circulation des eaux entre les anciennes excavations et les nouvelles plus profondes.

Dans la partie ouest de la galerie du niveau 6A (de 10600E à 10900E), le massif rocheux est traversé par deux principales familles de fractures. La première famille de fractures est subhorizontale (entre 0° et 30°) avec une longueur de trace généralement entre 1 et 1,5 m et une épaisseur de leur veines d'environ 2 mm. La deuxième famille de fractures est subverticale (pendage entre 75° et 90°). Cette famille de fractures est

subdivisée en deux groupes selon la longueur de trace: un groupe entre 0,5 et 2 m et un autre entre 3 et 3,5 m. Ces fractures forment des veines d'une épaisseur d'environ 2 mm aussi. La densité de ces deux familles de fractures varie de 1 à 6 m⁻¹.

Dans la partie est de la galerie du niveau 6A (de 10900E à 11200E), le massif rocheux contient les deux familles de fractures rencontrées à l'ouest en plus d'une famille de fractures à pendage modéré (entre 15° et 45°) vers le nord-est. Cette famille de fractures est de plus faible effectif, d'une longueur de trace très variable entre 0,5 et 2,5 m et ses veines ont une épaisseur d'environ 2 mm. La densité des fractures est d'environ 1 à 4 m⁻¹.

Bien que dans cette partie est du massif rocheux trois familles de fractures sont présentes, ce massif rocheux semble moins perméable que celui situé à l'ouest, étant donné sa densité de fractures plus faible. Par conséquent, la circulation des eaux serait plus intense dans la partie ouest de la galerie du niveau 6A de la mine.

Les veines du massif rocheux environnant la galerie du niveau 6A forment une typologie uniforme avec la calcite et le quartz comme minéraux de remplissage, et par endroits des minéraux sulfurés. Ces minéraux de remplissage sont généralement déposés sous forme de deux générations de minéraux: une génération formant les cristaux de calcite allongés et de plus grande taille (entre 1 et 3 mm de longueur moyenne), et une génération

de cristaux de quartz de plus petite taille, ne dépassant pas 0,2 mm, et disposés le long de la veine entre la matrice rocheuse et les cristaux de calcite.

Les essais hydrauliques en forage ont permis d'estimer la conductivité hydraulique du massif rocheux immédiatement sous le niveau 6A, séparant les anciennes excavations et les nouvelles. Dans la partie est de la galerie du niveau 6A, la conductivité hydraulique du massif rocheux varie peu en général, entre 10^{-10} à 10^{-9} ms^{-1} . Cette faible perméabilité semble être corrélée à la faible densité de fractures du massif rocheux dans cette zone. Dans la partie centrale de la galerie du niveau 6A, située en dessous des anciennes excavations, la conductivité hydraulique du massif rocheux augmente sur au moins une profondeur d'environ 48 m de 1×10^{-11} à 1×10^{-6} ms^{-1} . Ce résultat suggère que la densité élevée de fractures dans cette zone le serait aussi en profondeur.

**PARTIE III : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE SUR LE COUPLAGE DE PROCESSUS
DANS UNE FRACTURE**

9 INTRODUCTION À L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

L'étude de l'écoulement des eaux souterraines dans un environnement de roche massive fracturée nécessite une analyse du comportement hydraulique des fractures, ainsi que des effets des processus chimiques, mécaniques et thermiques pouvant affecter le comportement hydraulique.

Dans ce projet, l'étude expérimentale a pour but d'étudier le comportement des processus hydrauliques, mécaniques et chimiques et l'effet de leur couplage dans des fractures naturelles provenant de la mine Bouchard-Hébert, en particulier du niveau 6A. À cet endroit, les contraintes géomécaniques et la géochimie des eaux souterraines sont perturbées; la première par les excavations et la deuxième par la génération d'eau acide. La figure 9.1 montre une illustration schématique d'une fracture naturelle avec des minéraux de remplissage, tels que la calcite, minéral le plus souvent présent dans les fractures observées à la mine Bouchard-Hébert. L'eau entrant dans cette fracture avec une certaine composition chimique, acide par exemple, réagit avec les minéraux de remplissage et le résultat de cette réaction est une dissolution et/ou une précipitation de minéraux. Ces réactions résultent en un changement d'une part de la composition chimique de cette eau à la sortie de la fracture et d'autre part de la morphologie interne de cette fracture. Cette étude expérimentale permettra d'examiner ces différents processus et leurs effets sur le

comportement hydraulique des fractures dans les conditions qui sont celles retrouvées à la mine Bouchard-Hébert.

Pour une étude expérimentale, l'étape préparatoire représente une phase importante et essentielle avant de procéder aux essais. Cette étape comprend la sélection et la préparation des échantillons, l'élaboration du montage et la définition du protocole expérimental.

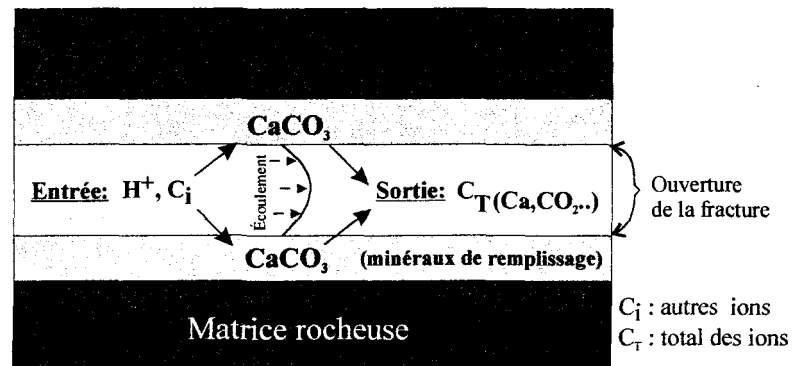


Figure 9.1: Écoulement d'une eau acide et sa réaction avec les minéraux de remplissage dans une fracture.

10 ÉTAPES PRÉCÉDANT LES ESSAIS

10.1 SÉLECTION ET PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Pour les fins expérimentales, des échantillons de carottes de roche avec une veine longitudinale à la carotte ont été sélectionnés de la "carothèque" du site de la mine Bouchard-Hébert. Ces carottes de forage proviennent du trou de forage d'exploration 6A-01 dont le collet se trouve au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert (figure 7.1). D'une plongée de 60° vers le nord, le trou de forage traverse le massif rocheux des futurs chantiers plus profonds. La description pétrographique des échantillons est présentée dans l'annexe 5.

Les échantillons de carottes de roche, d'un diamètre 3,65 cm, ont été coupés à une longueur de 10 cm et polies sur les deux faces (figure 10.1). Ensuite, les échantillons ont été cassés en appliquant une contrainte parallèle au plan de la veine. La roche s'ouvre facilement le long de cette zone de faiblesse lorsqu'on la met sous une presse. Il en résulte une fracture dont les deux surfaces se superposent assez bien. Dans un contexte naturel, la fracturation de ce type de roche, sous l'effet d'une contrainte parallèle au plan de la veine, pourrait générer des fractures similaires à celles obtenues au laboratoire.

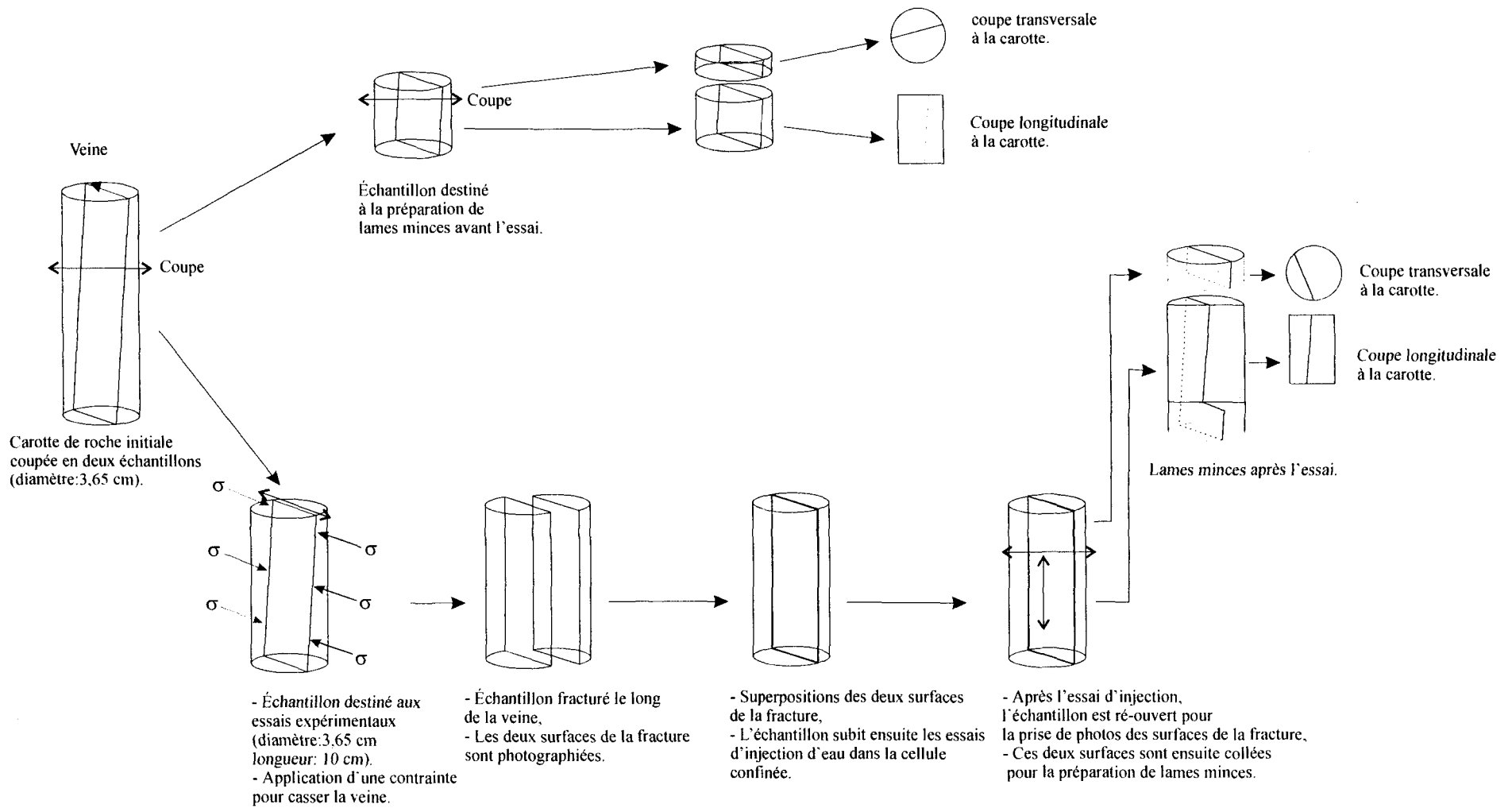


Figure 10.1: Schéma du cheminement des échantillons fracturés destinés aux essais expérimentaux.

Pour des fins de comparaison, des photos des deux faces de chaque fracture ont été prises avant et après l'expérience de percolation à l'eau (figure 10.1). Des lames minces ont été réalisées en coupe transversale et longitudinale à la carotte et recoupant la fracture; ceci avant et après l'expérience de percolation, pour une comparaison pétrographique (figure 10.1). Les lames minces fabriquées avant le test ont été prélevées avant la fracturation de la veine; alors qu'après le test, les lames minces ont été prélevées après reconstitution de la veine par collage à l'époxy des deux faces de la fracture.

10.2 MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Le dispositif du montage expérimental est formé de plusieurs composantes permettant de contrôler et de mesurer plusieurs paramètres, à savoir : la température ambiante de l'échantillon, la pression de confinement de l'échantillon, la pression d'injection d'eau et le volume d'eau recueillie à la sortie en fonction du temps. Toutes ces composantes sont reliées à un système informatique d'acquisition des données (figure 10.2 et annexe 6). Les principales composantes sont les suivantes :

- a) Système de contrôle de la température à circulation d'eau réfrigérée; il est composé d'un élément chauffant contrôlable, d'un élément réfrigérant en continu, d'un bac isolant rempli d'eau et à couvercle fermé.

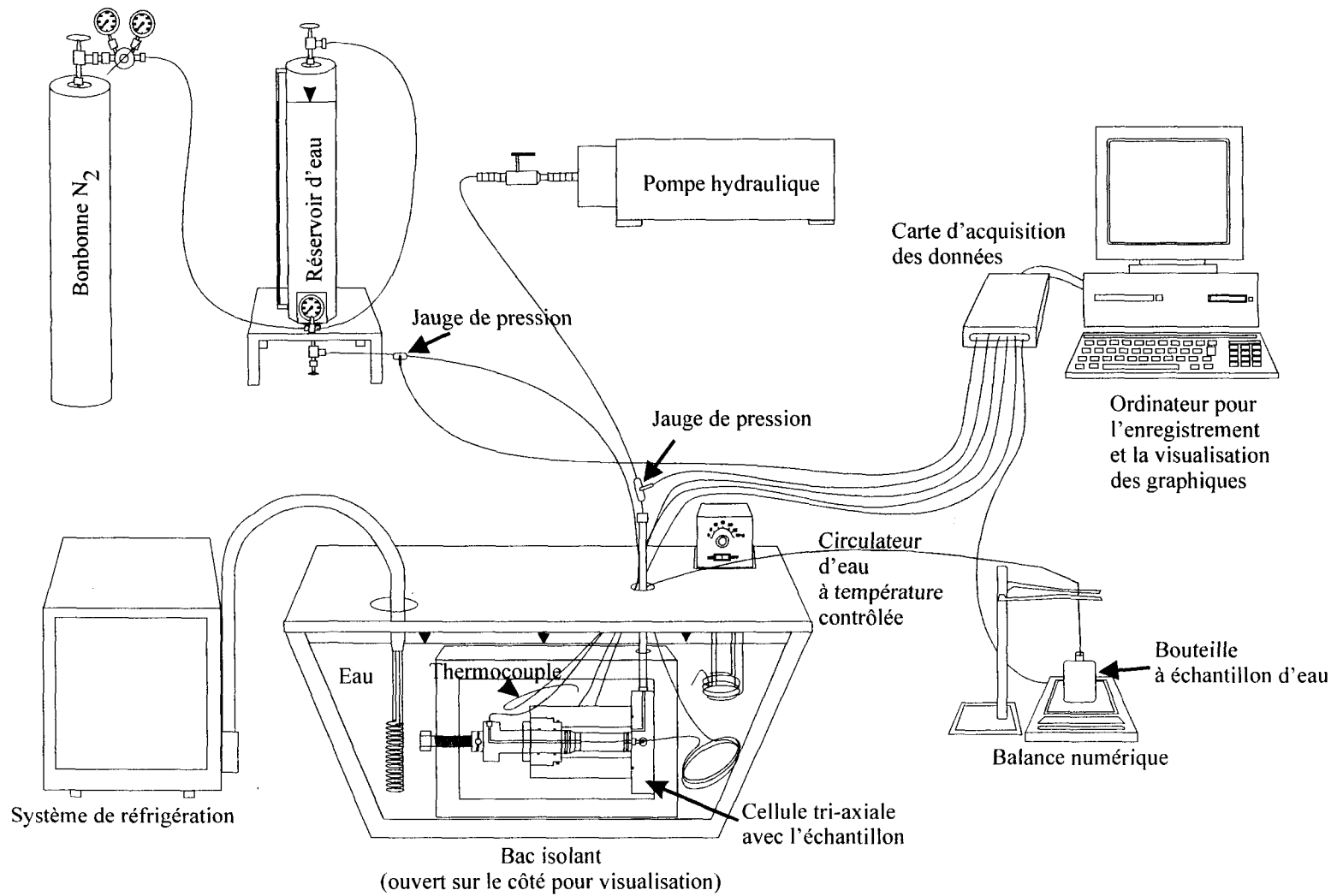


Figure 10.2: Schéma du dispositif expérimental pour les essais d'injection.

- b) Cellule tri-axiale (annexes 7 et 10); elle est formée d'acier inoxydable et l'échantillon y est installé. Ce dernier est préalablement isolé par une gaine en caoutchouc pour éviter tout contact avec l'huile de confinement appliqué à ses pourtours à l'intérieur de la cellule. La cellule tri-axiale est montée dans une charpente métallique pour éviter le déplacement vertical de l'échantillon. La description plus détaillée de la cellule tri-axiale est donnée dans les annexes 9 et 10.
- c) Balance numérique; elle permet de mesurer en continu la masse d'eau récupérée dans une bouteille à échantillon, à la sortie de la fracture. Durant le traitement des données, cette valeur de masse est transformée en une valeur moyenne mobile de débit d'eau calculée sur une période de temps (Δt) fixe pour chaque échantillon. L'intervalle de temps utilisé Δt varie d'un essai à l'autre afin d'obtenir des courbes plus lisses de débit d'eau en fonction du temps.
- d) Le confinement de l'échantillon se fait par l'intermédiaire d'une pompe hydraulique à l'huile. Cette pompe n'est mise en marche que pour faire augmenter ou baisser la pression à la valeur de travail choisie, laquelle reste à peu près constante pour une certaine durée. De temps à autre, un réajustement de la pression s'impose lorsqu'il y a une diminution de celle-ci d'une proportion supérieure ou égale à 10% de la

pression de travail. À des pressions élevées, supérieures à 12,38 MPa, ce réajustement est moins fréquent.

- e) L'injection de l'eau à l'intérieur de la fracture se fait par l'intermédiaire d'un réservoir d'eau pressurisé à l'aide d'une bonbonne d'azote. Des injections d'eau sont réalisées à plusieurs valeurs différentes de pH.

Les données de tous ces paramètres sont enregistrées en continu à l'aide d'une carte d'acquisition de données de type *WorkMate* et du programme *QuickLog* qui permet une visualisation des graphes de l'évolution des différents paramètres en fonction du temps sur un écran d'ordinateur.

10.3 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

10.3.1 Température du déroulement des essais

Les essais de laboratoire ont pour but de comprendre les phénomènes couplés hydro-chimio-mécaniques dans les fractures du massif rocheux à la mine Bouchard-Hébert, en particulier dans la portion du massif rocheux situé entre les anciennes et les nouvelles excavations de mine. La température moyenne des eaux souterraines échantillonnées à ce

niveau est d'environ 12 °C. Conséquemment, la température du déroulement de tous les essais au laboratoire est fixée à 12 °C.

10.3.2 pH de l'eau d'injection

Le but principal de ces essais expérimentaux est de quantifier l'effet d'une circulation d'eau acide sur la perméabilité des fractures rocheuses provenant du massif rocheux entre les anciennes et les nouvelles excavations à la mine. Étant donné que les valeurs les plus faibles du pH de l'eau échantillonnée à la mine Bouchard-Hébert sont d'environ 2, les expériences de percolation de l'eau dans les fractures se sont limitées à des valeurs de pH allant de 2 jusqu'à des valeurs neutres d'environ 7. De plus, puisque les eaux circulant dans le massif rocheux à la mine Bouchard-Hébert sont, en général, très riches en sulfate, la solution de base utilisée pour la préparation des eaux d'injection est une solution d'acide sulfurique. À partir de cette solution acide, concentrée à 90-98%, des dilutions ont été réalisées pour l'obtention des eaux à différentes valeurs de pH soit 2 - 2,5 et 4. L'eau distillée a servi comme eau d'injection à pH neutre (pH entre 6,5 et 7).

Avant un essai, un changement de pH de l'eau d'injection nécessite que le réservoir d'eau d'injection soit au préalable rincé à l'eau distillée puis à l'eau d'injection pour diminuer les sources de contamination.

10.3.3 Contrainte de confinement

L'estimation des contraintes de confinement dans le contexte de la mine Bouchard-Hébert est réalisée à partir des équations établis par Arjang (1996). Ce dernier s'est basé sur une banque de données des contraintes mécaniques mesurées en fonction de la profondeur dans le district minier de l'Abitibi. À une profondeur de 300 m, correspondant au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert, la valeur moyenne de la contrainte mécanique du massif rocheux est d'environ 14,75 MPa (2100 psi). Les valeurs de la contrainte de confinement pour le déroulement des essais sont fixées de part et d'autre de cette valeur de contrainte moyenne, soit une valeur minimale de 8,26 MPa (1200 psi), une valeur moyenne de 12,38 MPa (1800 psi) et une valeur maximale de 16,51 MPa (2400 psi).

10.3.4 Pression d'injection d'eau

Au début de chaque essai, la pression d'injection d'eau appliquée à l'entrée de l'échantillon est de 0,28 MPa (40 psi), puis elle est augmentée jusqu'à des valeurs permettant d'obtenir des débits d'eau de l'ordre de 20 ml/h, débit minimal pour le déroulement d'un essai d'une durée raisonnable, i.e ne dépassant pas 5 jours. Aucune contre-pression n'est appliquée à la sortie de l'échantillon, laquelle est donc soumise à la pression atmosphérique.

10.3.5 Échantillonnage et analyses chimiques

Avant chaque essai, l'eau du réservoir d'injection est ré-échantillonnée pour vérifier que sa composition chimique demeure la même que la composition initiale lors de sa préparation, surtout dans le cas des solutions à base d'acide (eaux à pH 2 - 2,5 et 4).

L'eau sortant de l'échantillon est récupérée à des intervalles de temps pouvant varier selon le débit et destinée pour les fins d'analyses chimiques. Un volume d'eau minimale de 60 ml est requis pour les besoins de ces analyses chimiques. Les paramètres chimiques mesurés sont donc des valeurs moyennes durant un intervalle de temps entre deux périodes de prélèvement de l'eau récupérée. Ces valeurs moyennes seront affectées aux temps de récupérations des eaux dans les représentations graphiques.

Les paramètres physico-chimiques de chacun des échantillons d'eau récupérés, tels que le pH, la conductivité électrique, sont mesurés juste après leur prélèvement. Alors que l'alcalinité totale et les concentrations en ions majeurs et mineurs ont été mesurées après la terminaison de l'essai.

11 ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

La plupart des échantillons ont subi un essai d'injection d'eau avec une seule valeur de pH; seuls deux échantillons ont subi des injections multiples à différentes valeurs de pH.

Le tableau 11.1 donne un sommaire des essais exécutés sur les échantillons de fractures.

Tableau 11.1: Sommaire des essais d'injection exécutés sur les échantillons de fractures.

Échantillon no.	Pression de confinement		Pression d'injection		pH d'eau d'injection
	(psi)	(MPa)	(psi)	(MPa)	
1	1200	8.256	50-400	0,344-2,52	7
	1200	8.256	40-160	0,275-1,1	2
2	1200	8.256	40	0,275	7
	1200	8.256	40-160	0,275-1,1	4
	1200	8.256	40	0,275	2
3	1200	8.256	40	0,275	2
4	1800	12.384	40-160	0,275-1,1	2
5	1800	12.384	40	0,275	2
6	2400	16.512	40	0,275	2
7	2400	16.512	40-160	0,275-1,1	2
8	1200	8.256	40-320	0,275-2,2	2,5
9	1800	12.384	80	0,55	2,5
10	2400	16.512	80	0,55	2,5
11	1200	8.256	40-320	0,275-2,2	4
12	2400	16.512	40-160- 320	0,275-1,1-2,2	4
13	1800	12.384	40	0,275	7
14	2400	16.512	80	0,55	7

Les représentations graphiques de la variation des différents paramètres des eaux mesurés en fonction du temps sont données avec les paramètres initiaux de l'eau d'injection correspondant à l'instant zéro. À ces valeurs des différents paramètres mesurés sont affectées des valeurs du temps correspondant au temps où chacun des échantillons d'eau a été récupéré. L'intervalle de prélèvement de l'eau collectée à la sortie de la fracture peut varier d'un essai à l'autre et à l'intérieur d'un même essai dépendamment du débit d'eau. Ce dernier paramètre affecte aussi la durée d'un essai.

Les résultats hydrauliques sont présentés par des graphiques de l'évolution du débit d'eau et de celle de la transmissivité de la fracture en fonction du temps. L'évaluation de la transmissivité hydraulique d'une fracture est estimée à l'aide d'une variante de la loi de Darcy. L'équation utilisée est sous la forme :

$$T_f = \frac{Q}{\Delta h} \frac{L}{l} \quad (\text{m}^2\text{s}^{-1})$$

avec Q : débit d'eau en m³/s,

Δh : différence de charge hydraulique entre l'entrée et la sortie de la fracture (m), égale à $\Delta P/\rho g$ avec ΔP : différence de charge de pression entre l'entrée et la sortie de la fracture (Pa), ρ est la densité de l'eau égale à 1000 Kg/m³ et g est l'accélération gravitationnelle (9,81 ms⁻²).

L : distance entre les deux mesures de h le long de la direction d'écoulement qui est le grand axe de l'échantillon de carotte contenant la fracture (m). Cette valeur est constante pour tous les échantillons.

l : largeur de la section d'écoulement (m). Cette valeur peut varier d'un échantillon à l'autre dépendamment de l'angle que fait la veine fracturée avec le grand axe de l'échantillon de la carotte. La valeur estimée de cette largeur est donc une valeur moyenne pour un échantillon donné.

Tableau 11.2 : Largeur de la section d'écoulement estimée pour les échantillons de carotte utilisés pour les essais expérimentaux.

Échantillon	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
l (cm)	2,9	3,7	2,8	3,1	3,6	3,2	3,2	3,2	3,1	3,4	3,1	3,6	3,6	3,5

Les résultats hydrochimiques pour chaque essai sont présentés par des graphiques des différents paramètres chimiques et physico-chimiques mesurés dans l'eau récupérée à la sortie de la fracture en fonction du temps.

11.1 ESSAIS MULTIPLES SUR UN MÊME ÉCHANTILLON

Des essais préliminaires ont consisté en des essais multiples réalisés sur un même échantillon dans le but d'obtenir une première évaluation de la gamme des valeurs de divers paramètres, tels que le volume d'eau d'injection nécessaire durant un essai, le débit d'eau et

la pression d'injection d'eau minimale pour le déroulement d'un essai.

Les résultats de ces essais multiples permettent aussi d'évaluer les effets d'essais successifs d'injection d'eau à différentes valeurs de pH sur le comportement hydrogéochimique d'une fracture.

11.1.1 Échantillon 1

a) Résultats hydrauliques

Dans un premier temps, l'échantillon 1 a subi une injection d'eau à pH neutre sous une pression d'injection variant de 0,344 MPa à 2,752 MPa (50 à 400 psi) et une pression de confinement de l'ordre de 8,27 MPa (1200 psi). Les débits d'eau générés ont été très faibles, inférieurs à 1 ml/h, et donc insuffisants pour la poursuite de l'essai.

L'échantillon 1 a été soumis à un deuxième essai en gardant la même pression de confinement mais avec l'injection d'une eau à pH 2. Le débit d'eau et la transmissivité de la fracture suivent la même évolution en fonction du temps (figure 11.1a et b). Le profil de la variation du débit en fonction du temps (figure 11.1a) montre que pour une pression d'injection de 0,344 MPa (50 psi), il y a augmentation du débit jusqu'à 9 ml/h, correspondant à une transmissivité de $2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, après 2 heures d'essai; par la suite, on observe une diminution du débit plus lente jusqu'à devenir constant de l'ordre de 2 ml/h, correspondant à une transmissivité de $6 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, après 30 heures d'essai. L'injection

est arrêtée après cette période puis reprise vers 43 heures d'essai, mais cette fois-ci avec une augmentation de la pression d'injection à 0,55 MPa (80 psi). Le débit d'eau augmente d'une façon brusque à 2,9 ml/h, correspondant à une transmissivité de $6 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ et reste stable à cette valeur jusqu'à environ 50 heures d'essai. Après cette étape, une ré-augmentation de la pression d'injection à 1,1 MPa (160 psi) a causé une augmentation rapide du débit jusqu'à une valeur de 15 ml/h, correspondant à une transmissivité de $1,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, pendant une période d'une heure. Cette augmentation du débit avec le temps continue mais d'une façon moins prononcée jusqu'à 28,3 ml/h, correspondant à une transmissivité de $2,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, à 63 heures d'essai. Même après un deuxième arrêt, la reprise de l'essai à la même pression d'injection montre toujours une augmentation du débit avec le temps.

b) Résultats hydrochimiques

Le pH des eaux recueillies augmente en fonction du temps, de la valeur de 2, correspondant à l'eau du réservoir d'injection au temps zéro, jusqu'à environ la valeur de 6, et il reste constant autour de cette valeur pour une durée de 50 heures d'essais (figure 11.2a). Le pH commence à diminuer dès l'augmentation de la pression d'injection à 0,55 MPa. Il se stabilise à 2,7 environ durant la dernière phase d'essai. La conductivité électrique suit une évolution contraire à celle du pH avec des valeurs plus faibles que celle de l'eau injectée (5,32 mS/cm) et comprises entre 1,61 et 2,24 mS/cm durant l'essai.

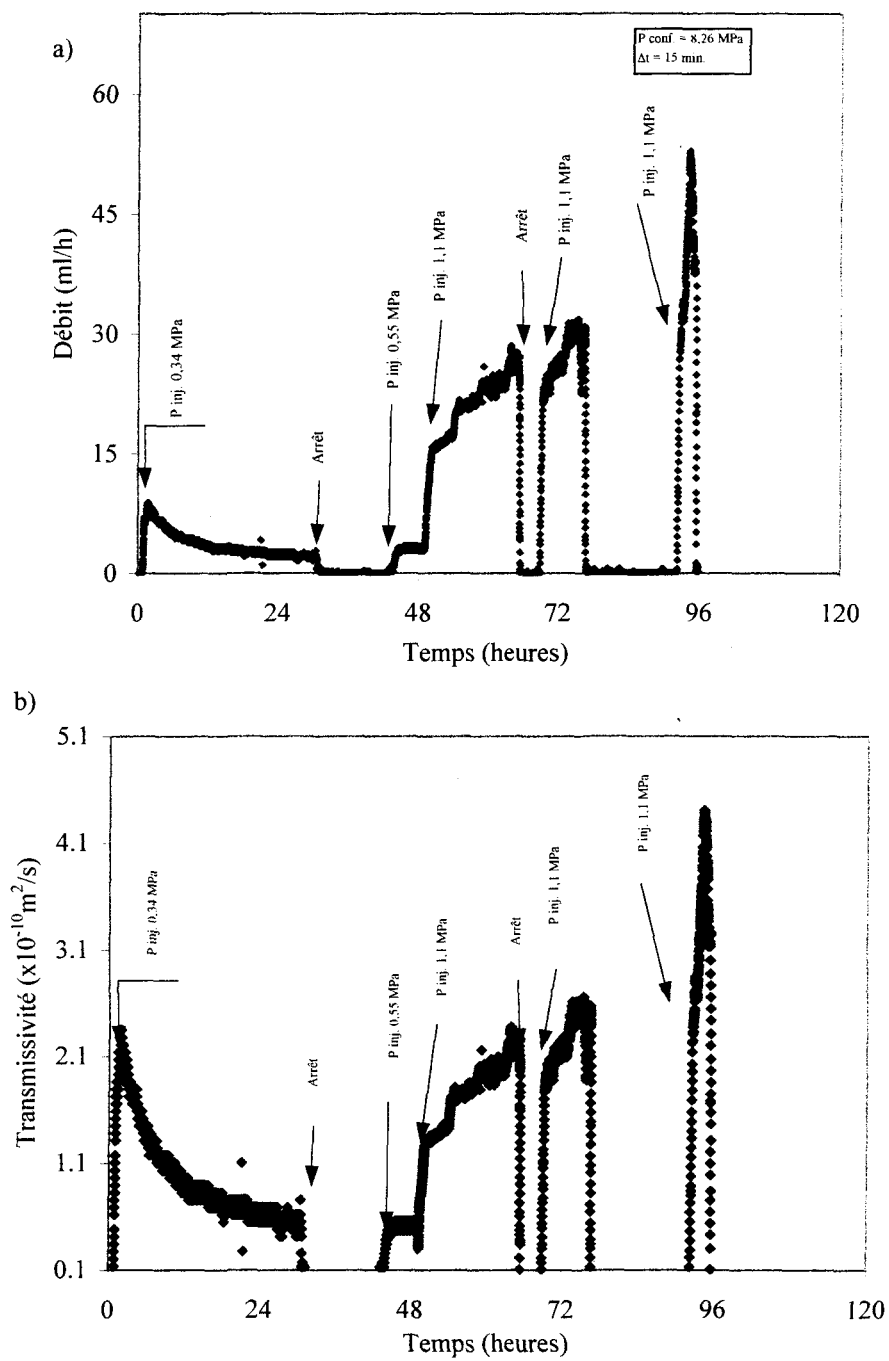


Figure 11.1: Débit d'eau récupérée (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 1 à pH 2.

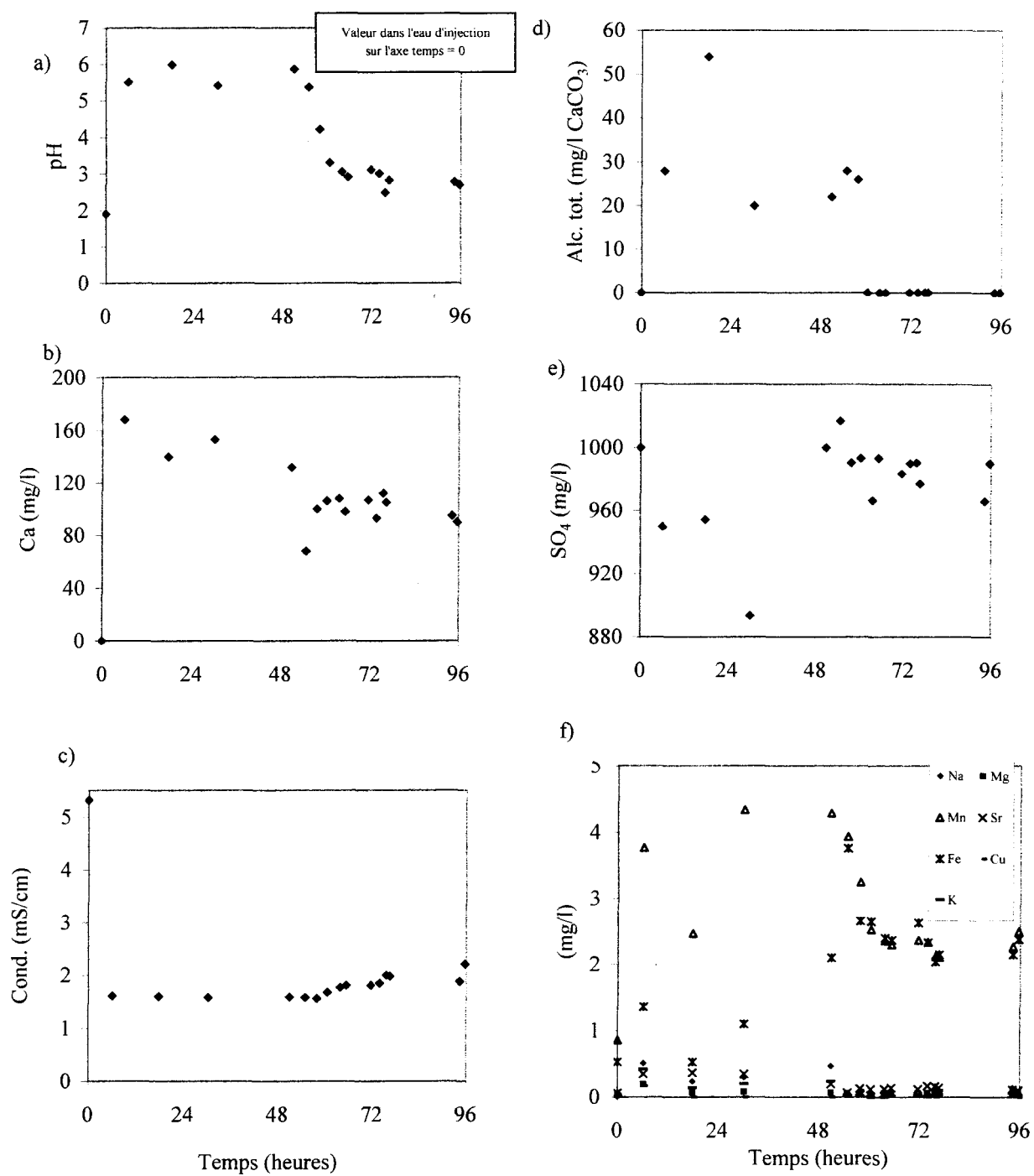


Figure 11.2: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 1 à pH2;
 a) pH, b) Calcium, c) Conductivité électrique, d) Alcalinité totale,
 e) Sulfate, f) Autres ions.

Le Ca, l'alcalinité totale et les autres éléments mineurs, tels que Na, Mg, Mn, Sr, Cu et K suivent un comportement similaire (figures 11.2b, d et f) avec une brusque augmentation au début de l'essai (0 et 10 heures), une diminution des concentrations plus élevées dans l'eau entre 0 et 50 heures d'essai; par la suite, la concentration des ions reste à peu près constante. Le sulfate subit une diminution graduelle jusqu'à 30 heures, une augmentation à 50 heures et une légère diminution par la suite.

11.1.2 Échantillon 2

a) Résultats hydrauliques

Sous un confinement d'environ 8,26 MPa (1200 psi), l'échantillon 2 a subi des injections d'eau avec trois valeurs de pH : une injection à pH 7, une à pH 4 et une à pH 2.

Pour une injection d'eau à pH 7 et sous une pression d'injection de 0,28 MPa (40 psi), on assiste à une augmentation rapide du débit dans les deux premières heures jusqu'à une valeur maximale de 150 ml/h, correspondant à une transmissivité de fracture de $4 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (figure 11.3a et b). Ensuite, le débit diminue à peu près aussi rapidement que son augmentation précédente durant deux heures d'essai, puis il continue à diminuer, après cet intervalle, mais de façon plus lente, jusqu'à se stabiliser à 8 ml/h, correspondant à une transmissivité de fracture d'environ $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ après une durée de 30 heures d'essai.

Pour une injection d'une eau à pH 4 et sous une même pression d'injection de 0,28 MPa, l'évolution du débit d'eau et de la transmissivité de la fracture en fonction du temps est similaire à celle du débit et de la transmissivité de la fracture pour une injection d'eau à pH 7 (figure 11.4a et b). La valeur du débit pour l'essai à pH 4 est, par contre, beaucoup plus faible. Le débit d'eau maximal atteint au début de l'essai, vers 3 heures, est de 12 ml/h, pour une transmissivité de l'ordre de $3,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, puis ce débit diminue jusqu'à devenir constant à 2,9 ml/h, pour une transmissivité de $8 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, à 27 heures d'essai. Même après une ré-augmentation de la pression d'injection d'eau à 0,4 et à 0,55 puis à 1,24 MPa, on note toujours la même évolution du débit en fonction de temps : soit une augmentation au début de l'application de la nouvelle valeur de pression plus élevée puis une diminution avec le temps jusqu'à une valeur constante du débit. Cependant, on remarque que, pour une valeur donnée de pression d'injection, le débit d'eau se stabilise toujours à une valeur plus élevée que celle d'un essai précédent. L'évolution de la transmissivité de la fracture semble ne pas être influencée par les augmentations de la pression d'injection. Elle subit, par contre, une diminution continue après 3 heures d'essai et demeure entre de 5×10^{-11} et $8 \times 10^{-11} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.

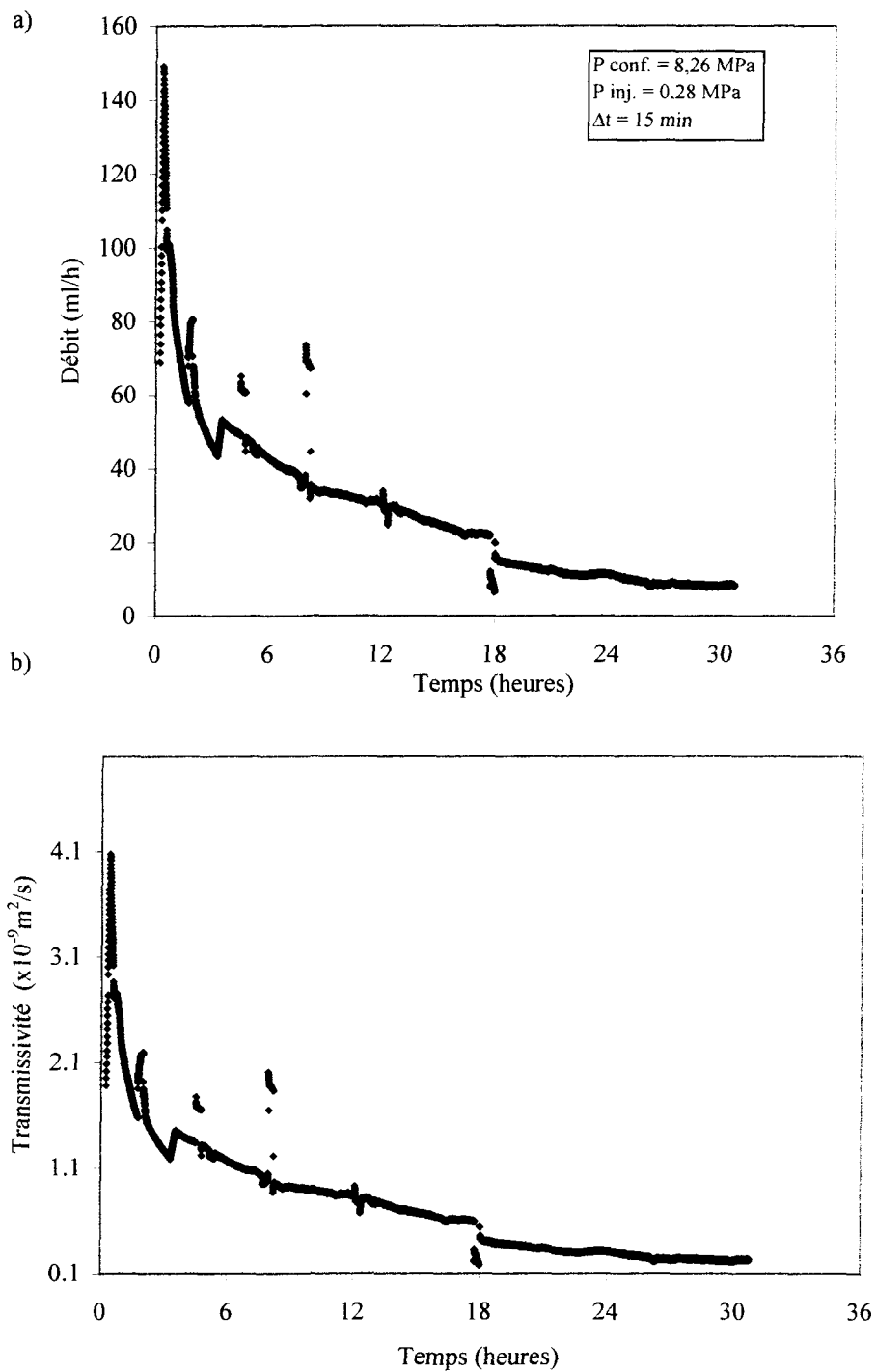


Figure 11.3: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH7.

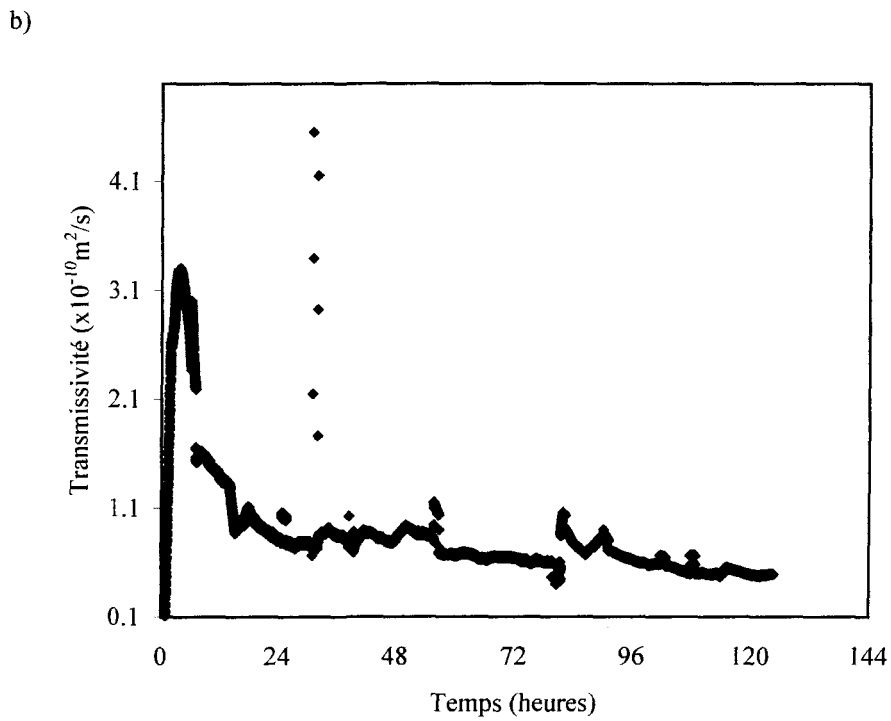
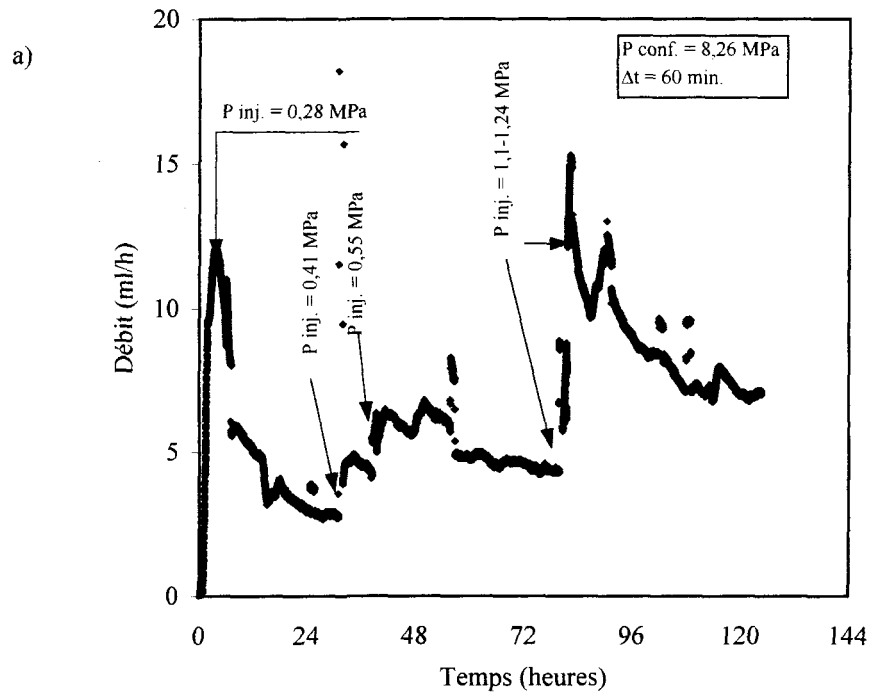


Figure 11.4: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH4.

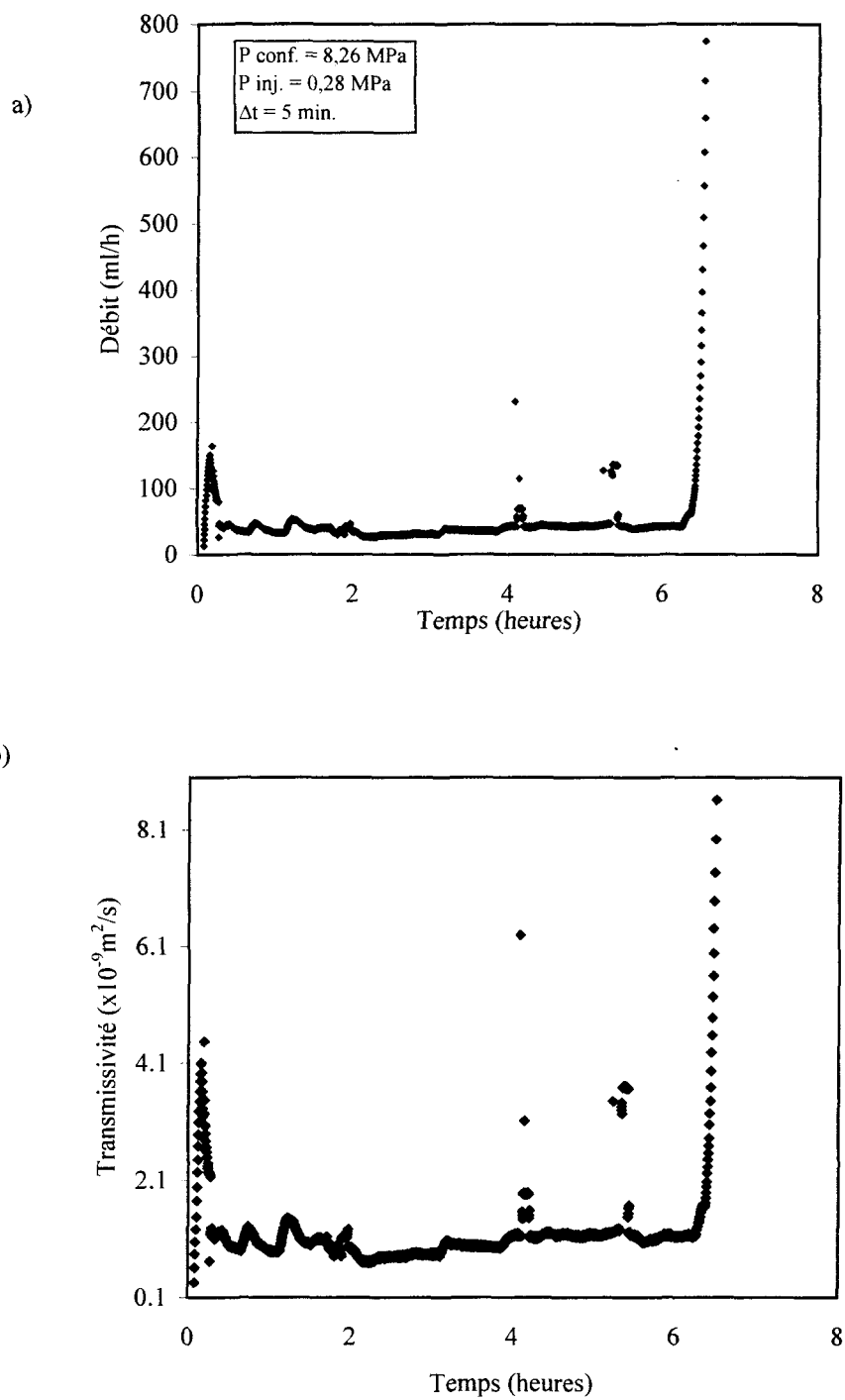


Figure 11.5: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH2.

L'injection d'eau à pH 2 et sous une pression de 0,28 MPa (figure 11.5a et b) provoque une augmentation rapide du débit jusqu'à une valeur de 150 ml/h, correspondant à une augmentation de la transmissivité de la fracture jusqu'à $4 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, après le début de l'essai. Puis on observe une diminution avec à peu près la même allure jusqu'à un débit d'environ 40 ml/h et une transmissivité de $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, qui demeurent à peu près constants pendant 6 heures d'essai. Après 6 heures d'essai, le débit subit une ré-augmentation très importante dépassant les 1000 ml/h après 6 heures et demi, moment où l'essai a été arrêté. Par conséquent, la transmissivité de la fracture suit la même tendance avec une augmentation à des valeurs dépassant $1 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ après les 6 heures et demi d'essai.

b) Résultats hydrochimiques

Dans le cas de l'injection d'eau à pH neutre, le graphique du pH en fonction du temps montre un pH stable entre 6 et 7 (figure 11.6a). La concentration des éléments majeurs et mineurs, tels que le SO_4 , Ca, Na, Sr et Fe, augmente dans l'eau à la sortie durant l'essai (figure 11.6b, c). La conductivité électrique augmente aussi puisqu'elle est fonction de la concentration des ions dans l'eau, de 0,0025 à 0,27 mS/cm (figure 11.6e). L'alcalinité est plus variable en fonction du temps (figure 11.6d).

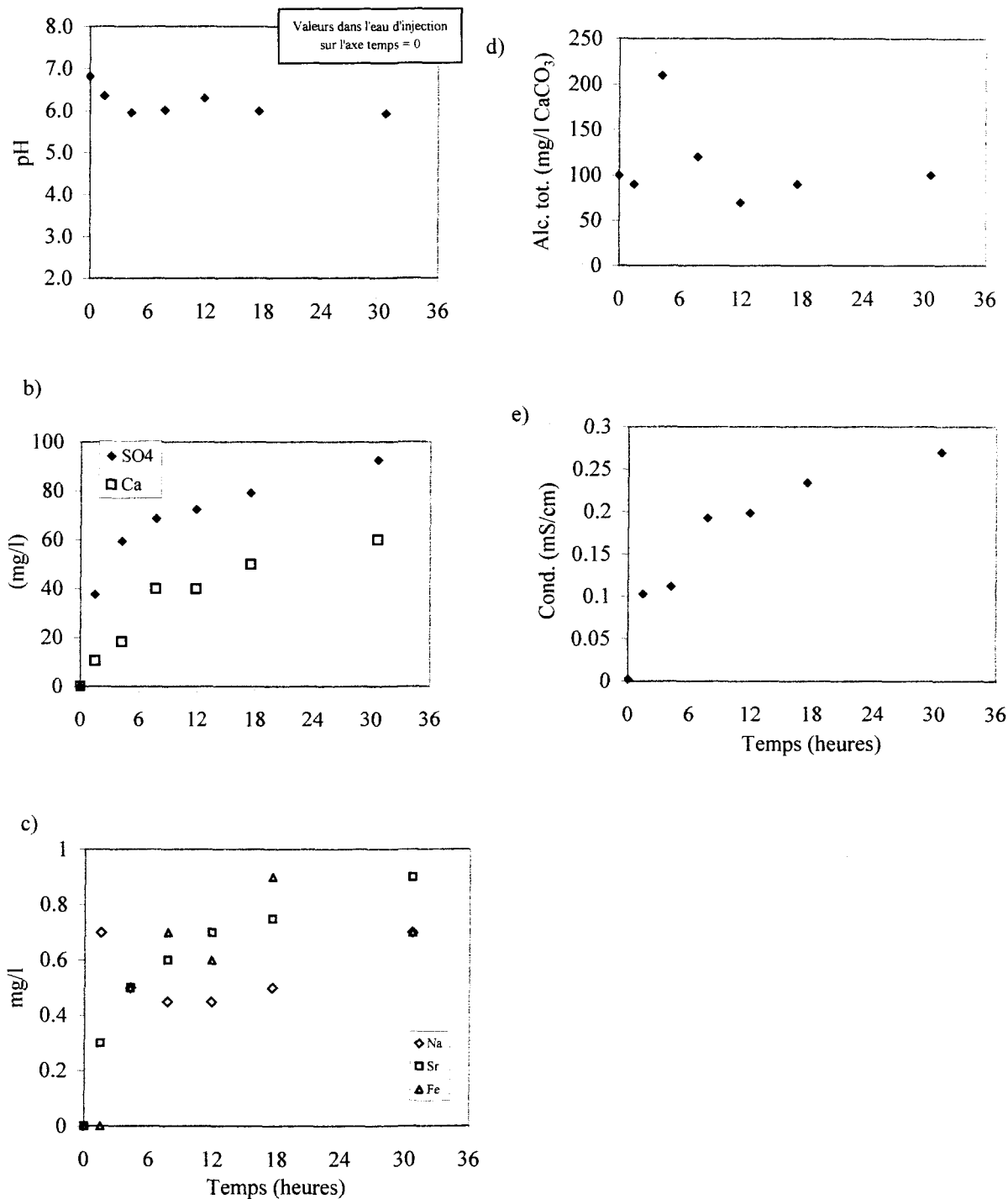


Figure 11.6: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 7; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Conductivité électrique.

Dans les cas de SO_4 et de Ca (figure 11.6b), l'augmentation de leur concentration est plus rapide entre 0 et 12 heures. Durant cet intervalle de temps, la concentration de Ca et de SO_4 passe des valeurs inférieures à 1 mg/l à 40 mg/l pour le Ca et à 70 mg/l pour le SO_4 . Après cette phase d'essai, l'augmentation en ces ions est moins rapide et passe de 40 à 60 mg/l et de 70 à 93 mg/l respectivement. La concentration en Na, Sr et Fe durant l'essai ne dépasse pas 1 mg/l.

Dans le cas de l'injection à pH 4, l'échantillon a été soumis à plusieurs valeurs de pression d'injection d'eau durant l'essai, allant de 0,28 MPa jusqu'à 1,24 MPa (figure 11.4). Les graphiques de l'évolution des différents paramètres physico-chimiques et chimiques sont montrés en fonction du temps (figure 11.7). On remarque que le pH augmente dès le départ jusqu'à la neutralité (pH=6,5) dans le premier volume d'eau recueilli après 7 heures d'essai (figure 11.7a), et diminue très légèrement tout le long de l'essai.

Les tracés de la conductivité électrique, de Ca, de SO_4 et de Sr en fonction du temps suivent une même évolution (figure 11.7b, c et e). Il y a augmentation de la concentration des ions Ca, SO_4 et Sr dans l'eau à la sortie durant les premières 48 heures d'essai. Après cette phase, il y a une diminution de la quantité de ces éléments dans l'eau jusqu'à la fin de l'essai. La concentration en SO_4 atteint un maximum de 368 mg/l à 48 heures d'essai et se stabilise vers la fin de l'essai à environ 200 mg/l. Pour le Ca, sa concentration maximale est de 120 mg/l atteinte à 48 heures d'essai et se stabilise vers la fin de l'essai à 70 mg/l. La

conductivité électrique suit une évolution semblable à celle de SO_4 , étant donné que cet ion domine la concentration des autres ions présents dans l'eau. Elle augmente de 0,034 à 0,55 mS/cm, puis elle diminue à environ 0,32 mS/cm vers la fin de l'essai.

Après avoir été injecté avec une eau à pH neutre et avec une eau à pH 4, l'échantillon 2 a été soumis à une injection d'eau à pH 2. La pression d'injection de 0,28 MPa était alors suffisante pour produire des débits d'eau mesurables à la sortie de la fracture.

Le pH de l'eau à la sortie présente des valeurs proches de la neutralité, autour de 6 dès le premier prélèvement, et reste constant durant à peu près 6 heures d'essai (au moins) et diminue après jusqu'à sa valeur initiale (figure 11.8a). Cette diminution est corrélée avec l'augmentation du débit d'eau dans la fracture.

Les éléments chimiques dans l'eau à la sortie, tels que le Ca, Fe, Zn et K, suivent une évolution à peu près semblable, leur concentration est plus élevée durant les premières 6 heures et subit une diminution après cette phase d'essai (figure 11.8b et c). La concentration de Ca est élevée dès le premier prélèvement, atteignant un plateau dès le départ et elle reste constante à environ 400 mg/l jusqu'à 6 heures d'essai. Après cet intervalle, la concentration en Ca chute à une valeur nulle. Cependant, le SO_4 suit une évolution contraire (figure 11.8b); sa teneur étant initialement élevée dans l'eau d'injection

(environ 945 mg/l), elle est diminuée à la sortie de l'échantillon pour atteindre des concentrations variant entre à 580 et 700 mg/l durant les premières 6 heures d'essai, puis le SO_4 retrouve sa concentration dans l'eau d'injection après cette période. La conductivité électrique est diminuée par rapport à celle de l'eau injectée (5,32 mS/cm) dès le premier prélèvement à environ 1,6 mS/cm; elle demeure à cette valeur pendant 6 heures d'essai; après cette période, elle augmente à sa valeur dans l'eau d'injection. L'alcalinité est augmentée à la sortie de l'échantillon durant presque tout la période de l'essai; elle retrouve sa valeur dans l'eau d'injection à la fin, après 6 heures d'essai.

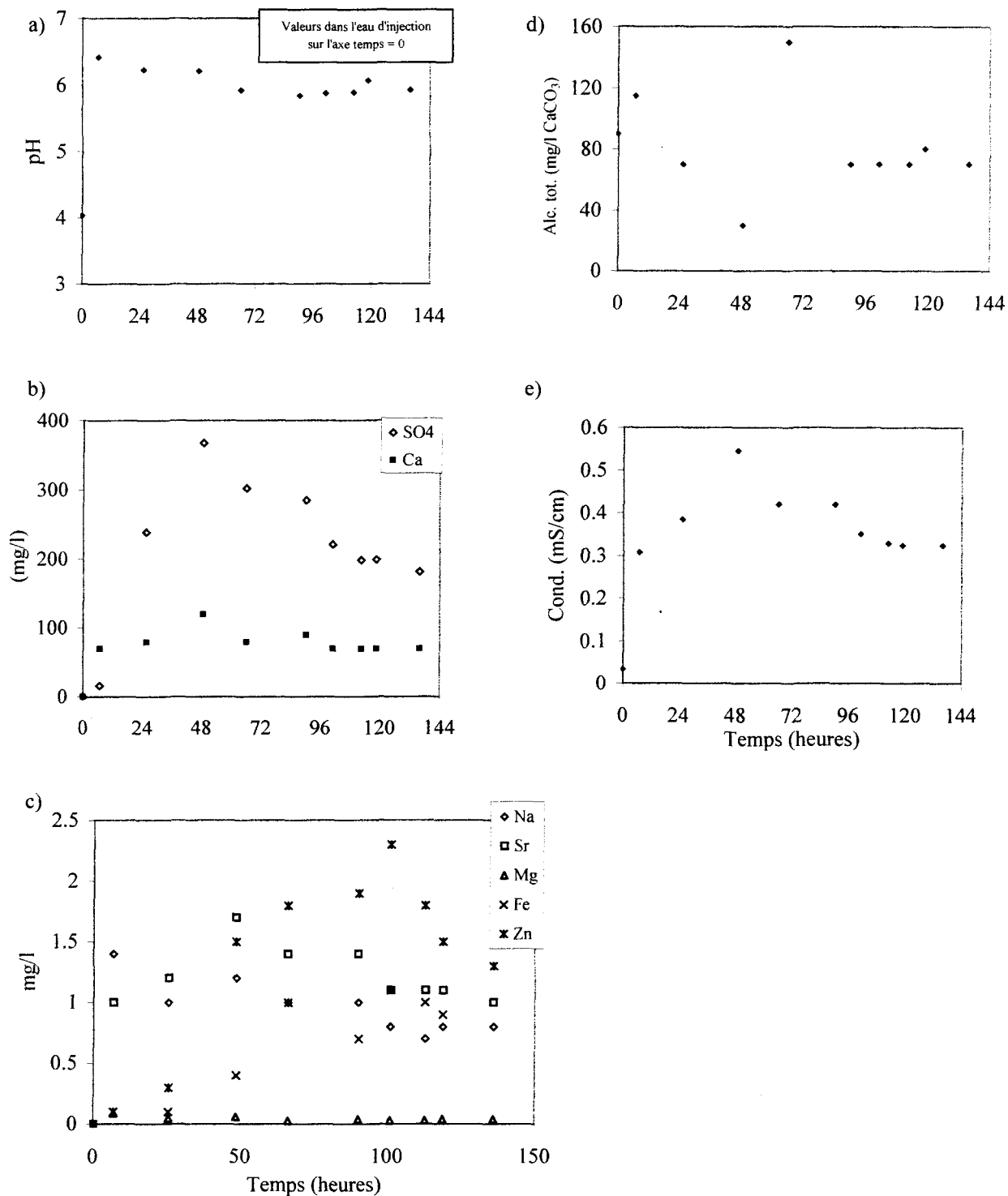


Figure 11.7: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 4; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Conductivité électrique.

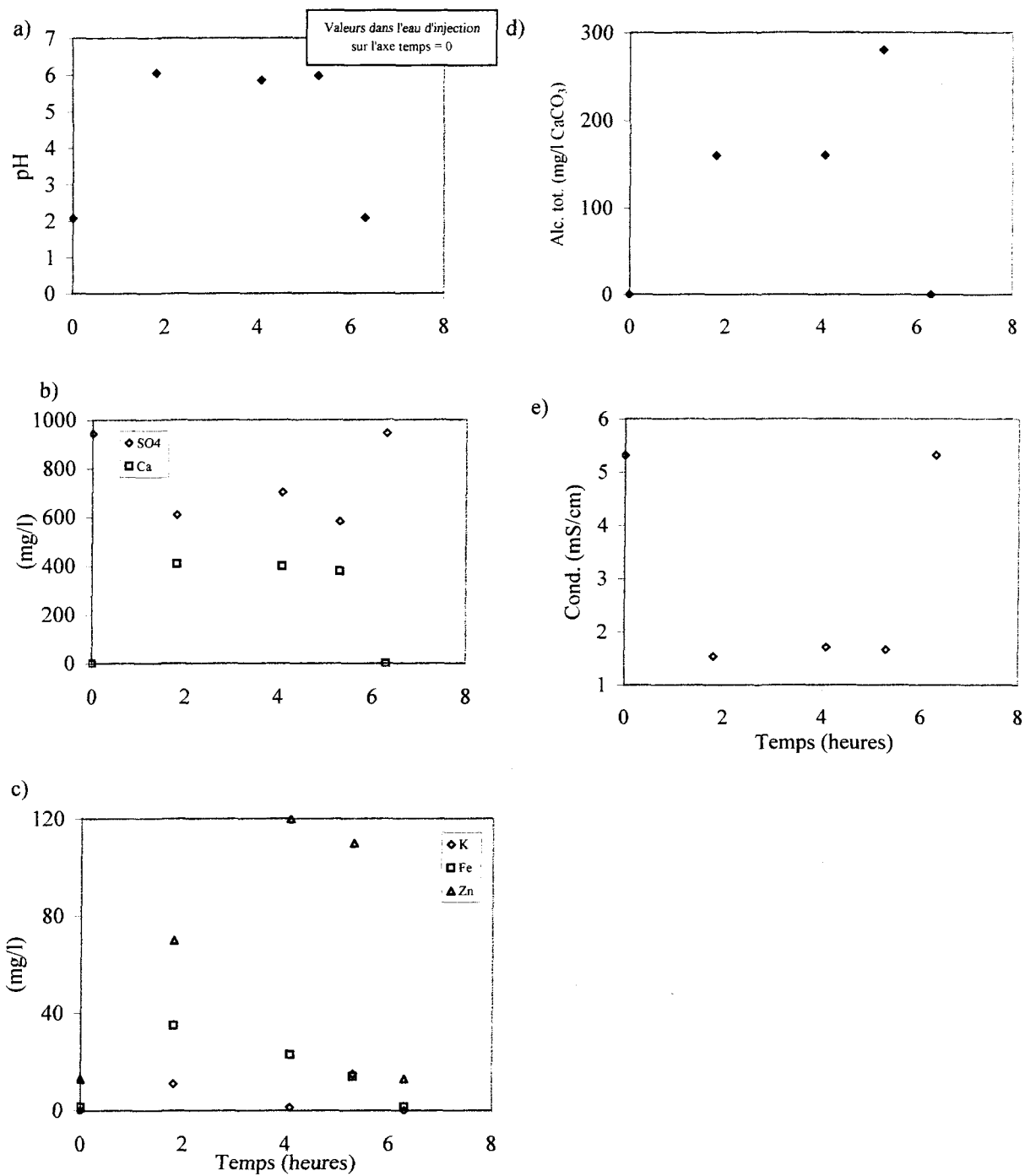


Figure 11.8: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 2; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Conductivité électrique.

11.2 ESSAIS D'INJECTION À PH 2

11.2.1 Échantillon 3

a) Résultats hydrauliques

L'échantillon 3 a été injecté avec une eau à pH 2 et sous une pression de 0,28 MPa (40 psi), et un confinement de 8,26 MPa (1200 psi). On note une augmentation continue du débit d'eau avec le temps durant toute la durée de l'essai (figure 11.9a). Cette augmentation du débit est plus rapide au début, dans les cinq premières minutes de l'essai. Le débit d'eau atteint à la fin de l'essai, après 45 minutes, est de l'ordre de 1800 ml/h. L'augmentation du débit d'eau correspond évidemment à une augmentation de la transmissivité de la fracture, laquelle atteint des valeurs d'environ $6 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ après les 45 minutes d'essai (figure 11.9b).

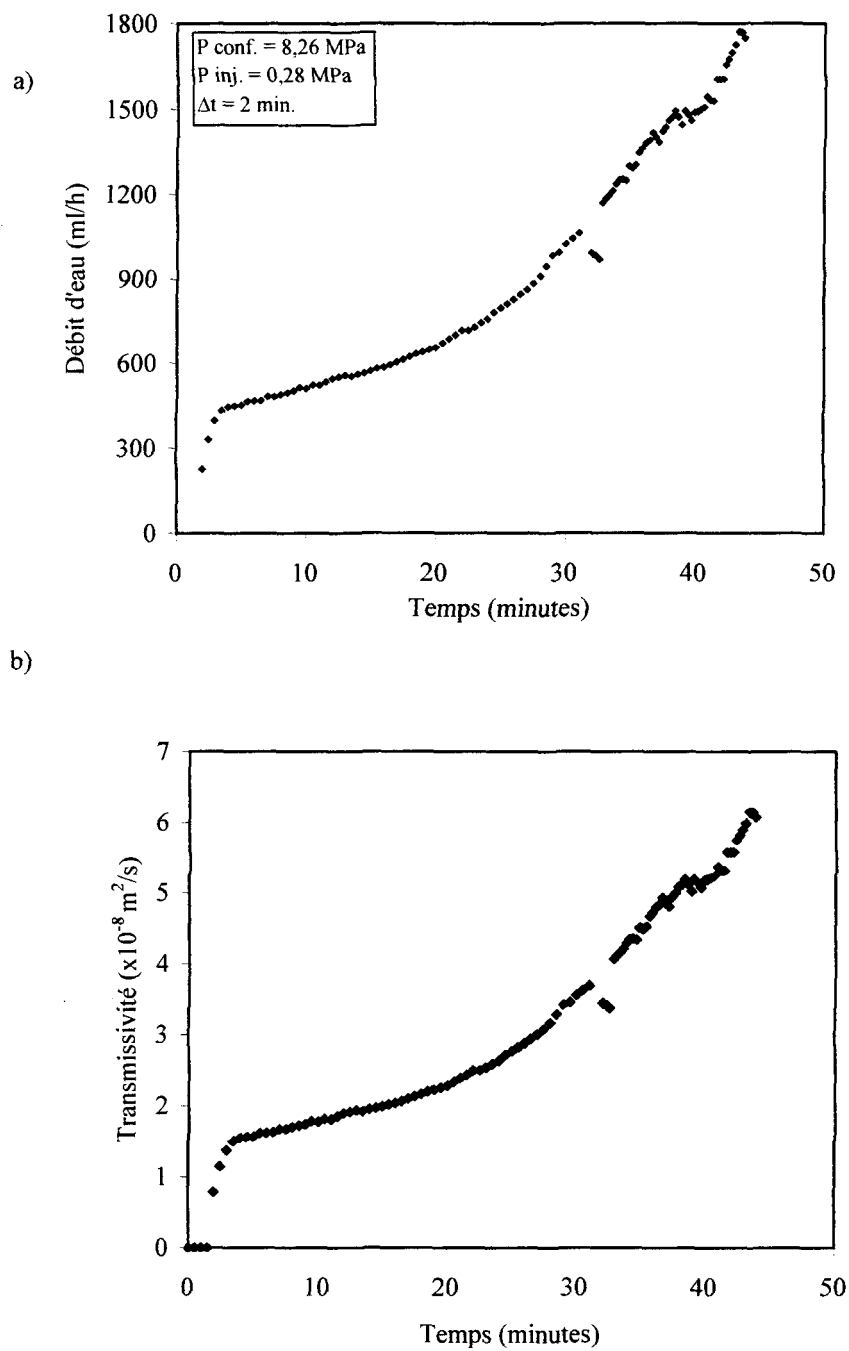


Figure 11.9: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 3 à pH2.

b) Résultats hydrochimiques

Le pH dans l'eau à la sortie atteint la valeur de 6 dès le départ, par contraste au pH de 2, dans l'eau d'injection, puis commence à diminuer au fur et à mesure que l'expérience se déroule, surtout après 28 heures d'essai, pour se stabiliser à 2,6 après 55 heures d'essai (figure 11.10a). L'alcalinité à la sortie suit la même tendance avec le temps (figure 11.10d). La conductivité électrique suit une tendance contraire avec une diminution de 5,67 mS/cm, sa valeur au point d'injection, dès le début à environ 1,6 mS/cm; après 28 heures d'essai, elle augmente légèrement à 2,7 mS/cm, la valeur à la fin de l'essai.

Pour le Ca, sa concentration dans l'eau à la sortie subit une augmentation jusqu'à un maximum de 350 mg/l dès le départ, et une diminution plus lente en fonction du temps jusqu'à 250 mg/l à la fin de l'essai (figure 11.10b). La concentration en SO_4 dans l'eau à la sortie subit des fluctuations autour de sa valeur au point d'injection en fonction du temps (figure 11.10b). Le Cl suit une évolution à peu près semblable à celle de SO_4 , tandis que l'évolution de Fe et de Mn est différente (figure 11.10c et e). La concentration en fer dans l'eau à la sortie augmente avec le temps avec un maximum de 74 mg/l vers 50 heures. La concentration en Mn dans l'eau à la sortie est plus élevée que celle dans l'eau d'injection dès le début de l'essai; elle atteint un maximum de 3 mg/l vers 10 heures d'essai puis diminue progressivement après ce temps.

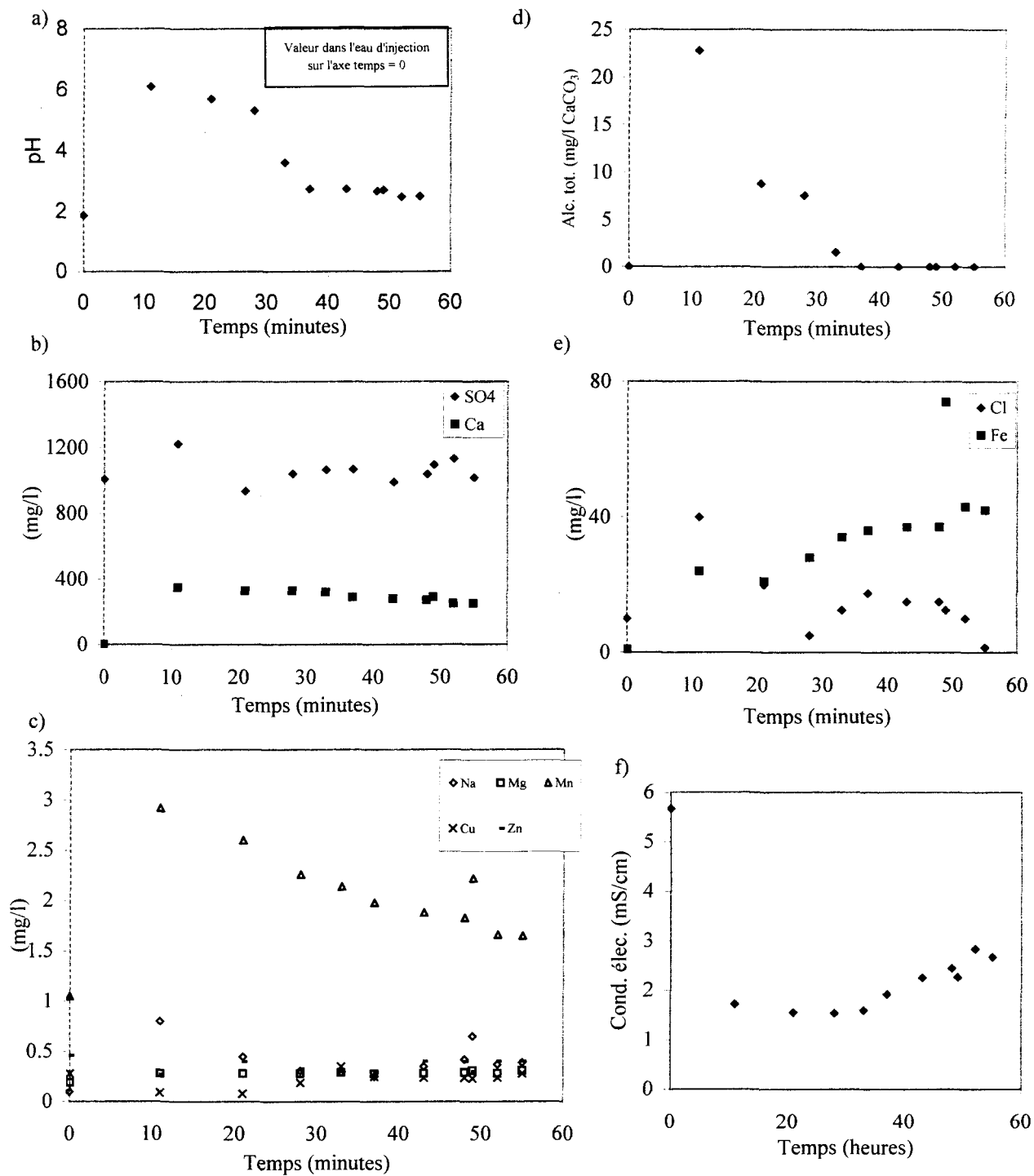


Figure 11.10: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 3 à pH 2; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Fer et Chlore, f) Conductivité électrique.

11.2.2 Échantillon 4

a) Résultats hydrauliques

L'échantillon 4 a été soumis à un confinement de l'ordre de 12,38 MPa (1800 psi) et à une pression d'injection d'eau de 1,1 MPa (160 psi). Des pressions d'injection inférieures à cette valeur ont généré des débits très faibles et non mesurables au début de l'essai, durant les 15 premières minutes (figure 11.11a). Après l'augmentation de la pression d'injection d'eau à 1,1 MPa, on remarque une augmentation du débit d'eau plus rapide durant les cinq minutes qui suivent jusqu'à 20 ml/h; le débit se stabilise à cette valeur durant à peu près 20 minutes et recommence à augmenter plus lentement jusqu'à 110 ml/h vers 140 minutes d'essai. Après cette phase, le débit augmente très rapidement en fonction du temps (changement radical de la pente de la courbe). La transmissivité de la fracture subit une augmentation graduelle dès le début en suivant celle du débit d'eau (figure 11.11b) à environ 2×10^{-10} m²/s après 20 minutes d'essais puis elle continue à augmenter progressivement jusqu'à 9×10^{-10} m²/s après 140 minutes d'essai. Après cette période, la transmissivité augmente très rapidement dépassant 1×10^{-8} m²/s après 150 minutes d'essai.

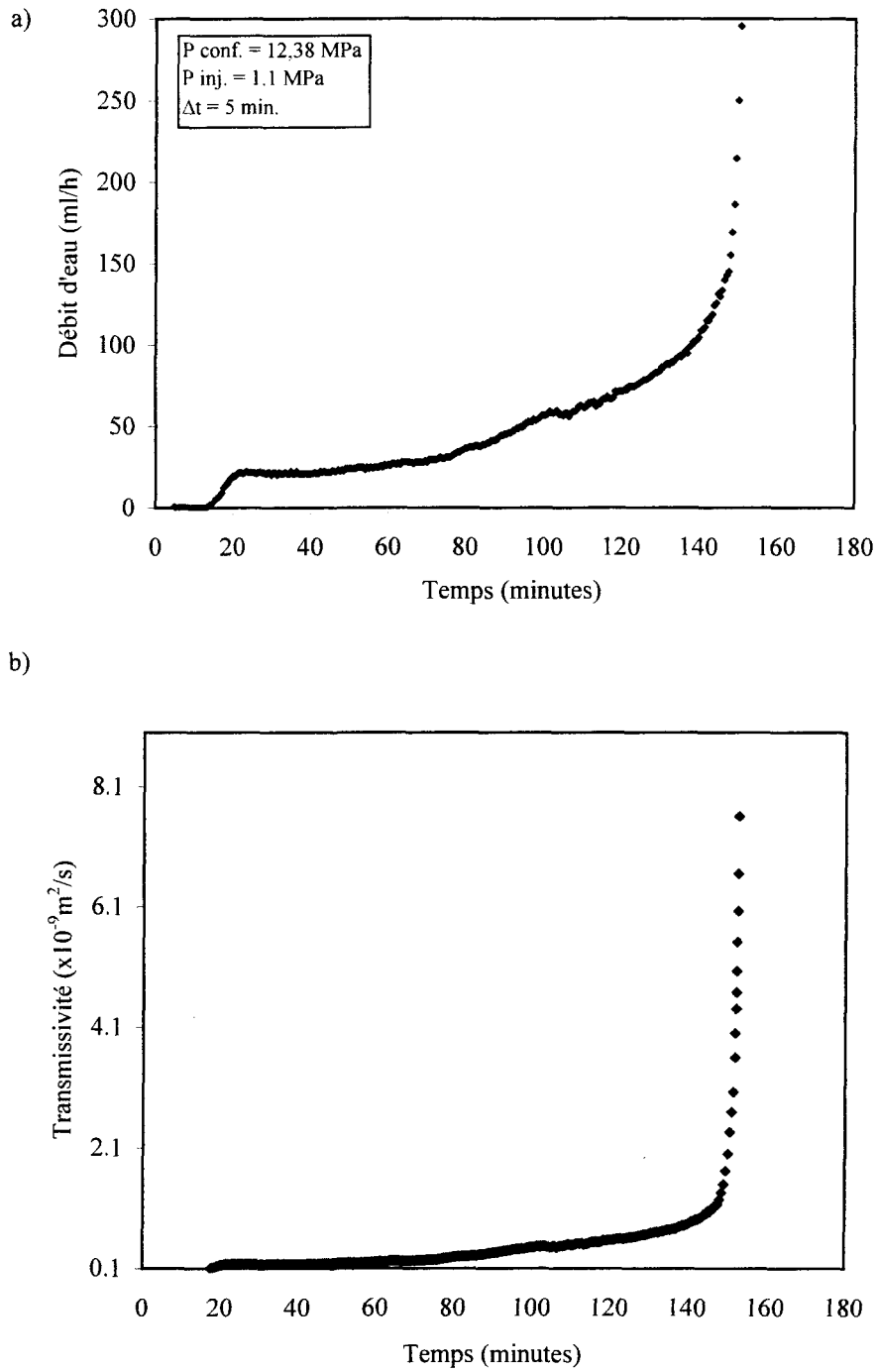


Figure 11.11: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 4 à pH2.

b) Résultats hydrochimiques

Le graphique du pH en fonction du temps montre une évolution du pH proche de l'équilibre ($\text{pH} = 6$) durant presque toute la durée de l'essai, jusqu'à environ 140 minutes (figure 11.12a). Après cette phase, le pH dans l'eau à la sortie diminue très rapidement vers la valeur de 2, soit celle de l'eau d'injection.

La concentration en SO_4 dans l'eau à la sortie subit une diminution de sa valeur au point d'injection de 1000 mg/l à 737 mg/l à la fin de l'essai qui a duré 152 minutes (figure 11.12b). Par contre, la concentration en Ca dans l'eau à la sortie est plus élevée que dans l'eau d'injection; elle atteint 311 mg/l dès le début de l'essai pour y demeurer constante jusqu'à 140 minutes d'essai. Après cette phase, on assiste alors à une diminution de sa concentration qui atteint 172 mg/l vers 152 minutes d'essai, moment où l'essai est interrompu (figure 11.12b).

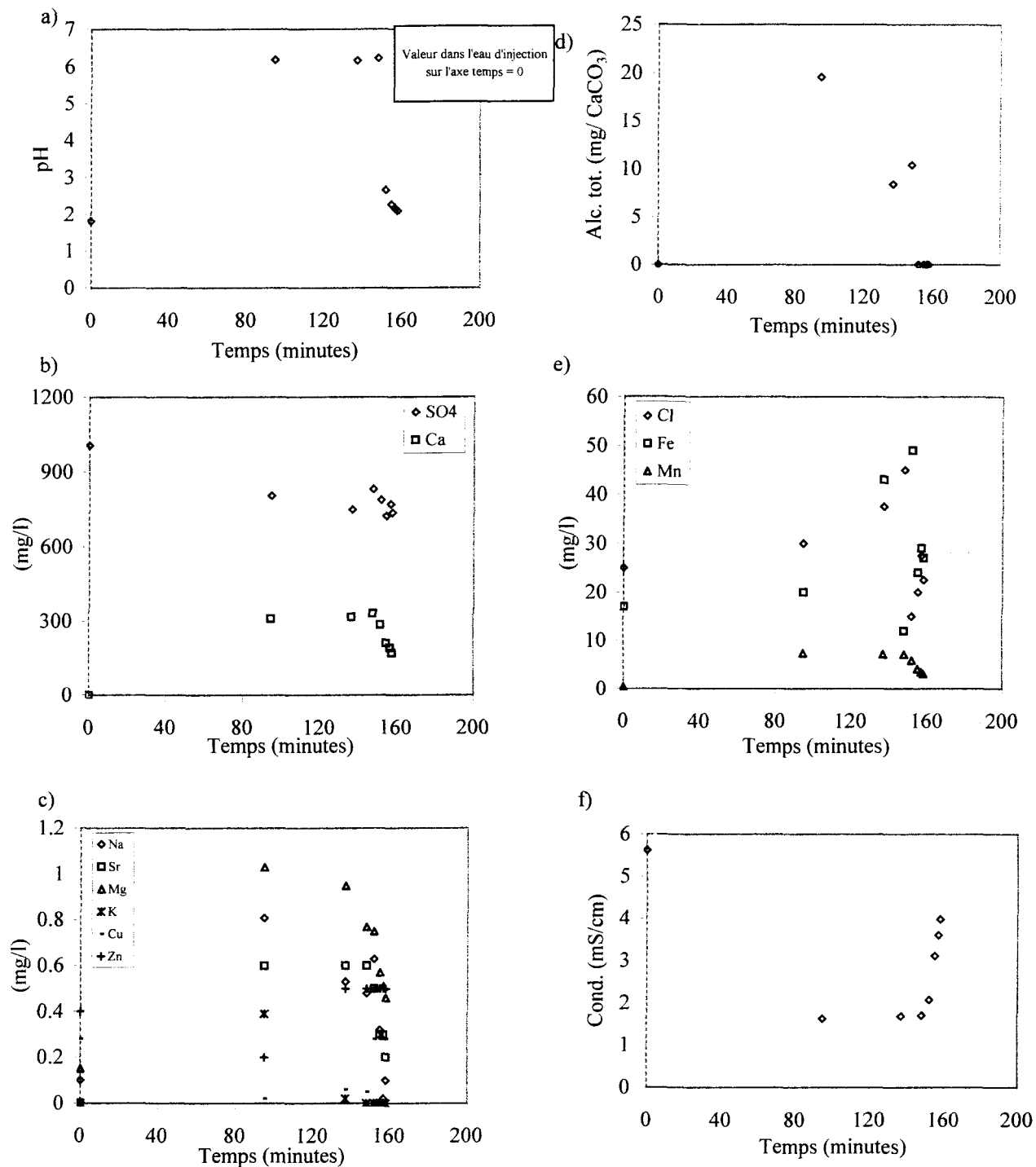


Figure 11.12: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 4 à pH 2; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Fe, Cl et Mn , f) Conductivité électrique.

Le Cl dans l'eau à la sortie subit une augmentation de sa concentration durant l'essai avec des valeurs supérieures à 25 mg/l, correspondant à la concentration dans l'eau d'injection, jusqu'à un maximum de 45 mg/l vers 140 minutes; par la suite, la concentration de Cl à la sortie diminue pour retrouver la valeur dans l'eau d'injection vers la fin de l'essai. Le Fe à la sortie subit à peu près la même évolution que le Cl avec une concentration maximale de 50 mg/l vers 146 minutes de l'essai. Le Mn à la sortie subit, par contre, une évolution très semblable à celle de Ca, mais avec des teneurs plus faibles ne dépassant pas la concentration de 8 mg/l. Des éléments mineurs, tels que Mg, Na et Sr enregistrent à la sortie des concentrations élevées par rapport à l'eau d'injection, avec des maxima vers 90 minutes; ils subissent une diminution après cette période et de façon plus prononcée après 140 minutes d'essai.

11.2.3 Échantillon 5

a) Résultats hydrauliques

L'échantillon 5 a été soumis à une contrainte de confinement de 12,38 MPa (1800 psi). Une pression d'injection de l'ordre de 0,28 MPa (40 psi) suffisait pour obtenir des débits d'eau mesurables à la sortie de la fracture. L'essai s'est poursuivi avec la même pression d'injection jusqu'à la fin.

Le débit d'eau et la transmissivité de la fracture suivent évidemment la même évolution en fonction du temps (figure 11.13a et b). Au début de l'essai, le débit d'eau augmente jusqu'à une valeur maximale de 50 ml/h, correspondant à une transmissivité de l'ordre de $1,6 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, à 10 minutes d'essai. Après cet intervalle de temps, le débit diminue progressivement durant une période d'une heure pour se stabiliser à 35 ml/h, correspondant à une transmissivité de $8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Vers 2 heures 20 minutes d'essai, on assiste à une augmentation très rapide du débit et par conséquent à celle de la transmissivité. La durée totale de l'essai dans le cas de l'échantillon 5 est d'environ trois heures.

b) Résultats hydrochimiques

Seuls deux volumes d'eau ont été récupérés pour cet essai: le premier durant l'essai et le deuxième à la fin. On remarque que le pH de l'eau à la sortie est proche de la neutralité, atteignant la valeur de 6 après 2 heures d'essai (figure 11.14a). Pour le SO_4 , sa concentration à la sortie de 1042 mg/l est plus élevée que dans l'eau d'injection (946 mg/l) (figure 11.14b). L'eau à la sortie est aussi plus concentrée en Ca avec une valeur d'environ 370 mg/l; la concentration de Ca dans l'eau d'injection est inférieure à 1 mg/l (figure 11.14b). La concentration des ions Zn, Fe, Cl, Mn, Mg, et Na dans l'eau à la sortie atteint 30, 26, 13, 5,7, 3 et 1,1 mg/l respectivement (figure 11.14c). Après 2 heures d'essai, le pH dans l'eau à la sortie diminue jusqu'à sa valeur de point de départ, dans l'eau d'injection,

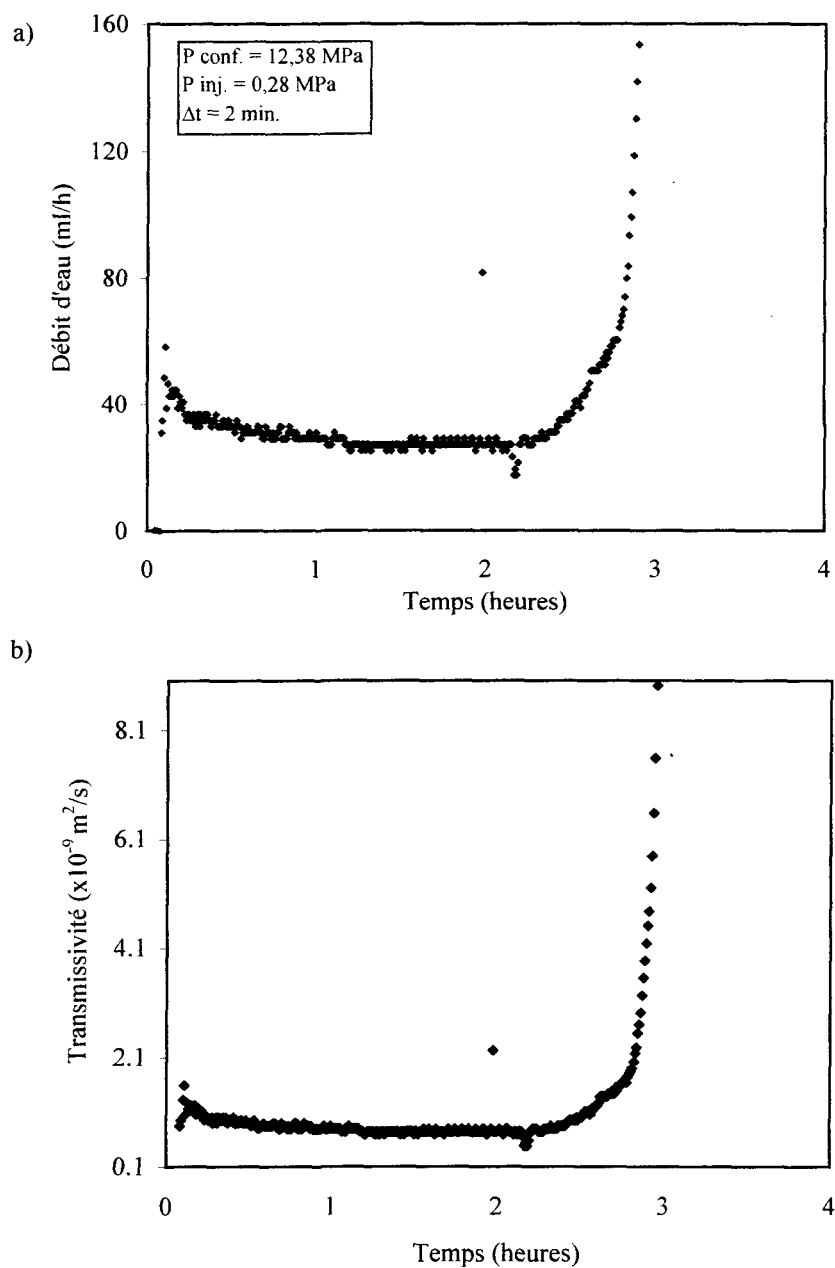


Figure 11.13: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 5 à pH 2.

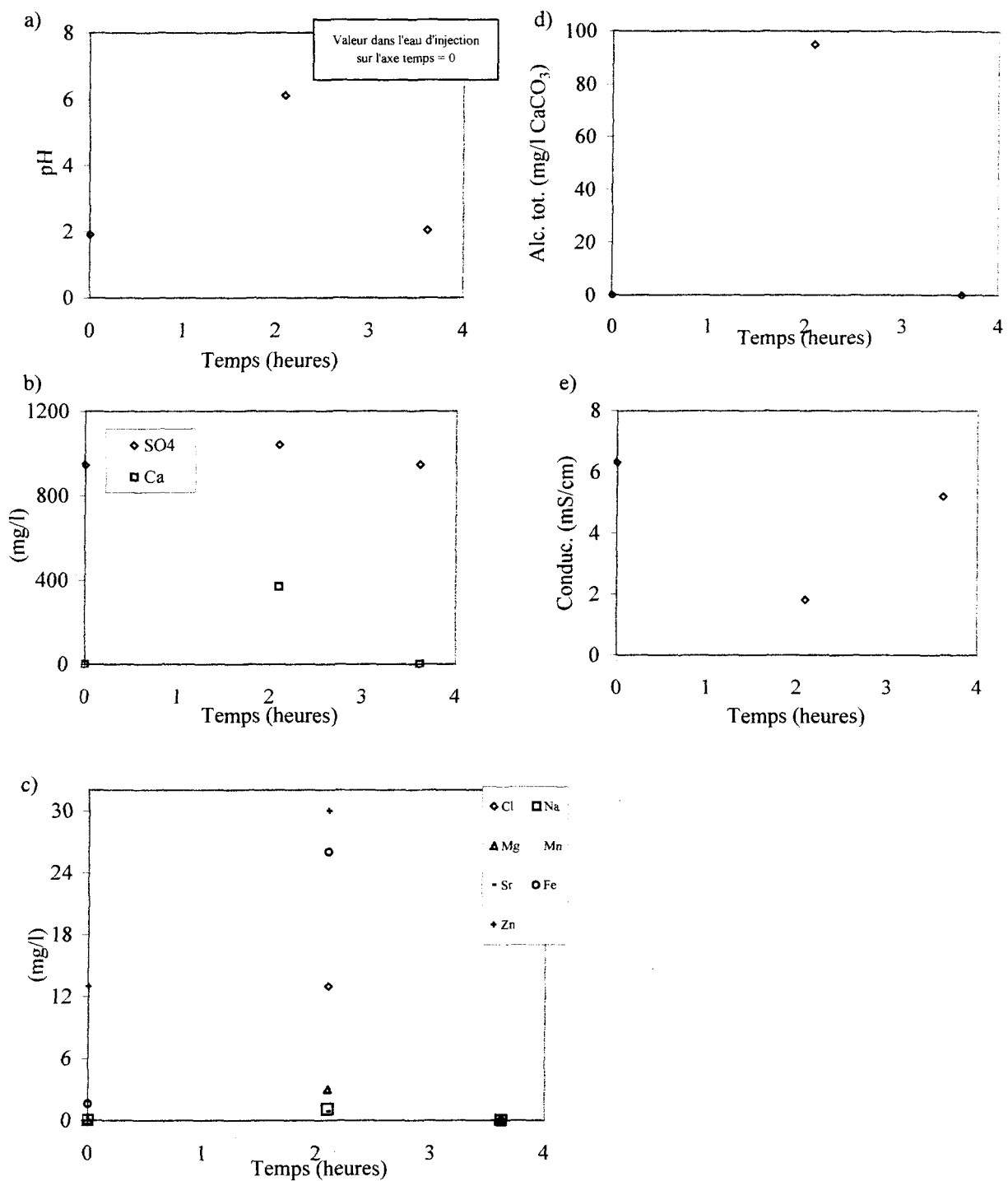


Figure 11.14: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 5 à pH 2, a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Conductivité électrique.

après 3 heures et demi d'essai, moment où l'essai est interrompu. Les ions ont aussi subi une diminution de leur concentration à la sortie jusqu'à des valeurs inférieures à 1 mg/l, sauf dans le cas de SO_4 qui retrouve sa concentration au point d'injection. Ce dernier échantillon d'eau prélevé ne reflète en sorte que la composition dans l'eau d'injection.

11.2.4 Échantillon 6

a) Résultats hydrauliques

L'échantillon 6 a été soumis à une contrainte de confinement plus élevée que les échantillons décrits précédemment, soit 16,5 MPa (2400 psi). La pression d'injection est de l'ordre de 0,28 MPa (40 psi). On note une augmentation rapide du débit à environ 20 ml/h dès la première heure d'essai; le débit se stabilise à cette valeur pendant 9 heures (figure 11.15a). La transmissivité de la fracture suit évidemment la même tendance avec une augmentation et une stabilisation autour de $6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ après 2 heures d'essai (figure 11.15a). Après 9 heures d'essai, le débit et la transmissivité recommencent à augmenter très lentement jusqu'à environ 15 heures où on assiste à une augmentation rapide et importante.

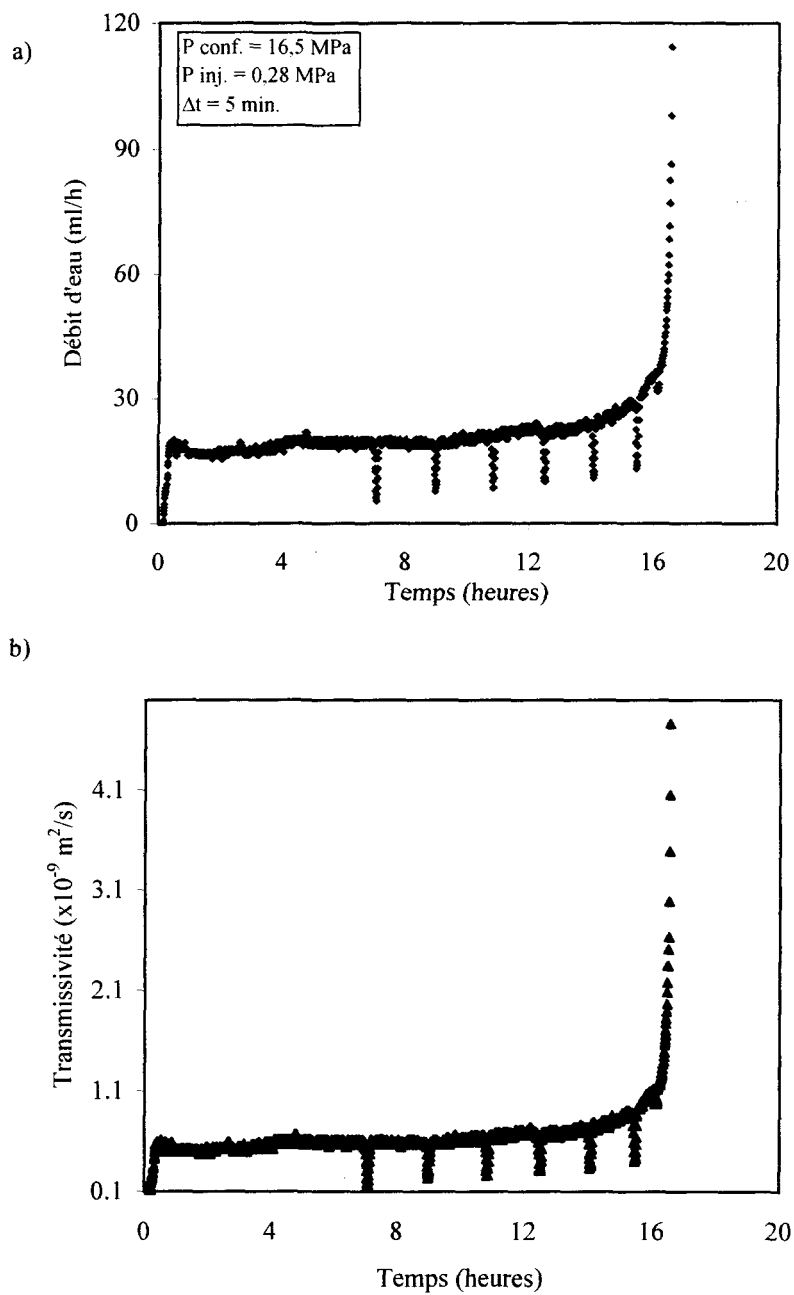


Figure 11.15: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture en fonction du temps pour l'échantillon 6 à pH 2.

b) Résultats hydrochimiques

Dans le graphique du pH en fonction du temps, on remarque que le pH dans l'eau à la sortie est d'environ 6 dès le début du prélèvement (figure 11.16a). Le pH reste stable à cette valeur jusqu'à 16 heures d'essai. Après ces 16 heures d'essai, le pH subit une diminution jusqu'à des valeurs de 2,2 vers la fin de l'essai. La conductivité électrique dans l'eau à la sortie suit l'évolution contraire à celle du pH. L'alcalinité suit à peu près la même évolution que celle du pH.

La concentration en Ca à la sortie atteint une valeur maximale de 330 mg/l dès le début de l'essai et reste à peu près constante à cette valeur jusqu'à 16 heures d'essai (figure 11.16b). Après cet intervalle, la concentration en Ca à la sortie diminue rapidement et atteint 180 mg/l à 17 heures, moment d'arrêt de l'essai.

La concentration en SO_4 à la sortie diminue progressivement en fonction du temps de 777 mg/l, concentration dans le premier volume d'eau prélevée et aussi dans l'eau d'injection, jusqu'à 605 mg/l à 17 heures et retrouve sa concentration initiale après ce temps (figure 11.16b).

La concentration de Fe et de Cl à la sortie est plus élevée que dans l'eau d'injection; elle subit une augmentation avec le temps jusqu'à des maxima de 120 et de 33 mg/l respectivement. L'eau à la sortie est aussi riche en ions Mn, Mg, Na et Sr; la concentration de ces ions suit une évolution similaire à celle de Ca (figure 11.16c). Les ions Mn, Mg, Na et Sr atteignent des valeurs maximales de 8, 2, 0,8 et 0,5 mg/l respectivement.

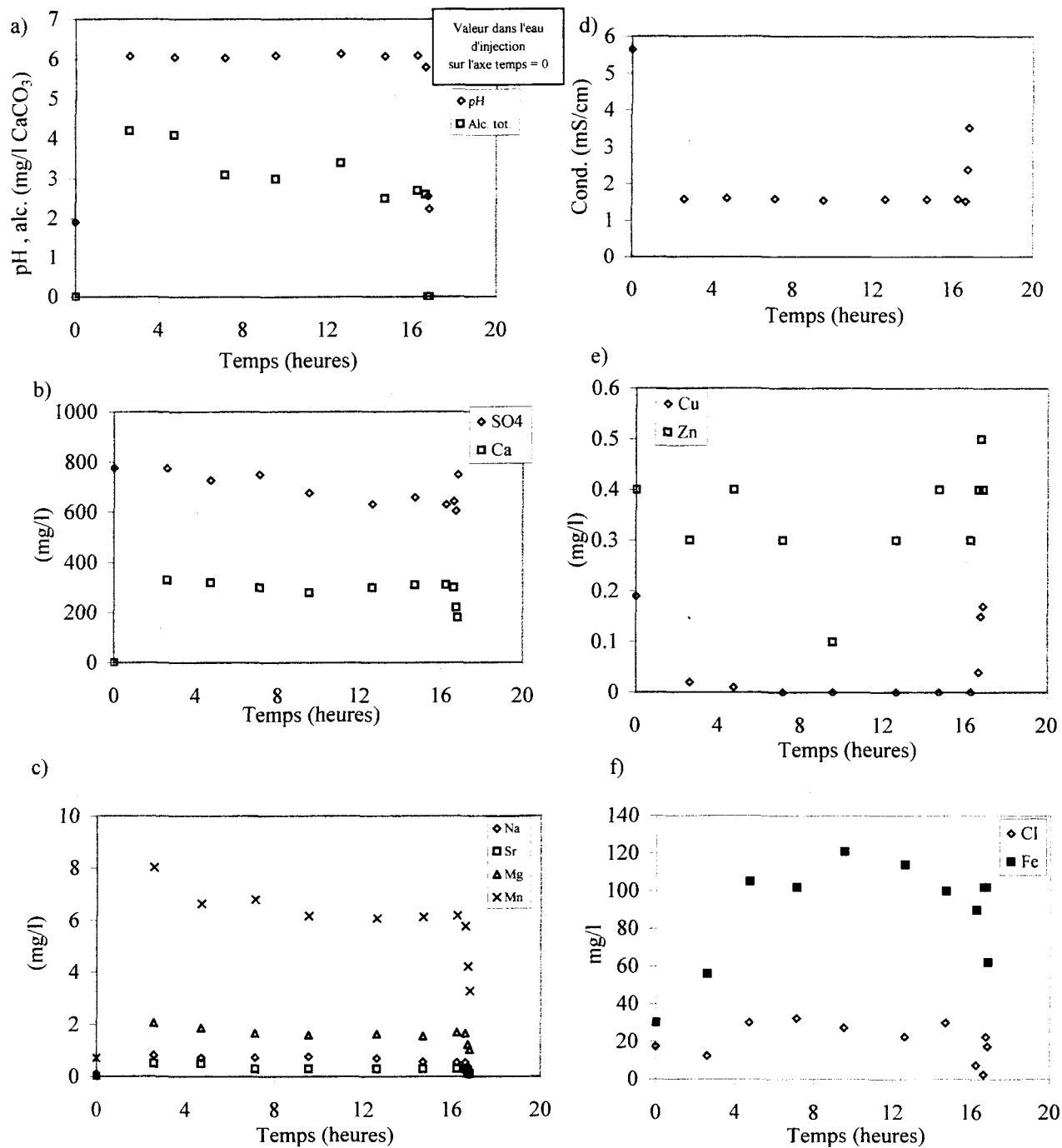


Figure 11.16: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 6 à pH 2; a) pH et alcalinité totale, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Conductivité électrique, e) Cu et Zn, f) Cl et Fe .

11.2.5 Échantillon 7

a) Résultats hydrauliques

Le dernier échantillon de la série d'essais à pH 2 est l'échantillon 7. Il a été soumis à une contrainte de confinement élevée de 16,51 MPa (2400 psi) et une pression d'injection de 0,28 MPa (40 psi). La pression d'injection d'eau a dû être augmentée jusqu'à 1,1 MPa (160 psi) pour obtenir un débit d'eau mesurable à la sortie de la fracture.

Le débit d'eau subit une augmentation en fonction du temps jusqu'à un maximum de 3 ml/h, correspondant à une augmentation de la transmissivité jusqu'à une valeur de $2,3 \times 10^{-11}$ m²/s, après une durée d'essai d'environ 3 heures (figure 11.17a et b). Après cette période, le débit d'eau diminue progressivement jusqu'à devenir constant à 0,2 ml/h après 84 heures d'essai. La transmissivité diminue, par conséquent, aussi et termine avec des valeurs de l'ordre de 1×10^{-12} m²/s.

b) Résultats hydrochimiques

Le graphique du pH en fonction du temps montre un pH à la sortie de 5,4 dès le début, correspondant à la période de débit d'eau maximal de 3 ml/h, entre 0 et 12 heures d'essai; puis une diminution de ce pH à 4,27 vers 40 heures d'essai (figure 11.18a). Le dernier volume d'eau collecté à la fin de l'essai a un pH de 5,1.

La concentration de Ca à la sortie est élevée et atteint sa valeur maximale de 250 mg/l dans le premier échantillon d'eau, puis cette concentration diminue avec le temps jusqu'à 30 mg/l à la fin de l'essai (figure 11.18b). La concentration de SO₄ à la sortie subit une augmentation de la valeur de 850 mg/l, concentration dans le premier volume d'eau prélevée et aussi dans l'eau d'injection, au cours du temps et atteint son maximum de 1000 mg/l après 48 heures d'essai (figure 11.18b).

Les ions mineurs, tels que Cl, Mn, Na, Mg et K, sont plus présents dans l'eau à sortie, et leur concentration maximale est atteinte dans le premier volume d'eau récupéré (figures 11.18c et e). La concentration en Fe dans l'eau à la sortie subit, par contre, une augmentation continue durant l'essai en atteignant 623 mg/l à la fin.

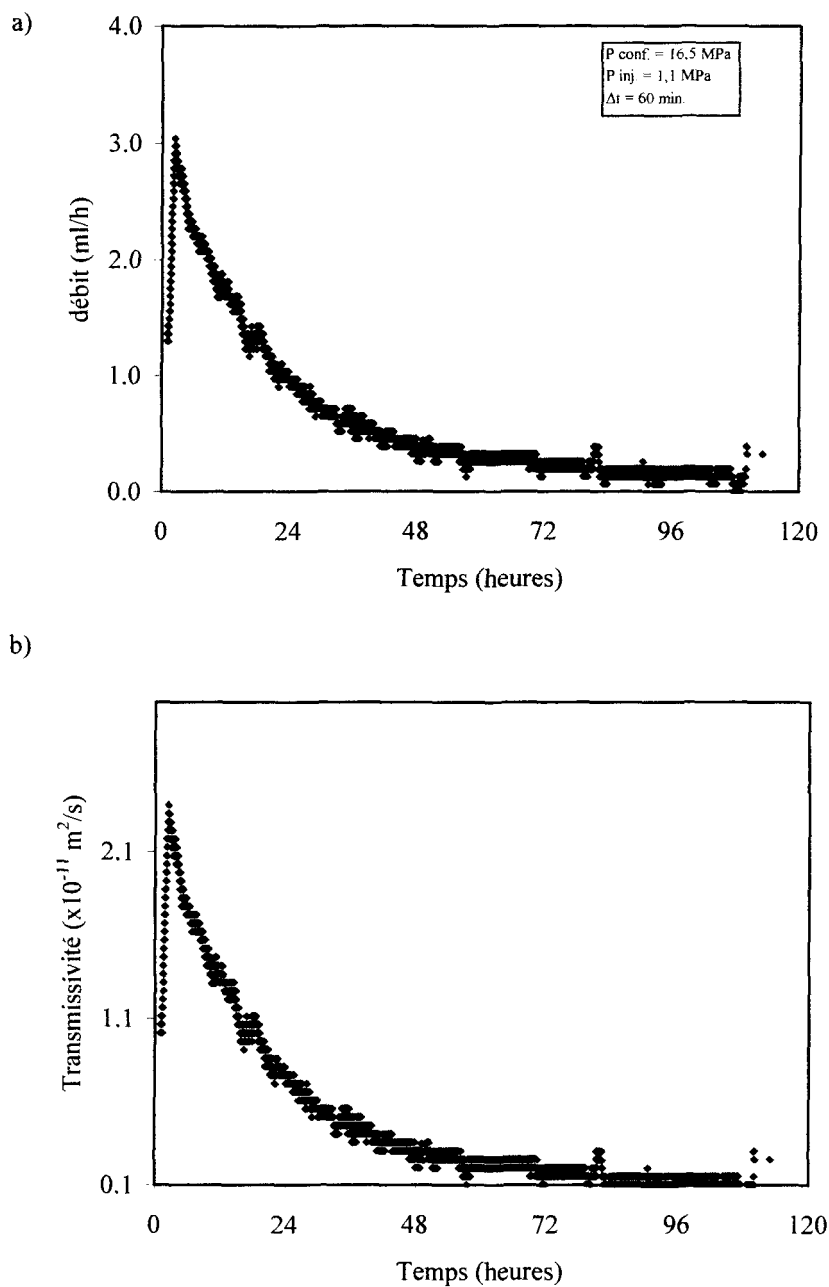


Figure 11.17: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture en fonction du temps pour l'échantillon 7 à pH 2.

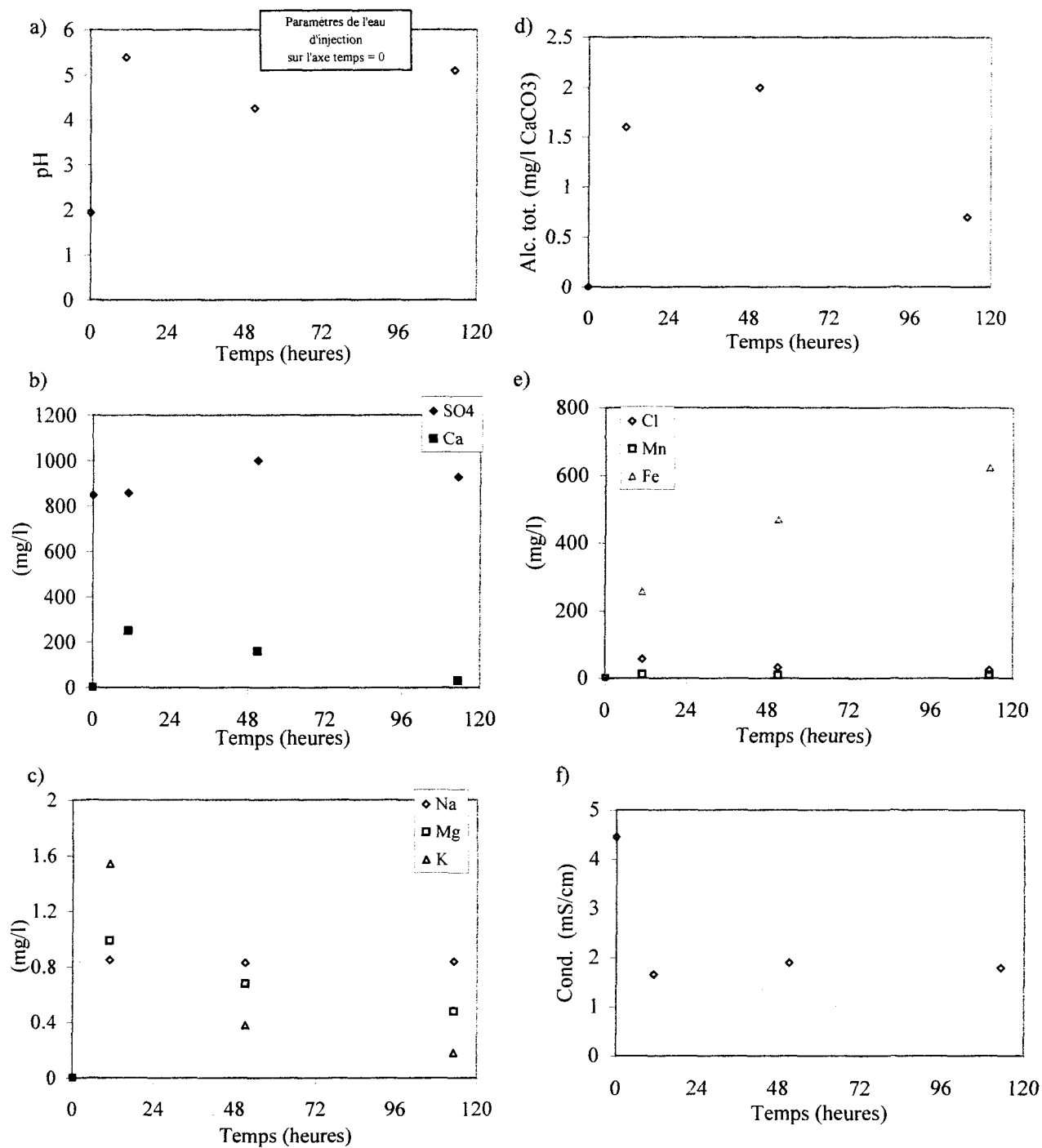


Figure 11.18: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 7 à pH 2; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Na, Mg et K, d) Alcalinité totale, e) Cl, Mn et Fe, f) Conductivité électrique.

11.3 ESSAIS D'INJECTION À PH 2,5

Trois échantillons soumis à des injections d'eau à pH 2,5 ont été soumis à des niveaux de confinement différents. La pression d'injection d'eau a été fixée en fonction du débit obtenu au début de chacun de ces trois essais.

11.3.1 Échantillon 8

a) Résultats hydrauliques

Soumis à une contrainte de confinement de 8,26 MPa (1200 psi), l'échantillon 8 a été injecté avec une eau à pH 2,5 et sous une pression de 2,2 MPa (320 psi). On remarque que le débit d'eau subit une augmentation jusqu'à son maximum de 26 ml/h durant la première heure et une diminution après cette période à environ 11 ml/h vers 8 heures d'essai (figure 11.19a). Ensuite, le débit reprend sa montée progressive jusqu'à 20 ml/h à 44 heures, moment où le test a dû être interrompu pour des problèmes techniques. La reprise de l'essai vers 56 heures montre toujours une augmentation de ce débit jusqu'à environ 30 ml/h vers 96 heures d'essai et ensuite une diminution du débit avec le temps jusqu'à 10 ml/h à la fin de l'essai, après 120 heures. Seuls quelques points de mesure ont été enregistrés après 56 heures d'essai et donc le Δt pour le calcul des débits moyens ne respecte pas toujours la valeur de 60 minutes fixée au début de l'essai. La transmissivité de la fracture suit évidemment la même évolution que celle du débit en fonction du temps avec un

maximum de 1×10^{-10} m²/s après 1 heure d'essai (figure 11.19b) et un minimum autour de 4×10^{-11} m²/s après 8 heures d'essai. Un deuxième maximum de transmissivité égal à $1,6 \times 10^{-10}$ m²/s est atteint dans la deuxième phase de l'essai, vers 96 heures. À la fin de l'essai, la transmissivité diminue jusqu'à environ $4,6 \times 10^{-11}$ m²/s.

b) Résultats hydrochimiques

On note un pH dans l'eau à la sortie plus élevé que dans l'eau d'injection dès le départ, et les valeurs fluctuent autour de 6 (figure 11.20a). On peut constater qu'il y a un pic de pH à 7 au début et un autre maximum vers 97 heures de l'essai. La conductivité électrique, plus faible à la sortie que dans l'eau d'injection (1,2 mS/cm), est d'environ 0,4 mS/cm pendant l'essai (figure 11.20e).

Le graphique de Ca en fonction du temps montre des concentrations de Ca à la sortie élevées dès le début (premier volume d'eau récupéré à la sortie de la fracture) atteignant 67 mg/l. La concentration en Ca à la sortie subit par la suite de légères fluctuations autour de 50 mg/l (figure 11.20b). Les fluctuations de Ca suivent celle du pH. La courbe de concentration en SO₄ à la sortie subit, par contre, plus de fluctuations autour de sa valeur au point d'injection de 147 mg/l durant l'essai mais avec une légère augmentation entre 0 et 48 heures d'essai (figure 11.20b). À certains pics de concentration en SO₄ correspondent des valeurs minimales de concentration en Ca. Le SO₄ suit une évolution contraire à celle de Ca.

Le Fe à la sortie subit une augmentation de sa concentration jusqu'à un maximum de 25 mg/l entre 20 et 35 heures d'essai (figure 11.20c). Après cette période, sa concentration dans l'eau diminue à des valeurs inférieures à 4 mg/l vers 91 heures d'essai et reste à peu près constante jusqu'à 119 heures à la fin de l'essai.

Dans le cas des éléments mineurs, certains d'entre eux ont une évolution plus régulière (figure 11.20f). La concentration en Na à la sortie est plus élevée au début de l'essai, et elle est de 2,5 mg/l; elle diminue par la suite de façon régulière jusqu'à la fin de l'essai. La concentration en Mn à la sortie augmente jusqu'à 0,6 mg/l après 20 heures d'essai et elle reste stable autour de cette valeur durant le reste de l'essai. L'alcalinité suit un peu la même évolution que celles de Ca et du pH avec quelques variations (gains) (figure 11.20d).

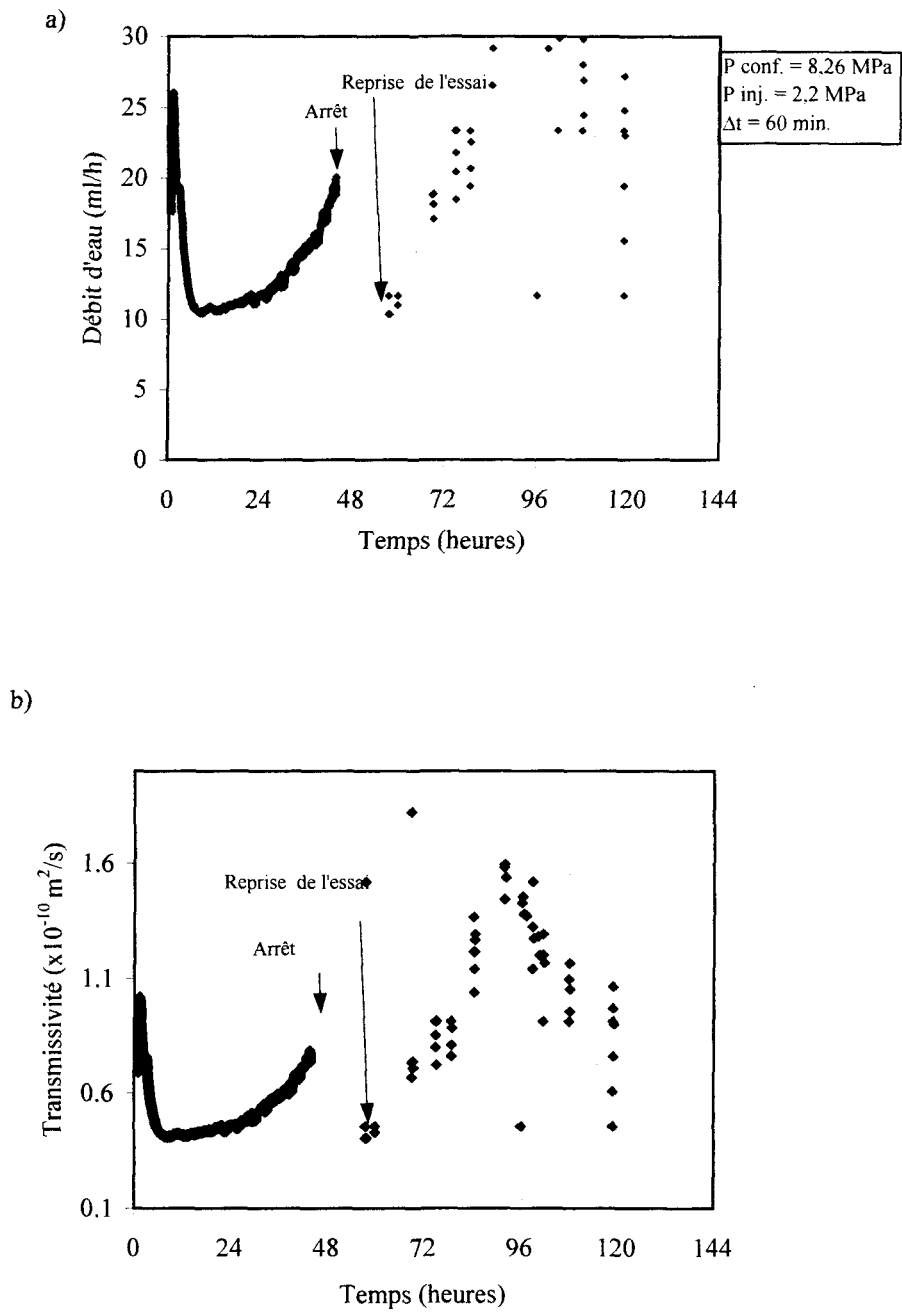


Figure 11.19: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture en fonction du temps pour l'échantillon 8 à pH 2,5.

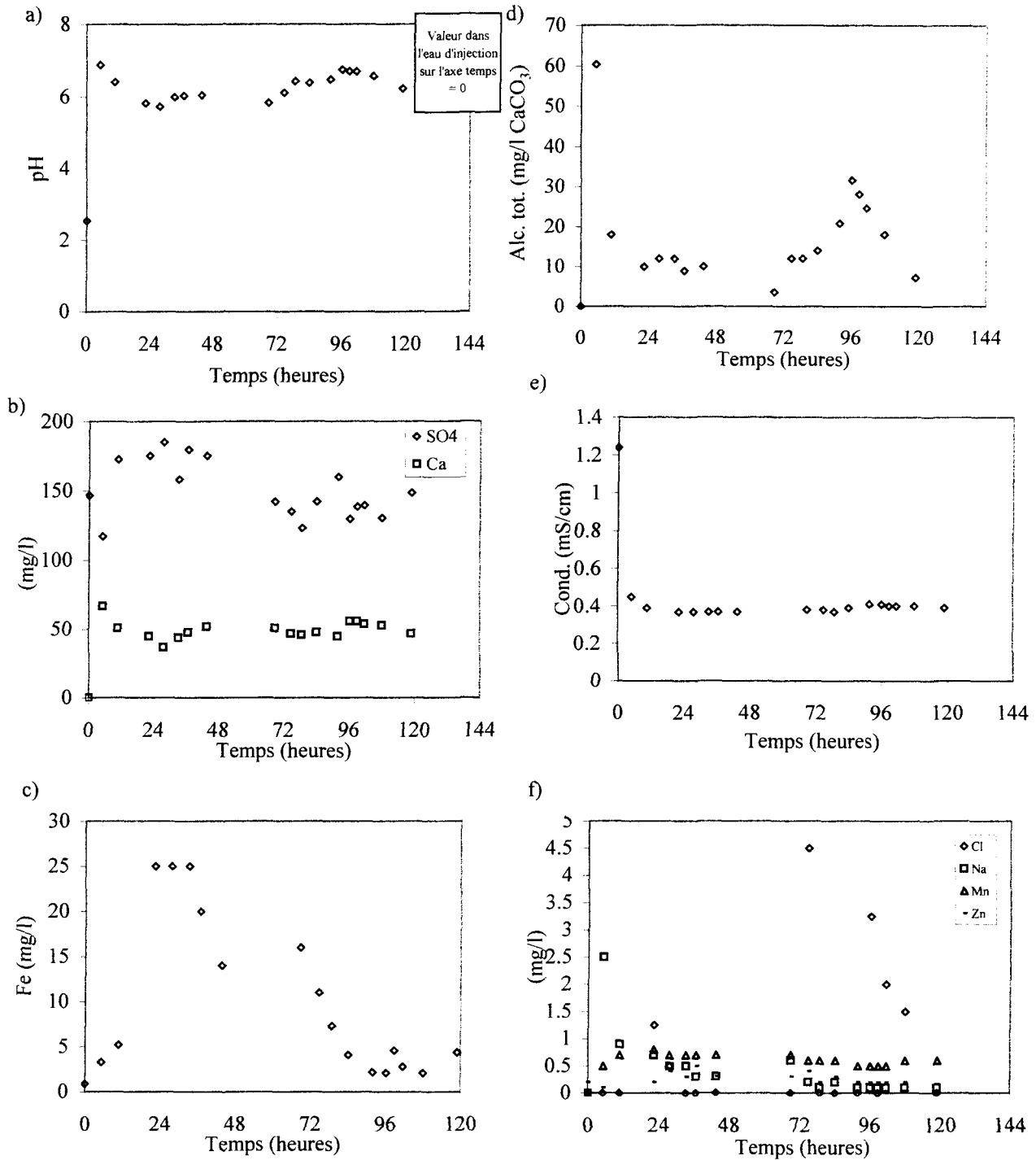


Figure 11.20: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 8 à pH 2,5; a) pH et, b) Calcium et sulfate, c) Fer, d) Alcalinité totale, e) Conductivité électrique, f) Autres ions .

11.3.2 Échantillon 9

a) Résultats hydrauliques

L'échantillon 9 est injecté avec une eau à pH 2,5, sous une pression de 0,55 MPa (80 psi) et un confinement de l'ordre de 12.38 MPa (1800 psi). Dans un premier temps, le débit augmente rapidement jusqu'à sa valeur maximale de 30 ml/h durant la première heure de l'essai (figures 11.21a et b), correspondant à une transmissivité de fracture de $4,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$; ensuite le débit diminue rapidement à environ 15 ml/h à la deuxième heure d'essai, correspondant à une transmissivité de l'ordre de $2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Après cette période, une deuxième importante augmentation du débit d'eau jusqu'à 25 ml/h est remarquée vers 48 heures générant une transmissivité de l'ordre $4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Après ces 48 heures d'essai, le débit subit plusieurs variations mais avec une tendance générale à diminuer avec le temps jusqu'à environ 15 ml/h à la fin de l'essai, correspondant à 216 heures d'essai. La transmissivité suit par conséquent la même tendance à diminuer avec le temps pour atteindre $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ vers la fin de l'essai.

b) Résultats hydrochimiques

Le tracé du pH en fonction du temps montre un pH à la sortie de 7 au début de l'essai; puis il se stabilise autour de 6 jusqu'à la fin de l'essai (figure 11.22a). La conductivité électrique subit une évolution contraire avec des valeurs très faibles, par

rapport à l'eau d'injection (1,3 mS/cm) en atteignant 0,4 mS/cm durant l'essai (figure 11.22f).

La concentration en Ca à la sortie est d'environ 50 à 60 mg/l; elle reste stable à cette valeur le long de l'essai (figure 11.22b). Le profil de SO₄ en fonction du temps est, par contre, plus irrégulier (figure 11.22b). On remarque tout de même un enrichissement en SO₄, par rapport à l'eau d'injection, au début de l'essai de 170 mg/l, à 200 mg/l, et une diminution progressive durant l'essai jusqu'à sa valeur de départ vers la fin, après 216 heures d'essai.

Le Fe à la sortie suit une évolution très particulière en fonction du temps. Sa concentration est élevée durant l'essai et atteint 22 mg/l vers 12 heures; puis elle subit une diminution aussi rapide jusqu'à 5 mg/l après 54 heures d'essai (figure 11.22c). Après cette période, la concentration en Fe recommence à augmenter de façon régulière jusqu'à 23 mg/l après 192 heures.

Dans le cas des ions Mn et Na, leurs concentrations à la sortie sont plus élevées de l'ordre de 1,1 mg/l et 2,1 mg/l respectivement durant les premières heures de l'essai; elles diminuent pour se stabiliser à 0,8 mg/l dans le cas de Mn vers 28 heures et à 0,2 mg/l dans le cas de Na vers 47 heures d'essai (figure 11.22e).

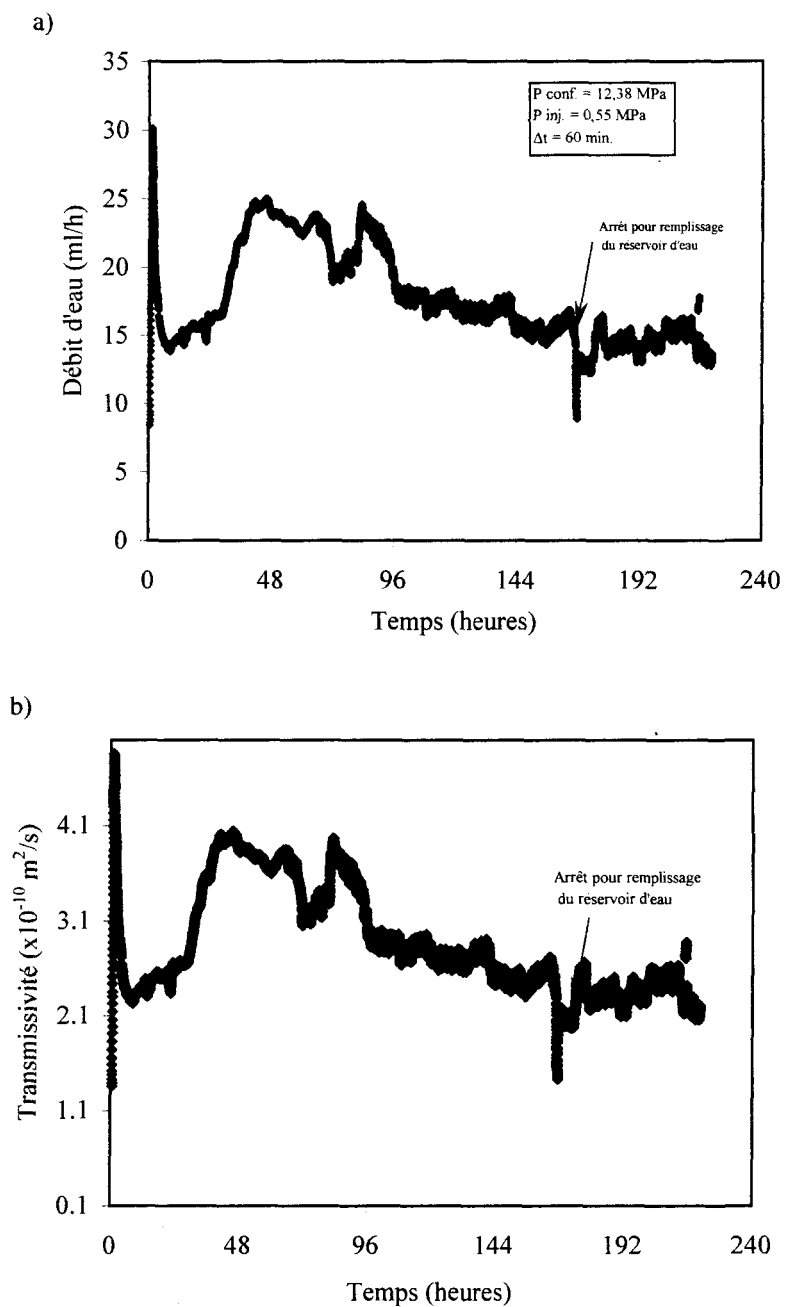


Figure 11.21: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture en fonction du temps pour l'échantillon 9 à pH 2,5.

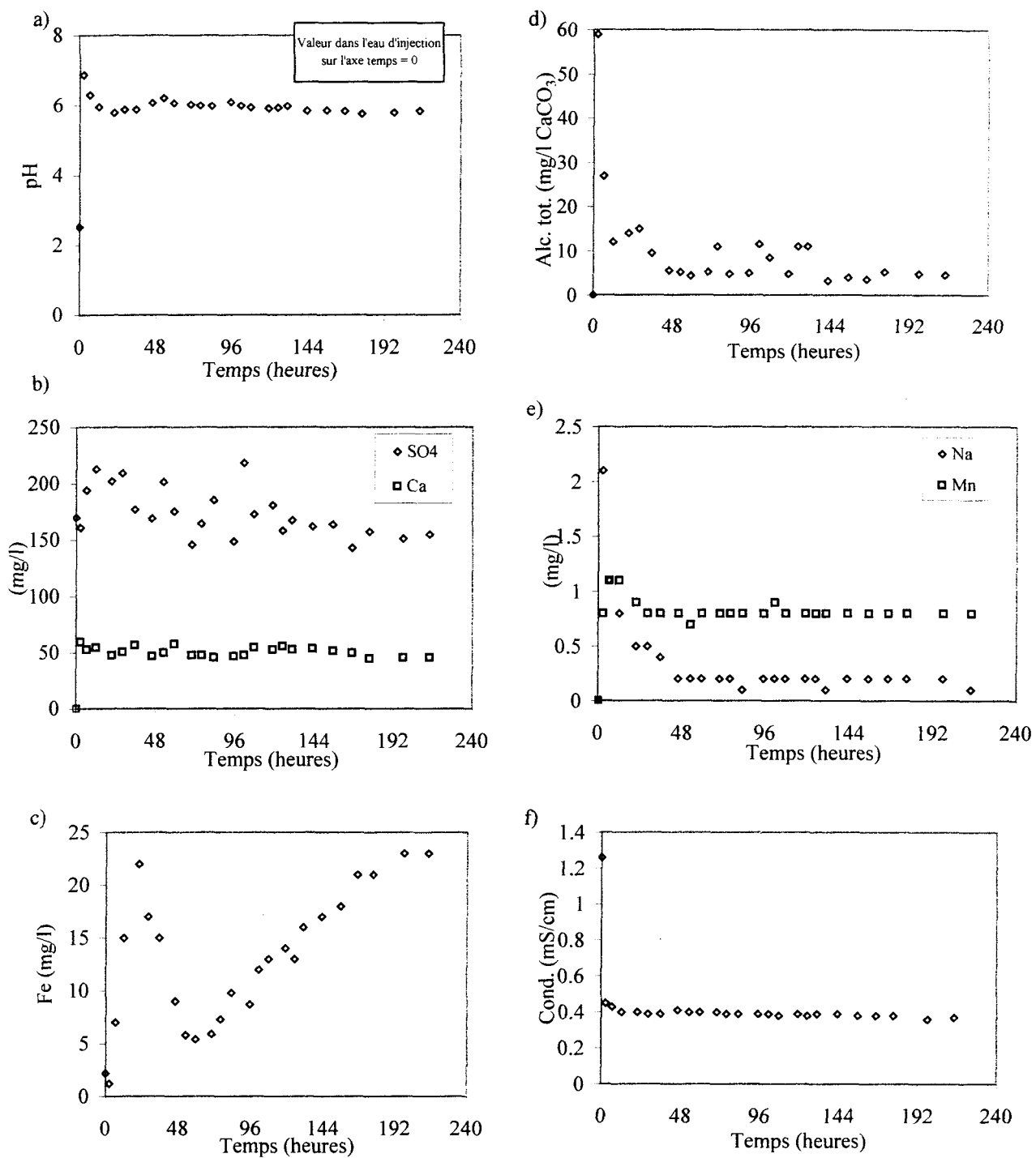


Figure 11.22: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 9 à pH 2,5; a) pH , b) Calcium et sulfate, c) Fer, d) Alcalinité totale, e) Autres ions, f) Conductivité électrique.

11.3.3 Échantillon 10

a) Résultats hydrauliques

L'essai sur l'échantillon 10 avec une injection d'eau à pH 2,5 sous une pression de 0,55 MPa (80 psi) est exécuté sous un confinement élevé de 16,51 MPa (2400 psi). Le débit d'eau augmente durant les deux premières heures de l'essai jusqu'à sa valeur maximale de 37 ml/h (figure 11.23a). La transmissivité de la fracture suit une évolution semblable à celle du débit en fonction du temps avec une valeur maximale de $5,4 \times 10^{-10}$ m²/s après 2 heures d'essai (figure 11.23b). Après cette période, le débit diminue rapidement pour se stabiliser à 6 ml/h après 34 heures d'essai, correspondant à une transmissivité d'environ 1×10^{-10} m²/s. Vers 57 heures d'essai, le débit subit une légère augmentation à 8 ml/h et se stabilise à 5 ml/h après 120 heures, correspondant à des valeurs de transmissivité de $1,1 \times 10^{-10}$ m²/s et 8×10^{-11} m²/s respectivement.

b) Résultats hydrochimiques

Le pH à la sortie est de 7 dès le début de l'essai; puis il descend autour de la valeur 6 à partir du deuxième volume récupéré (figure 11.24a). Cependant, on peut observer une légère diminution du pH en fonction du temps jusqu'à une valeur de 5 vers la fin, après 118 heures d'essai.

Les graphiques de SO_4 et de Ca en fonction du temps montrent une évolution à peu près semblable, mais avec des valeurs de concentration différentes (figure 11.24b). Entre 0 et 4 heures d'essai, les concentrations à la sortie sont plus élevées que dans l'eau d'injection, et elles sont de 165 mg/l dans le cas de Ca (inférieures à 1 mg/l dans l'eau d'injection) et de 413 mg/l dans le cas de SO_4 (167 mg/l dans l'eau d'injection), soit une augmentation 1,5 fois celle de Ca. Après 4 heures, l'augmentation de la concentration de ces éléments est moins élevée et elle atteint des valeurs maximales d'environ 200 mg/l pour le Ca et 585 mg/l pour le SO_4 (soit une augmentation 2 fois celle de Ca) après 32 heures d'essai. Après cette période, il y a une faible diminution de la concentration en ces éléments pour se stabiliser autour de 155 mg/l pour le Ca et autour de 490 mg/l pour le SO_4 après 70 heures.

La concentration en Fe à la sortie subit une augmentation rapide entre 0 et 30 heures d'essai (figure 11.24c). Elle continue à augmenter après cette période mais d'une façon plus lente en atteignant un maximum de 50 mg/l vers 70 heures d'essai; elle se stabilise autour de cette valeur durant le reste de l'essai. D'autres ions mineurs, comme Sr, Na, Mg et Mn, subissent aussi une augmentation de leur concentration durant l'essai, mais selon différentes proportions (figure 11.24f).

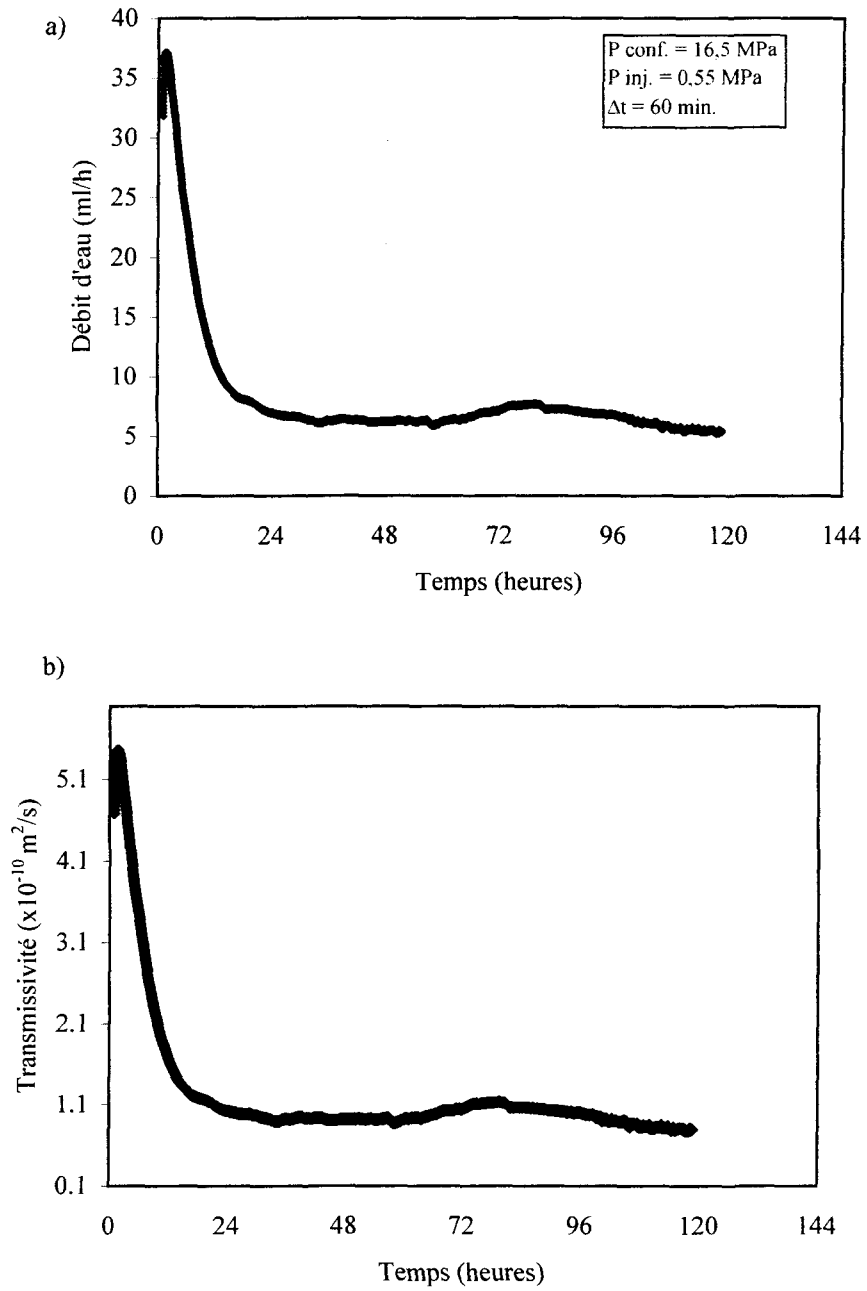


Figure 11.23: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture en fonction du temps pour l'échantillon 10 à pH 2,5.

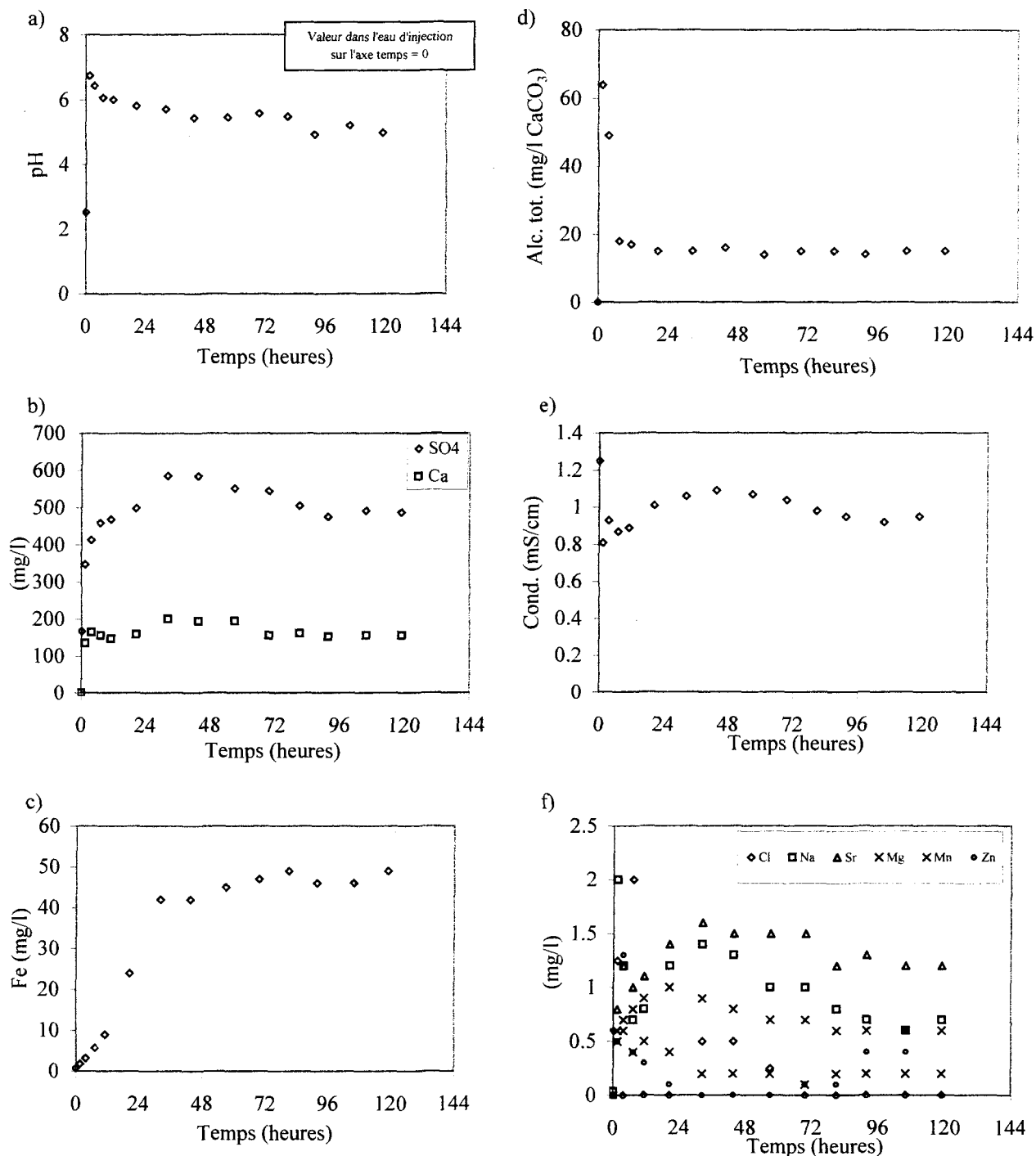


Figure 11.24: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 10 à pH 2,5; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Fer, d) Alcalinité totale, e) Conductivité électrique, f) Autres ions.

11.4 ESSAIS D'INJECTION À PH 4

Deux essais d'injection d'eau à pH 4 ont été réalisés à des niveaux de confinement différents.

11.4.1 Échantillon 11

a) Résultats hydrauliques

L'échantillon 11 est injecté d'une eau à pH 4 sous une pression de 0,55 MPa (80 psi) et un confinement de 8,26 MPa (1200 psi). La courbe du débit d'eau en fonction du temps (figure 11.25a) montre une augmentation du débit jusqu'à un maximum égal à 27 ml/h après 2 heures d'essai; le débit diminue après progressivement pour se stabiliser à 2 ml/h vers 24 heures d'essai. Bien que la pression d'injection d'eau soit augmentée à 2,2 MPa (320 psi), après cette période, on constate le même type d'évolution du débit qui se répète mais cette fois-ci avec un pic de débit plus faible d'environ 15 ml/h atteint après une heure d'essai à cette nouvelle pression d'injection. La transmissivité de la fracture suit la même tendance que celle du débit en fonction du temps (figure 11.25b). Elle atteint un maximum de $4,3 \times 10^{-10}$ m²/s après 2 heures lors de la première partie de l'essai et se stabilise vers la fin à 3×10^{-11} m²/s. Lors de la deuxième partie, avec une pression d'injection augmentée, la transmissivité subit une légère augmentation jusqu'à une valeur

maximale de $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ après une heure d'essai; la transmissivité diminue par la suite pour se stabiliser à $1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ vers la fin de l'essai.

b) Résultats hydrochimiques

Le pH à la sortie atteint des valeurs proches de la neutralité dès le début. Il reste stable durant tout l'essai (figure 11.26a). La concentration en SO_4 à la sortie est plus élevée dès le début de l'essai, soit environ 2 mg/l, que dans l'eau d'injection qui est d'environ 1 mg/l; puis elle retrouve sa concentration dans l'eau d'injection après 26 heures d'essai (figure 11.26b). Vers 36 heures, la concentration en SO_4 augmente à 4 mg/l pour chuter à une valeur inférieure à 1 mg/l à la fin, après 52 heures d'essai.

La concentration en Ca à la sortie est de 5,5 mg/l dès le départ et demeure constante jusqu'à 26 heures; ensuite elle augmente pour se stabiliser durant le reste de l'essai autour de 7,5 mg/l (figure 11.26b). La conductivité électrique et les éléments mineurs, tels que Na, Mg, Mn et K, à la sortie suivent à peu près la même évolution que le Ca; alors que le Fe semble suivre la même évolution que le SO_4 (figure 11.26c et e).

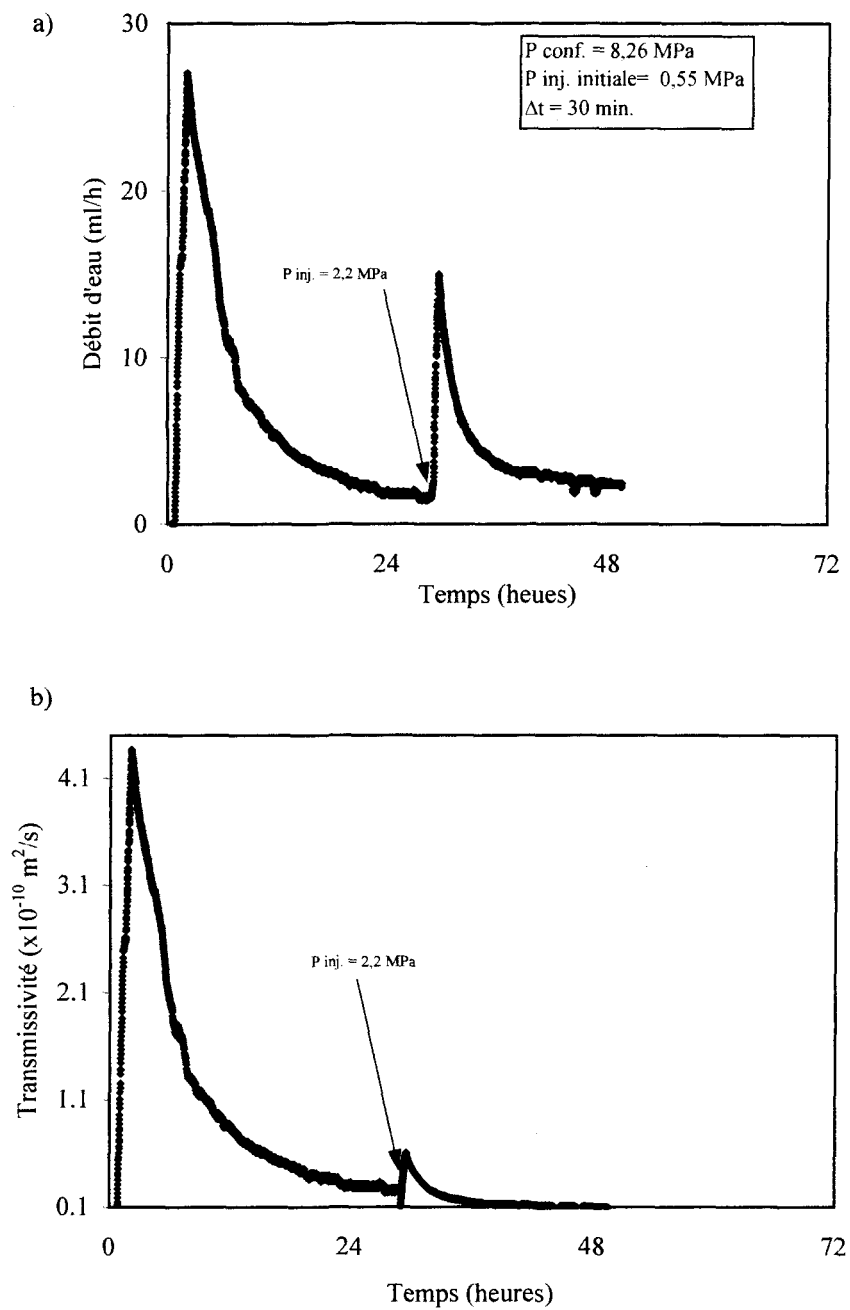


Figure 11.25: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 11 à pH 4.

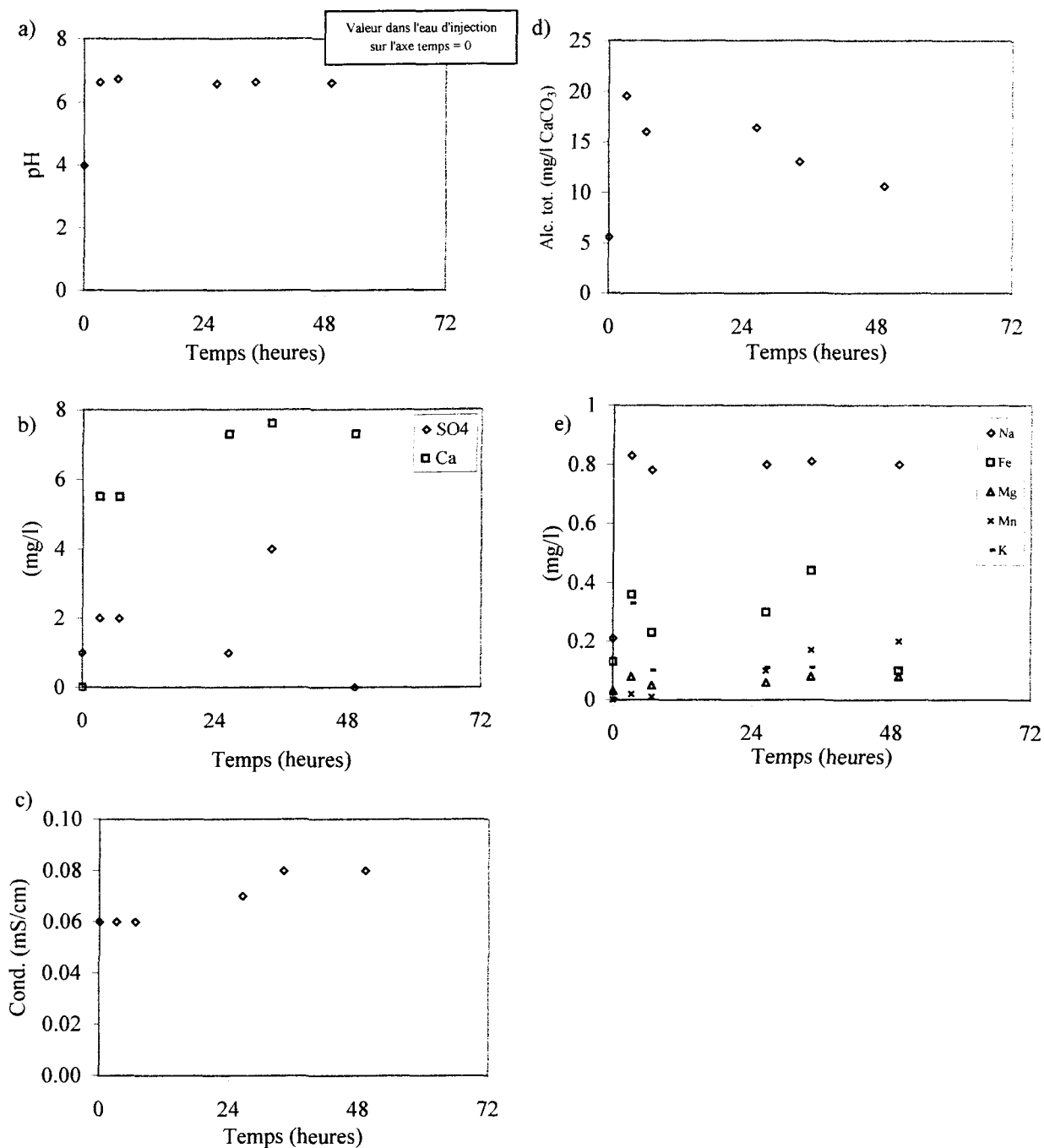


Figure 11.26: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 11 à pH 4; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Conductivité électrique, d) Alcalinité totale, e) Autres ions.

11.4.2 Échantillon 12

a) Résultats hydrauliques

L'échantillon 12 a été soumis à une injection d'eau à pH 4 sous une pression de 0,55 MPa (80 psi) au départ et à un confinement de 16,51 MPa (2400 psi). Le débit d'eau subit une augmentation rapide au début et atteint sa valeur maximale de 18 ml/h après deux heures d'essai. Il diminue ensuite pour se stabiliser à 2 ml/h, après 36 heures d'essai (figure 11.27a). Le même type d'évolution du débit en fonction du temps se répète lors d'une augmentation de la pression d'injection d'eau à 1,1 MPa (160 psi) et à 2,2 MPa (320 psi) après 45 heures d'essai. Les débits maximaux atteints sont de 4,2 ml/h pour une injection d'eau à 1,1 MPa et de 7 ml/h pour une injection d'eau à 2,2 MPa. Ces valeurs de débit sont nettement inférieures à la valeur maximale atteinte au début de l'essai sous une pression d'injection de 0,55 MPa. Vers la fin de l'essai, le débit se stabilise à 2 ml/h.

La transmissivité de la fracture suit à peu près la même tendance que le débit d'eau en fonction du temps (figure 11.27b). Elle augmente rapidement dès le début jusqu'à une valeur maximale de $2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ après 2 heures d'essai; puis elle diminue pour se stabiliser à $3 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ après 26 heures d'essai. La transmissivité chute après les augmentations de la pression d'injection d'eau à 1,1 MPa puis à 2,2 MPa. Elle se stabilise à environ $6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ à la fin de l'essai.

b) Résultats hydrochimiques

Le pH à la sortie est de 6 dès le départ et reste constant autour de cette valeur durant tout l'essai (figure 11.28a). La concentration en Ca à la sortie atteint 6,4 mg/l dès le début et reste constante dans le deuxième volume d'eau récupéré à la sortie de la fracture après 11 heures d'essai (figure 11.28b). La concentration en Ca à la sortie augmente par après pour se stabiliser à environ 10 mg/l après 31 heures d'essai.

La concentration en SO_4 à la sortie est plus élevée que celle en Ca et elle se stabilise de la même façon que pour le Ca, autour de la valeur de 17 mg/l entre 11 heures et 52 heures d'essai (figure 11.28b). Cependant, elle subit une baisse radicale après cet intervalle d'essai jusqu'à la valeur dans l'eau d'injection (concentration inférieure à 1 mg/l).

La concentration en Cl à la sortie augmente en fonction du temps et atteint son maximum de 22 mg/l vers 31 heures d'essai; elle diminue ensuite jusqu'à 17,5 mg/l après 52 heures pour remonter à 22,5 mg/l à la fin de l'essai, après 67 heures (figure 11.28e). Le Fe à la sortie subit une augmentation remarquable après 52 heures en atteignant 3,3 mg/l (figure 11.28c).

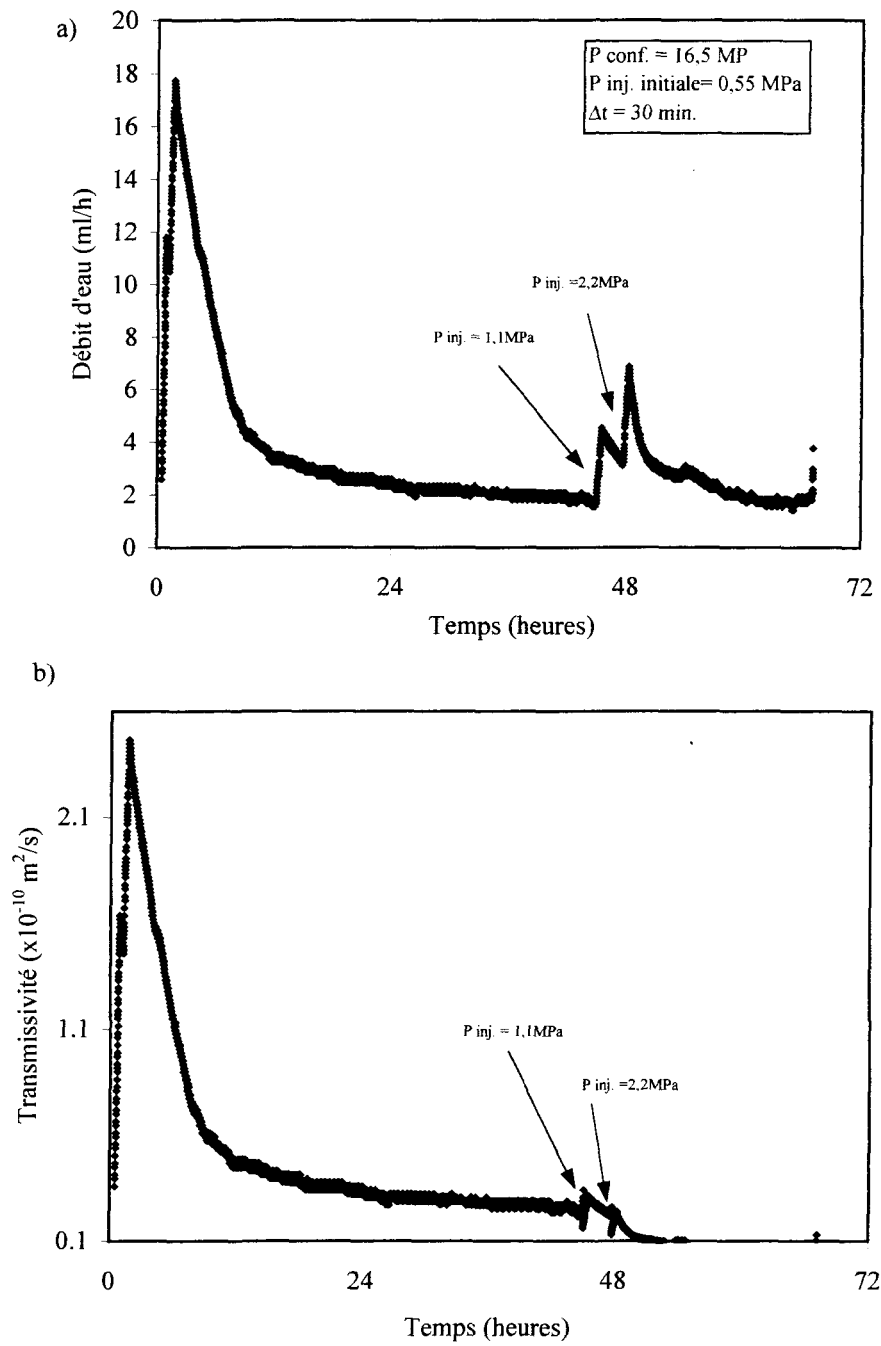


Figure 11.27: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture en fonction du temps pour l'échantillon 12 à pH 4.

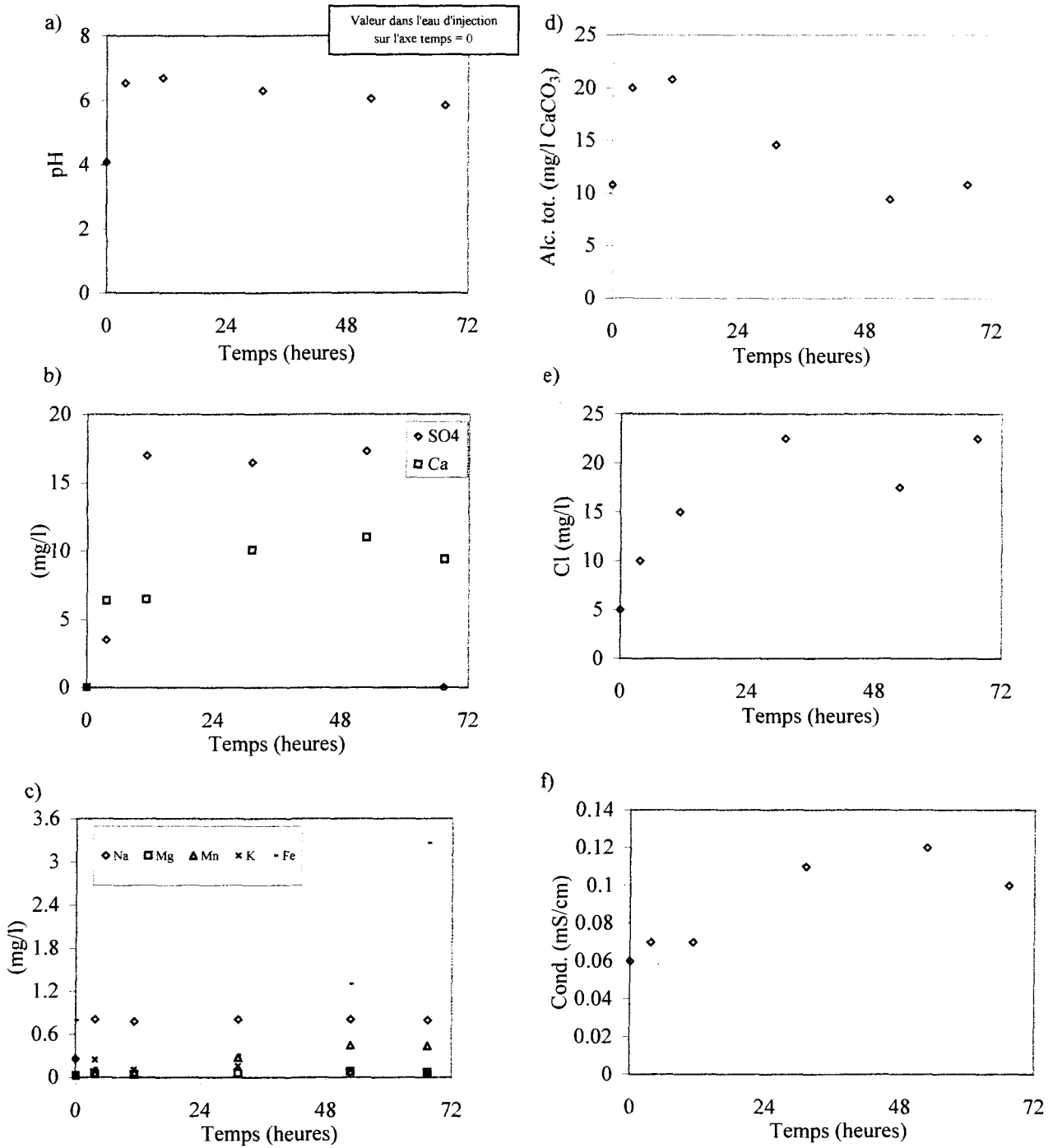


Figure 11.28: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 12 à pH 4; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Chlore, f) Conductivité électrique.

11.5 ESSAIS D'INJECTION À PH 7

Deux essais individuels ont été réalisés avec une injection d'eau à pH 7 et sous différents niveaux de contrainte de confinement.

11.5.1 Échantillon 13

a) Résultats hydrauliques

L'injection de l'échantillon 13 d'une eau à pH 7, sous une pression de 0,28 MPa (40 psi) et un confinement de 12,38 MPa (1800 psi), a généré une évolution du débit d'eau avec plusieurs variations en fonction du temps, mais dont la tendance générale montre une diminution (figure 11.29a). Le débit augmente dès le début de l'essai jusqu'à une valeur maximale de 480 ml/h, après 1 heure 30 minutes, et diminue par après pour se stabiliser autour de 160 ml/h après 9 heures d'essai. L'évolution de la transmissivité de la fracture suit évidemment celle du débit d'eau en fonction du temps, avec une augmentation au début de l'essai jusqu'à une valeur maximale de $1,3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ après 1 heure 30 minutes et une diminution après cette période à environ $5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$.

b) Résultats hydrochimiques

En général, le résultat des différents paramètres mesurés de l'eau à la sortie de la fracture ne montrent pas d'importantes variations en fonction du temps (figure 11.30). Le pH à la sortie reste à peu près stable avec des valeurs légèrement plus élevées que dans l'eau d'injection où le pH est d'environ 6,7. La concentration en Ca à la sortie se stabilise autour de 0,5-0,6 mg/l durant tout l'essai. La concentration en SO₄ à la sortie atteint un maximum de 0,38 mg/l après 1 heure 30 minutes d'essai et diminue après jusqu'à 0,1 mg/l vers la fin, après 12 heures d'essai. La concentration en Fe atteint 0,1 mg/l à 1 heure 30 minutes et reste constante par après. La concentration de Na atteint 0,2 mg/l entre 1 heure 30 minutes et 4 heures; elle diminue par la suite pour atteindre 0,1 mg/l après 12 heures d'essai. La conductivité électrique est de 0,007 mS/cm après 1 heure 30 minutes, valeur légèrement plus basse que 0,02 mS/cm dans l'eau d'injection.

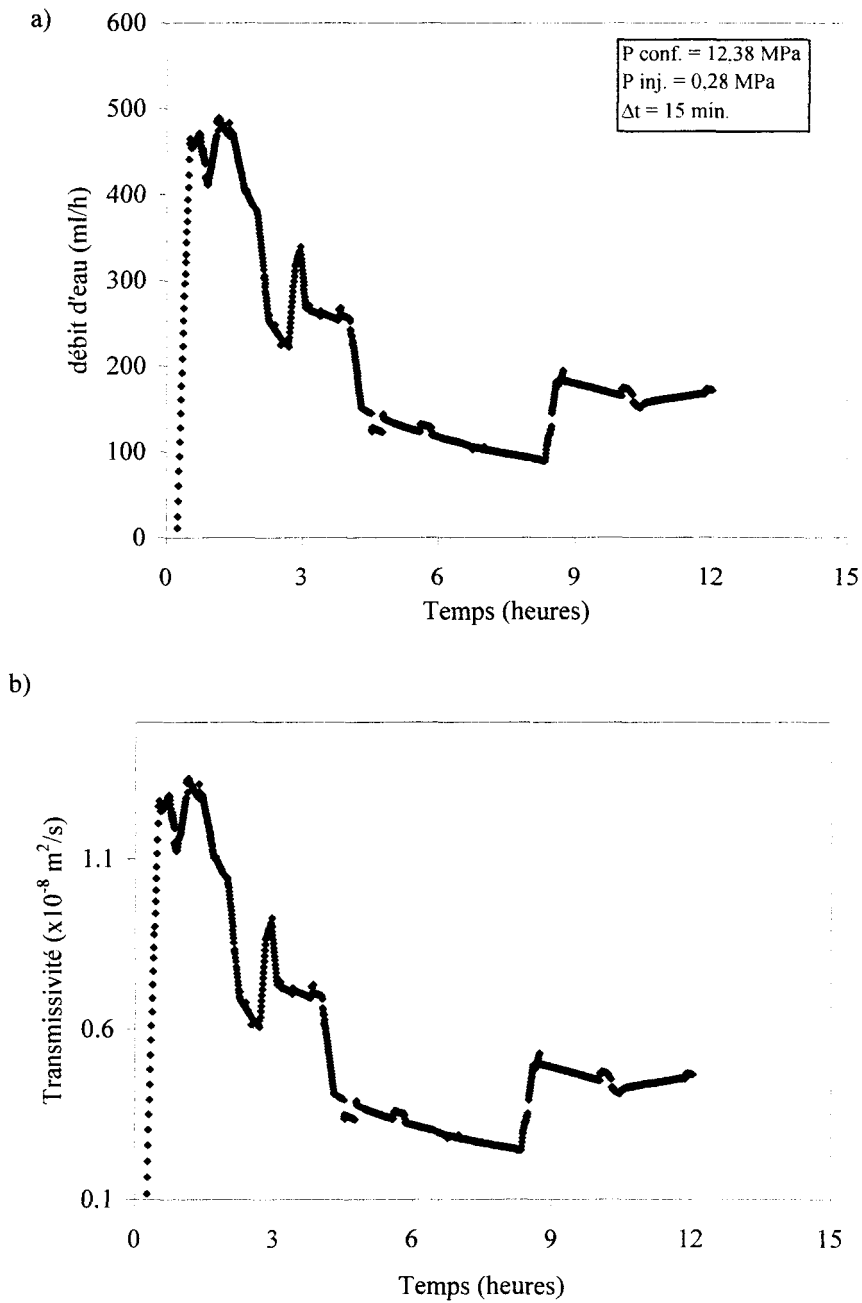


Figure 11.29: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture (b) en fonction du temps pour l'échantillon 13 à pH 7.

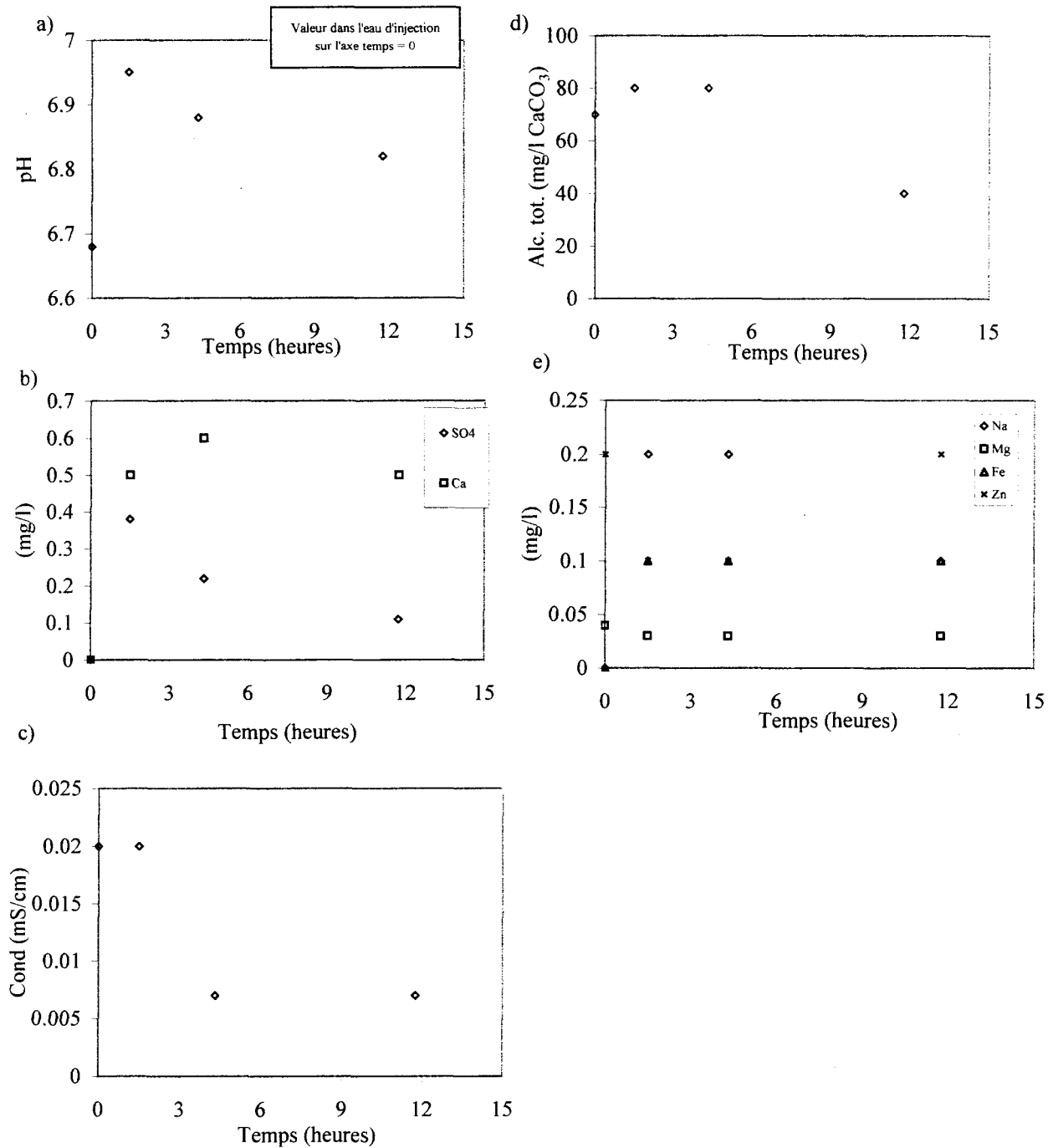


Figure 11.30: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 13 à pH 7; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Conductivité électrique, d) Alcalinité totale, e) Autres ions.

11.5.2 Échantillon 14

a) Résultats hydrauliques

L'échantillon 14 a été injecté avec une eau à pH 7 sous une pression de 0,55 MPa (80 psi) et un confinement élevé de 16,51 MPa (2400 psi). Le débit d'eau augmente rapidement dès le début jusqu'à une valeur maximale de 28 ml/h après 1 heure d'essai; puis il diminue progressivement jusqu'à environ 3 ml/h après 20 heures, moment d'arrêt de l'essai (figure 11.31a). La transmissivité de la fracture subit la même évolution avec une valeur maximale d'environ $4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ après 1 heure d'essai et une valeur minimale de l'ordre de $6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ vers la fin (figure 11.31b).

b) Résultats hydrochimiques

Les graphiques des différents ions en fonction du temps (figure 11.32b et c) montrent des concentrations en ions plus élevées dans l'eau à la sortie que dans l'eau d'injection entre 0 et 7 heures d'essai. Dans le cas de Ca, sa concentration atteint une valeur maximale de 3,8 mg/l vers 7 heures, puis descend à environ 3,2 mg/l vers la fin. La concentration des autres ions est beaucoup plus faible. Dans le cas de SO_4 , sa concentration à la sortie est de 1,25 mg/l vers 7 heures et diminue à 0,22 mg/l à la fin de l'essai; alors que dans l'eau d'injection, elle est de 0,09 mg/l. La concentration de Na à la sortie est de 0,5 mg/l vers 7 heures et descend à 0,3 mg/l à la fin de l'essai. Dans le cas de Fe, sa

concentration à la sortie ne varie pas de sa valeur au point d'injection (0,1 mg/l). La concentration de Cl à la sortie atteint 0,5 mg/l vers 7 heures puis elle diminue à une valeur inférieure à 0,1 mg/l à la fin de l'essai, rejoignant la concentration dans l'eau d'injection.

Le pH à la sortie subit une légère augmentation entre les deux prélèvements d'eau, jusqu'à une valeur de 7, alors que l'eau injectée avait un pH de 6,5 (figure 11.32a). La conductivité électrique et l'alcalinité ont une valeur uniforme lors des deux prélèvements d'eau, laquelle valeur est considérablement plus élevée que dans l'eau injectée (figure 11.32d et e).

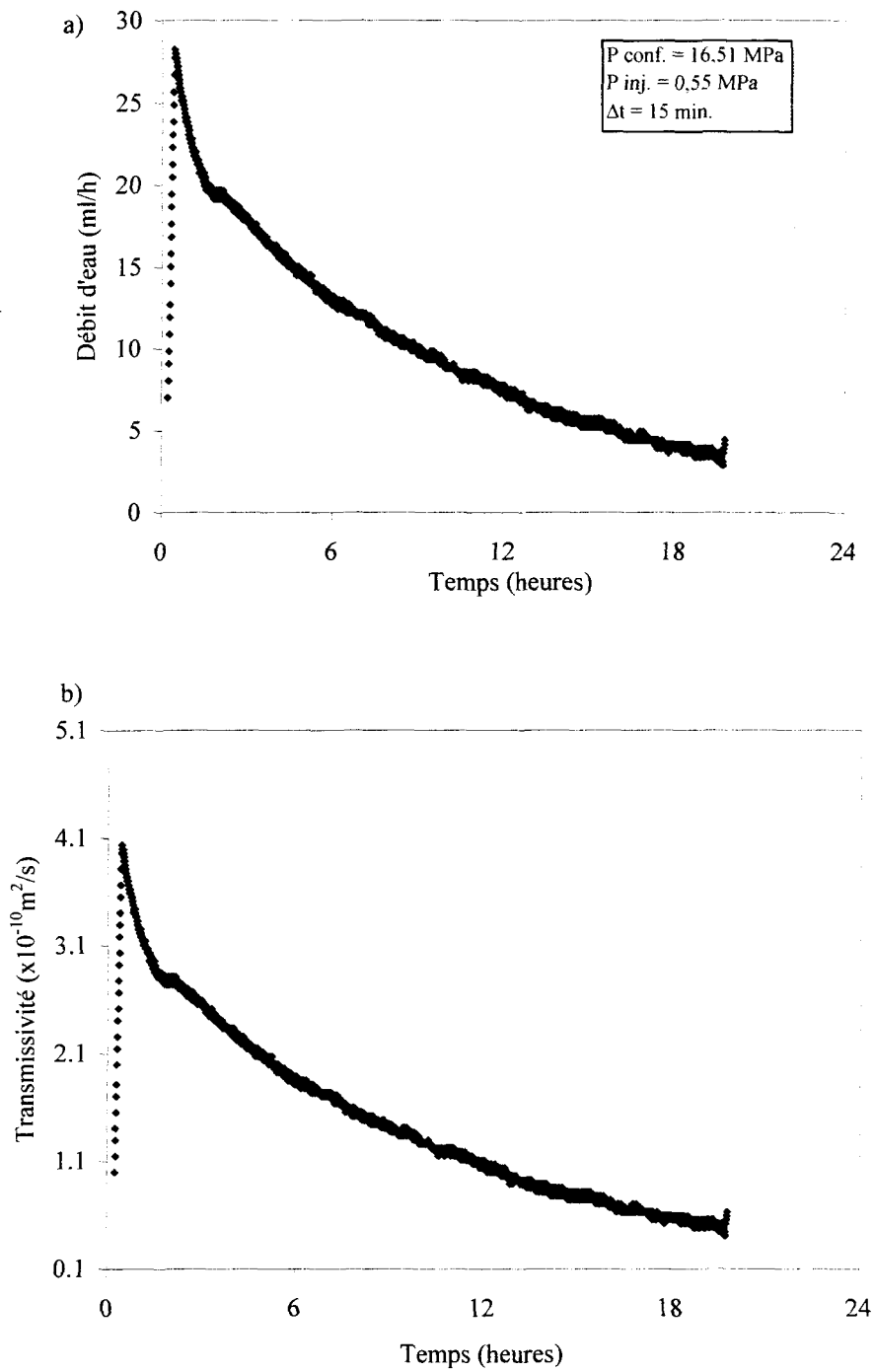


Figure 11.31: Débit d'eau (a) et transmissivité de la fracture en fonction du temps pour l'échantillon 14 à pH 7.

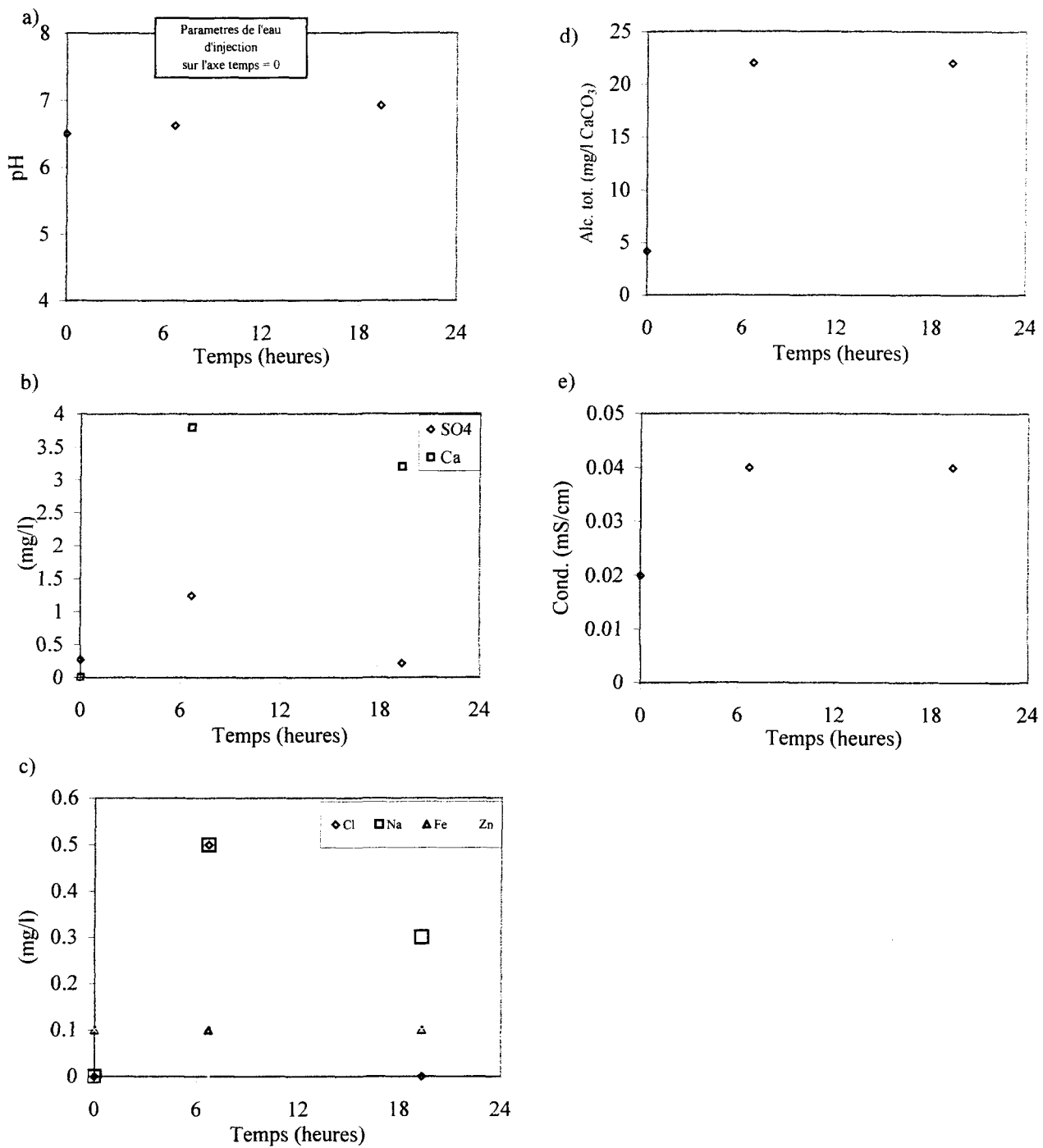


Figure 11.32: Résultats hydrochimiques en fonction du temps pour l'échantillon 14 à pH 7; a) pH, b) Calcium et sulfate, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Conductivité électrique.

12 ANALYSES DES RÉSULTATS HYDRAULIQUES ET HYDROCHIMIQUES

Les analyses des résultats hydrauliques et hydrochimiques permettent d'identifier les tendances globales des différents types d'essai. Dans un premier temps, il s'agit de considérer indépendamment chacun des processus. Dans un deuxième temps, il s'agit de prendre en compte les deux processus ensemble. Ainsi, il sera possible de reconnaître les effets de l'un sur l'autre.

12.1 ANALYSE DES RÉSULTATS HYDRAULIQUES

Le comportement hydraulique des fractures dans les différents types d'essai peut se résumer en plusieurs types d'évolution formés chacun de plusieurs phases de changement hydrauliques en fonction du temps.

12.1.1 Cas des essais à pH 2

L'allure générale des courbes du débit d'eau et de celles de la transmissivité de la fracture en fonction du temps dans le cas des essais à pH 2 peut se résumer en quatre types d'évolution, nommés A, B, C et D sur la figure 12.1 et le tableau 12.1. L'évolution de type A correspond aux essais sur les échantillons 4, 6. Elle comprend la phase *a* où le débit (et la transmissivité) subit une augmentation continue avec le temps, une deuxième phase (*b*)

où le débit atteint un plateau constant dont la durée est variable, et une troisième phase (*c*) où le débit augmente de façon très rapide avec le temps.

Dans le cas de courbes d'évolution de type B, tel les les essais sur les échantillons 2 et 5, une phase intermédiaire *a'* s'ajoute entre les deux premières phases *a* et *b* notées dans le cas de l'évolution de type A. Cette phase correspond à une diminution du débit après sa première augmentation, pour se stabiliser après une courte durée et décrire un plateau comme celui de la phase *b* de la courbe des essais de type A. La dernière phase correspond à une augmentation rapide du débit qui équivaut à la troisième partie de la courbe des essais de type A.

Dans le cas de l'évolution type C, dont l'échantillon 3 est le seul exemple, on observe une évolution différente de celles des types A et B. Le type C présente une courbe avec deux phases semblables aux phases *a* et *c* des types A et B: soit une augmentation du débit d'eau (et de la transmissivité) continue avec le temps sans plateau notable.

Dans le cas l'évolution de type D, tel le cas de l'échantillon 7, on note une augmentation du débit et de la transmissivité au début jusqu'à un maximum, puis une diminution suivie d'une stabilisation à une valeur minimale vers la fin de l'essai. Ce type d'évolution présente donc trois phases équivalentes à celles de *a*, *a'* et *b* de l'évolution de type B.

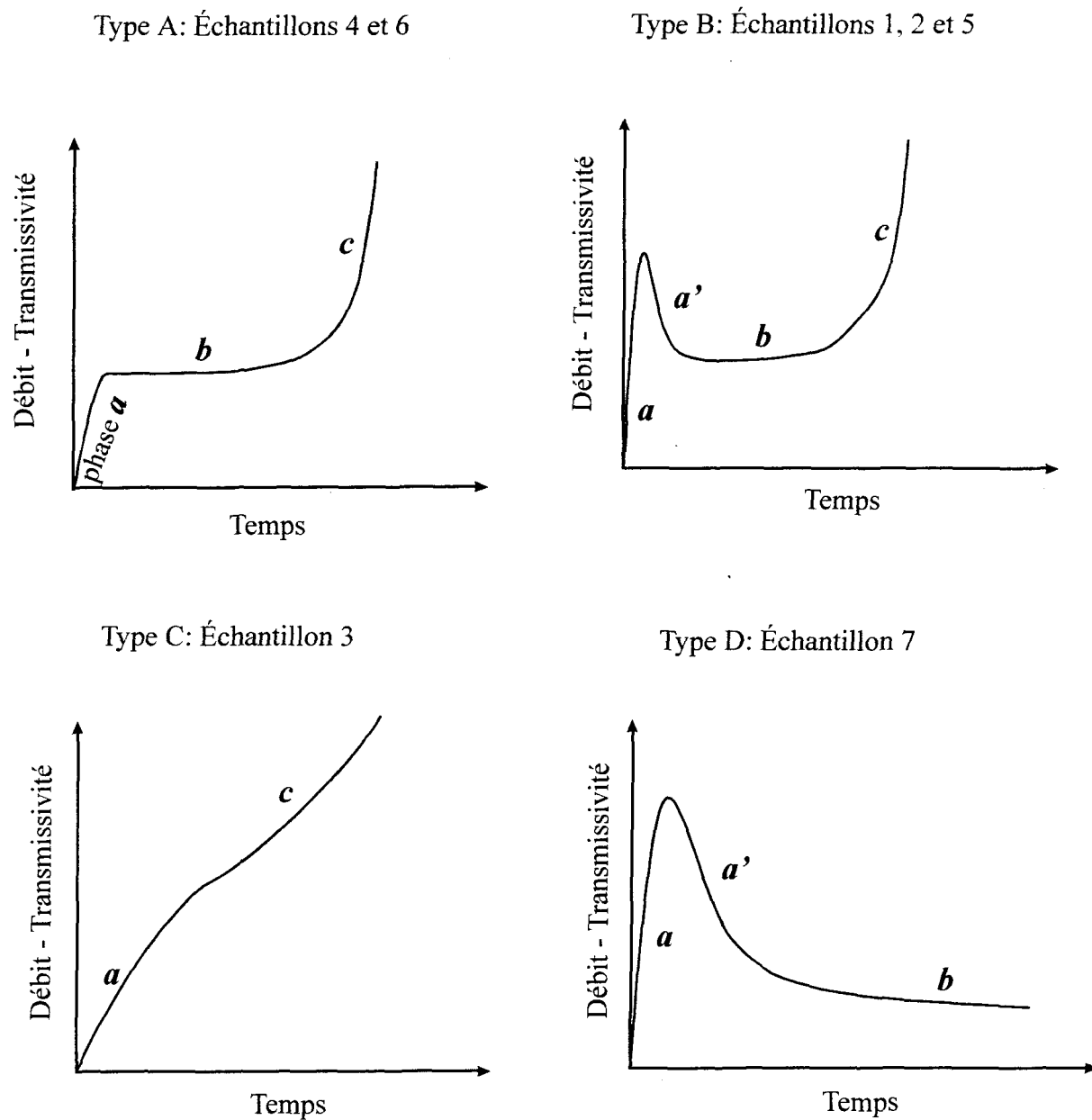


Figure 12.1 : Différents types d'évolution du débit et de la transmissivité en fonction du temps avec les différentes phases dans le cas des essais à pH 2 (courbes sans échelle).

Tableau 12.1: Résumé des résultats hydrauliques et chimiques des essais à pH 2.

Type d'évolution	Échantillon no.	P _c (MPa) / P _i (MPa)	Rapport P _i /P _c	Durée totale de l'essai	Débit d'eau (Q) (ml/h) - Transmissivité (m ² /s) - pH - Ca (mg/l) - SO ₄ (mg/l) - temps (t)																R Ca-SO ₄		
					1 ^{er} Q maximal	1 ^{er} T _r maximale	pH	Ca	SO ₄	t	Q constant à	T _r constant à	pH	Ca	SO ₄	t	Q final	T _r finale	pH	Ca		SO ₄	t
					A	4	12.38 / 1.1	0.089	2 h 40 min	24	2 x 10 ⁻¹⁰	6	311	806	5min	24	2 x 10 ⁻¹⁰	6	~320	780		5min	>300
	6	16.51 / 0.28	0.017	16 h 40 min	20	6 x 10 ⁻¹⁰	6	330	776	~2h	20	6 x 10 ⁻¹⁰	6	~330	632-730	16h	>120	>5 x 10 ⁻⁹	2.2	180	605	17h	0,06
B	2	8.26 / 0.28	0.033	6 h 40 min	150	4 x 10 ⁻⁹	6	?	?	15min	40	5 x 10 ⁻¹⁰	6	400	580-700	2h	>300	>1 x 10 ⁻⁸	2,08	0	945	6h30	-0,9
	5	12.36 / 0.28	0.022	3h 8 min	40	1,6 x 10 ⁻⁹	6	370	?	1h6min	35	8 x 10 ⁻¹⁰		370	1042	1h5min	>160	>1 x 10 ⁻⁸	2	0	946	2h56min	1?
C	7	16.51 / 1.1	0.067	108 h	3	2,3 x 10 ⁻¹¹	5,5	250		12h	0.2	1 x 10 ⁻¹²	5.1	30	858-1000	84h	0.2	1 x 10 ⁻¹²					-0,39
D	3	8.26 / 0.28	0.033	45 min	~400	1,5 x 10 ⁻⁸	6	350	1223	5min							>1800	>6 x 10 ⁻⁸	2,5	250	1015	45min	0,17

B	1	8.26 / 0.34	0.041	96 h	9	2,4 x 10 ⁻¹⁰	5,5-6	168-146	950	de 0 à 30h40min	2	7 x 10 ⁻¹¹				30h40min								
		8.26 / 0.55	0.067	De 43 h à 50 h	2,9	6 x 10 ⁻¹¹	5,4-5,9	153-132	894-1000	43 h	2,9	6 x 10 ⁻¹¹				50 h								-0,72
		8.26 / 1.1	0.133	De 50 h à 96h	15	1,3 x 10 ⁻¹⁰	2,5-3	108-90	990-966	1h							>54	>4 x 10 ⁻¹⁰				96 h		

P_c : Pression de confinement

P_i : Pression d'injection

R : corrélation (sans tenir compte des données de l'eau d'injection au temps zéro)

L'échantillon 1 présente une évolution générale du débit en fonction du temps du type B. Étant donné les faibles débits générés, l'augmentation de la pression d'injection à plusieurs reprises a permis d'accélérer les processus hydraulique et géochimique aboutissant au même résultat que celui de type B. Lorsque la pression d'injection est de 0,34 MPa (50 psi), on note une évolution du débit et de la transmissivité semblable à celle des trois premières phases, *a*, *a'* et *b* de l'évolution de type B. Après la reprise de l'essai à une pression d'injection de 0,55 MPa (80 psi), l'évolution du débit demeure à la troisième phase, phase *b*, du type B : soit une évolution selon un plateau, mais dont la valeur est un peu plus élevée que celle de l'injection précédente. Alors qu'après une ré-augmentation de la pression d'injection à 1,1 MPa (160 psi), on assiste à une augmentation rapide et continue du débit (et de la transmissivité) en fonction du temps, correspondant à la phase *c* de l'évolution de type B. L'évolution de type B représente donc une évolution plus complète où toutes les phases des autres types d'évolution se retrouvent.

En considérant tous les essais à pH 2, les résultats montrent que la transmissivité d'une fracture n'est pas influencée seulement par les conditions initiales de pression d'injection et celle de confinement (tableau 12.1). En effet, dans le cas de l'évolution de type A par exemple, l'échantillon 4 confiné sous une pression de 12,38 MPa et soumis à une pression d'injection de 1.1MPa génère une gamme de débit d'eau presque du même ordre (environ 24 ml/h) que dans le cas de l'essai sur l'échantillon 6 (environ 20 ml/h) et

avec une gamme de transmissivité plus faible que dans le cas de l'échantillon 6 (2×10^{-10} m²/s pour l'échantillon 4 comparé à 6×10^{-10} m²/s pour l'échantillon 6). Ce dernier échantillon a, pourtant, été soumis au confinement le plus élevé, soit 16,51 MPa, et à une pression d'injection plus faible, soit 0,28 MPa. Ce résultat est probablement dû en grande partie à la géométrie interne des fractures qui peut être très différente d'une fracture à une autre et aussi aux types de minéraux de remplissage des fractures

Dans le cas d'une évolution de type A, mis à part la valeur du premier pic du débit (qui peut correspondre à une phase non saturée), on constate que l'augmentation de la pression d'injection de 0,34 à 0,55 et à 1,1 MPa sous un même confinement provoque une augmentation générale du débit d'eau et de la transmissivité de la fracture (tableau 12.1).

12.1.2 Cas des essais à pH 2,5

Les données du débit et de la transmissivité en fonction du temps dans les trois essais à pH 2,5 montrent deux types d'évolution, E et D (figure 12.2). Le type E correspond à l'évolution des échantillons 8 et 9, où on assiste à une augmentation du débit et de la transmissivité jusqu'à un maximum au début de l'essai (phase *a*), puis à des fluctuations de ces deux paramètres par la suite (phase *a''*), mais avec une tendance générale à diminuer avec le temps. Le type D correspond à l'évolution de l'échantillon 10, où on note une augmentation rapide du débit et de la transmissivité jusqu'à un maximum dès le début de l'essai (phase *a*), puis une diminution (phase *a'*) pour se stabiliser durant le reste de l'essai (phase *b*).

De façon générale, dans les trois essais à pH 2,5 on observe une diminution du débit et de la transmissivité avec le temps (tableau 12.2). Les échantillons 8 et 9 présentent le même type d'évolution de débit de la transmissivité avec le temps avec à peu près la même gamme de débit (entre 10 et 30 ml/h), mais pour des valeurs de transmissivité différentes. Les valeurs de transmissivité sont plus faibles dans le cas de l'échantillon 8, entre 4×10^{-11} et $1,6 \times 10^{-10}$ m²/s; alors que dans le cas de l'échantillon 9, elles sont entre 2×10^{-10} et 5×10^{-10} m²/s. Ceci malgré que dans le cas de l'échantillon 8, le confinement est plus faible (8,26 MPa au lieu de 12,38 MPa dans le cas de l'échantillon 9) et la pression d'injection

d'eau est plus élevée (2,2 MPa au lieu de 0,55 MPa dans le cas de l'échantillon 9). Pour l'échantillon 10, l'évolution du débit d'eau et de la transmissivité est très différente avec moins de variation en fonction du temps. La gamme des valeurs de débits d'eau est un peu plus large que dans les cas des échantillons 8 et 9, soit de 5 à 37 ml/h; alors que la transmissivité varie de $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ à $5,5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, ce qui est à peu près la même gamme des valeurs que dans le cas de l'échantillon 9.

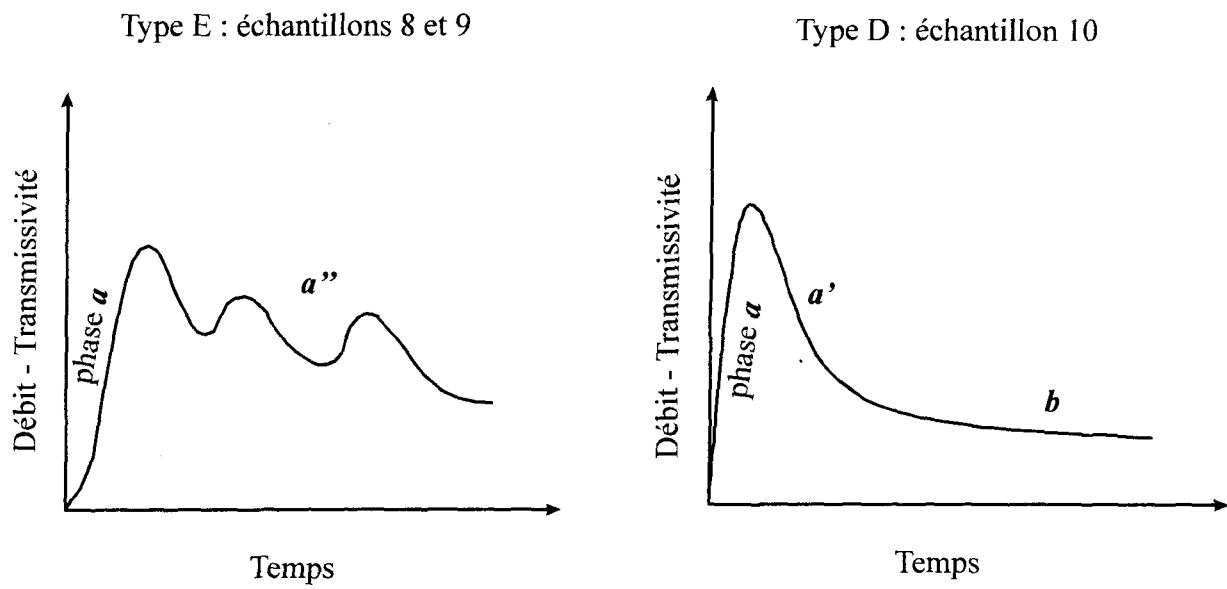


Figure 12.2 : Types d'évolution du débit d'eau et de la transmissivité de la fracture en fonction du temps pour les essais à pH 2,5 (courbes sans échelle).

Tableau 12.2: Résumé des résultats des essais à pH 2,5.

Échantillon no.	P _c (MPa) / Rapport		Durée de l'essai	Débit d'eau (Q) (ml/h) - Transmissivité (T _f) (m ² /s) - pf - Ca (mg/l) - SO ₄ (mg/l) - temps (t)																			R		
	P _i (MPa)	P _i /P _c		1 ^{er} Q	T _f	pH	Ca	SO ₄	t	Q	T _f	pH	Ca	SO ₄	intervalle du temps	Q	T _f	pH	Ca	SO ₄	t	Q moyen	T _f moyenne	Ca-SO ₄	SO ₄ -Fe
				maximal	maximale					varie (max-min)	final					maximale	(ml/h)					(m ² /s)			
8	8,26 / 2,2	0.267	120h	26	1 10 ⁻¹⁰	6,9	67	117	1h	30-10	0,4-1,6 x10 ⁻¹⁰	5,7-6,7	37-56	123-185	1h-120h	10	4,6 x10 ⁻¹¹	6,2	47	149	120h	11-38	0,43-1,5 x10 ⁻¹⁰	-0,61	0,66
9	12,38 / 0,55	0.044	216h	30	4,9 10 ⁻¹⁰	6,9	60	161	1h	25-8	1,5-4 x10 ⁻¹⁰	5,8-6,3	46-58	146-218	1h-216h	15	2 x10 ⁻¹⁰	5,8	46	155	216h	12-24	1,9-3,8 x10 ⁻¹⁰	0,12	-0,1
10	16,51 / 0,55	0.033	120h	37	5,4 10 ⁻¹⁰	6,8	165	348	2h	8-6 (cte)	1-5,5 x10 ⁻¹⁰	4,9-6,4	147-201	413-586	2h-120h	5	1 x10 ⁻¹⁰	5	156	488	120h	6-33	0,81-4,9 x10 ⁻¹⁰	0,8	0,73

P_c : Pression de confinement

P_i : Pression d'injection

Pour éch. no 8, SO₄ au point d'injection =167 mg/l

Pour éch. no 9, SO₄ au point d'injection=170 mg/l

Pour éch. no 10, SO₄ au point d'injection =167 mg/l

R: corrélation (sans tenir compte des données de l'eau d'injection au temps zéro)

12.1.3 Cas des essais à pH 4

Dans les trois essais à pH 4, sur les échantillons 2, 11 et 12, le débit d'eau et la transmissivité de la fracture en fonction du temps suivent une évolution de type D des essais à pH 2 et à pH 2,5 (figures 12.1 et 12.2). Dans ce type d'évolution, on observe une augmentation du débit et de la transmissivité au début de l'injection d'eau jusqu'à une valeur maximale, puis une diminution par la suite suivie d'une stabilisation à des valeurs plus faibles durant le reste de l'essai. Sous une augmentation de la pression d'injection d'eau, cette même évolution du débit et de la transmissivité se répète mais avec une gamme de valeurs beaucoup plus faibles (figures 11.4, 11.25 et 11.27). L'échantillon 12, soumis à un confinement plus élevé (16,51 MPa) que dans le cas de l'échantillon 11 (8,26 MPa), a généré un débit et donc une transmissivité plus faible sous une même valeur de pression d'injection (0,55 MPa); les valeurs maximales du débit et de transmissivité sont de 18 ml/h et de $2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement dans le cas de l'échantillon 12; par comparaison à 27 ml/h et $4,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le cas de l'échantillon 11 (tableau 12.3). Par conséquent, ces résultats montrent que pour un essai à pH 4 et sous une même pression de confinement, l'augmentation de la pression d'injection n'a pas d'effet sur la transmissivité d'une fracture.

Tableau 12.3: Résumé des résultats des essais à pH 4.

Échantillon no.	P _c (MPa) / P _i (MPa)	Augmentation de P _i (MPa) à t=	Rapport P _i /P _c	Durée de l'essai	Débit (Q) (ml/h)		Transmissivité (m ² /s)		Q moyen (ml/h)	T _r moyenne (m ² /s)	pH	Ca (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	R Ca-SO ₄	
					Q max.	Q min.	T _r max.	T _r min.							
2	8,26 / 0,28	0,41 à 31h 0,55 à 41h 1,24 à 81h	0.033	132h	12 à 3h26mn	2,9	3,3 x 10 ⁻¹⁰	8 x 10 ⁻¹¹	4,2-9	1,1 x 10 ⁻¹⁰ -2,5 x 10 ⁻¹⁰	5,8-6,4	0-120	0-368	0,7	
			0.05		5	4	8 x 10 ⁻¹¹	7 x 10 ⁻¹¹							
			0.067		7	6	8 x 10 ⁻¹¹	5 x 10 ⁻¹¹							
			0.15		15	7	8 x 10 ⁻¹¹	5 x 10 ⁻¹¹							
11	8,26 / 0,55	2,2 à 24 h	0.067	50h	27 à 2h30min	2	4,3 x 10 ⁻¹⁰	3 x 10 ⁻¹¹	3-16	4,8 x 10 ⁻¹¹ -2,6 x 10 ⁻¹⁰	6,6-6,7	0-7,8	0-4	-0,01	
			0.267		15 à 25h	3	5 x 10 ⁻¹¹	1 x 10 ⁻¹¹							
12	16,51 / 0,55	1,1 à 45h 2,2 à 46h	0.033	68h	18 à 2h	2 à 36h	2,4 x 10 ⁻¹⁰	3 x 10 ⁻¹¹	2-13	3 x 10 ⁻¹¹ -1,7 x 10 ⁻¹⁰	5,9-6,7	6,7-11	0-17	0,03	
			0.067		4,2	2									6 x 10 ⁻¹²
			0.133		7	2									6 x 10 ⁻¹²

P_c: Pression de confinement

P_i: Pression d'injection

SO₄ au point d'injection pour éch. No. 11 et 12: <1 mg/l

R: corrélation (sans tenir compte des données de l'eau d'injection au temps zéro)

12.1.4 Cas des essais à pH 7

Les essais à pH 7 sur les échantillons 2, 13 et 14 montrent une évolution de débit et de transmissivité en fonction du temps semblable à celle des essais à pH 4 (équivalent à l'évolution de type D des essais à pH 2 et des essais à pH 2,5) (figures 12.1 et 12.2). La différence entre les essais sur les échantillons 2, 13 et 14 à pH 7 réside dans les gammes de débit et de transmissivité générées (tableau 12.4). L'évolution du débit et de la transmissivité en fonction du temps pour l'échantillon 2 présente un cas intermédiaire entre celles de l'échantillon 13 et de l'échantillon 14. Dans le cas de l'échantillon 2, les débits maximal et minimal atteints sont de 150 ml/h, pour une transmissivité de $4 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, et de 8 ml/h, pour une transmissivité de $5 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$. Dans le cas de l'échantillon 13, les débits maximal et minimal sont de 480 ml/h, pour une transmissivité de $1,3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$, et de 150 ml/h, pour une transmissivité de $5 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$. Dans le cas de l'échantillon 14, les débits maximal et minimal sont de 28 ml/h, pour une transmissivité de $4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, et 3 ml/h, pour une transmissivité de $6 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

Tableau 12.4: Résumé des résultats des essais à pH 7.

Échantillon no.	P _c (MPa) / P _i (MPa)	Rapport P _i /P _c	Durée de l'essai	Débit (Q) (ml/h)		Transmissivité (T _f) (m ₂)		Q moyen (ml/h)	T _f moyenne (m ² /s)	pH	Ca (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	R Ca-SO ₄
				Q max.	Q min.	T _f max.	T _f min.						
2	8,26 / 0,28	0,033	31h	150 à 2h	8 à 30h	4 x10 ⁻⁹	5 x10 ⁻¹⁰	11 - 34		de 6,8 à 6,4	0-60	0-93	0,9
13	12,38 / 0,28	0,022	12h	480 à 1h30min	150 à 9h	1,3 x10 ⁻⁸	5 x10 ⁻⁹	144 - 380	3,9 x10 ⁻⁹ - 1 x10 ⁻⁸	de 6,7 à 7	0-0,6	0-0,38	-0,1
14	16,51 / 0,55	0,033	20h	28 à 1h	3 à 20h	4 x10 ⁻¹⁰	6 x10 ⁻¹¹	7,1-17	1 x10 ⁻¹⁰ - 2,4 x10 ⁻¹¹	de 5,8 à 7	0-3,8	0,09-1,25	1?

P_c: Pression de confinement

P_i: Pression d'injection

SO₄ au point d'injection < 0.1 mg/l

R: corrélation (sans tenir compte des données de l'eau d'injection au temps zéro)

Les échantillons 2 et 14 ont un même rapport de pression d'injection sur la pression de confinement (P_i/P_c) qui est de 0,033 mais des résultats hydrauliques différents, les valeurs des gammes de débit et de transmissivité plus élevées dans le cas de l'échantillon 2 (tableau 12.4). Alors que dans le cas de l'échantillon 13, le rapport (P_i/P_c) est de 0,022 et les valeurs de la gamme de débits sont beaucoup plus élevées que celles dans le cas des deux autres échantillons. La géométrie interne des fractures peut être un des facteurs dont l'effet est plus dominant que celui du rapport P_i/P_c sur la transmissivité.

12.2 ANALYSE DES RÉSULTATS HYDROCHIMIQUES

L'étude des relations qui peuvent exister entre les différents paramètres, telles que la relation entre le pH et la concentration en ions (e.g. Ca, SO_4), peut révéler d'importantes informations sur le type de réaction géochimique en cause lors d'un essai d'injection d'eau dans une fracture. Le pH étant indirectement lié aux ions Ca et SO_4 , il permet d'identifier les types de réactions chimiques présents lors d'un essai. À titre d'exemple, les réactions de dissolution de la calcite permettent une augmentation du pH en libérant les ions carbonates et le Ca dans l'eau; les réactions d'oxydation de minéraux sulfurés permettent une diminution du pH en libérant des ions H^+ et SO_4 dans l'eau.

12.2.1 Cas des essais multiples sur un même échantillon

a) Échantillon 1

Dans le cas de l'injection à pH 2 dans l'échantillon 1, les résultats de différents paramètres mesurés sont montrés en fonction du pH dans la figure 12.3. Bien qu'il n'existe pas une nette tendance entre le pH et la concentration en ions, on constate l'existence de deux types d'eau. Le premier type d'eau a des valeurs de pH faibles, comprises entre 2 et 3, et des concentrations en ions en général plus faibles; le pH présente une corrélation positive avec les ions Mn, Fe et Zn. Le Cl présente, par contre, une corrélation négative avec le pH. Le deuxième type d'eau correspond aux eaux à pH proche de la neutralité, entre 5 et 6, avec des concentrations plus élevées en ions mais sans montrer de corrélations bien nettes.

Dans le cas de SO_4 , sa concentration varie par rapport à sa valeur au point d'injection, mais sans montrer une tendance en fonction du pH pour les deux types d'eau. L'alcalinité ne montre pas une augmentation nettement continue avec l'augmentation du pH (figure 12.3e). Ceci peut être due d'une part à l'instabilité des ions carbonates et bicarbonates et à leur rééquilibrage avec les gaz atmosphériques, surtout lorsqu'ils ne sont pas analysés immédiatement après l'échantillonnage, et d'autre part aux erreurs analytiques (méthode analytique de titration). On constate, cependant, qu'à des valeurs plus élevées de pH, entre 4 et 6, les valeurs de l'alcalinité sont élevées. Le tracé de Ca en fonction de SO_4 (figure 12.4a) montre une corrélation négative entre ces deux ions ($R = -0,72$).

b) Échantillon 2

Dans le cas de l'injection à pH 7 dans l'échantillon 2, les graphiques des différents paramètres en fonction du pH (figure 12.5) ne montrent pas une nette tendance; ceci est dû à la faible variation du pH, entre 6 et 6,8. Les réactions chimiques responsables de la libération des ions majeurs, tels que le SO_4 , Ca et les bicarbonates, se passent donc proches de l'équilibre. Le graphique de Ca en fonction de SO_4 (figure 12.6a) montre une corrélation positive, due à l'abondance de la calcite et des sulfures, ainsi que des concentrations en SO_4 plus élevées que celles en Ca. La concentration de Ca varie de 0 à 60 mg/l, alors que celle de SO_4 est entre 0 et 93 mg/l. L'alcalinité, cependant, ne montre pas de corrélation avec le Ca, probablement à cause des mêmes types d'erreurs mentionnées précédemment pour ce paramètre.

Dans le cas de l'injection à pH 4, les graphiques des différents paramètres en fonction du pH (figure 12.7) montrent, en général, un groupement d'échantillons à la verticale autour de la valeur 6 du pH, correspondant à toutes les eaux recueillies à la sortie de la fracture pendant l'essai. Le passage d'un pH 4 à un pH proche de la neutralité se fait très rapidement puisqu'il est senti dès le premier échantillon d'eau recueilli à la sortie de la fracture.

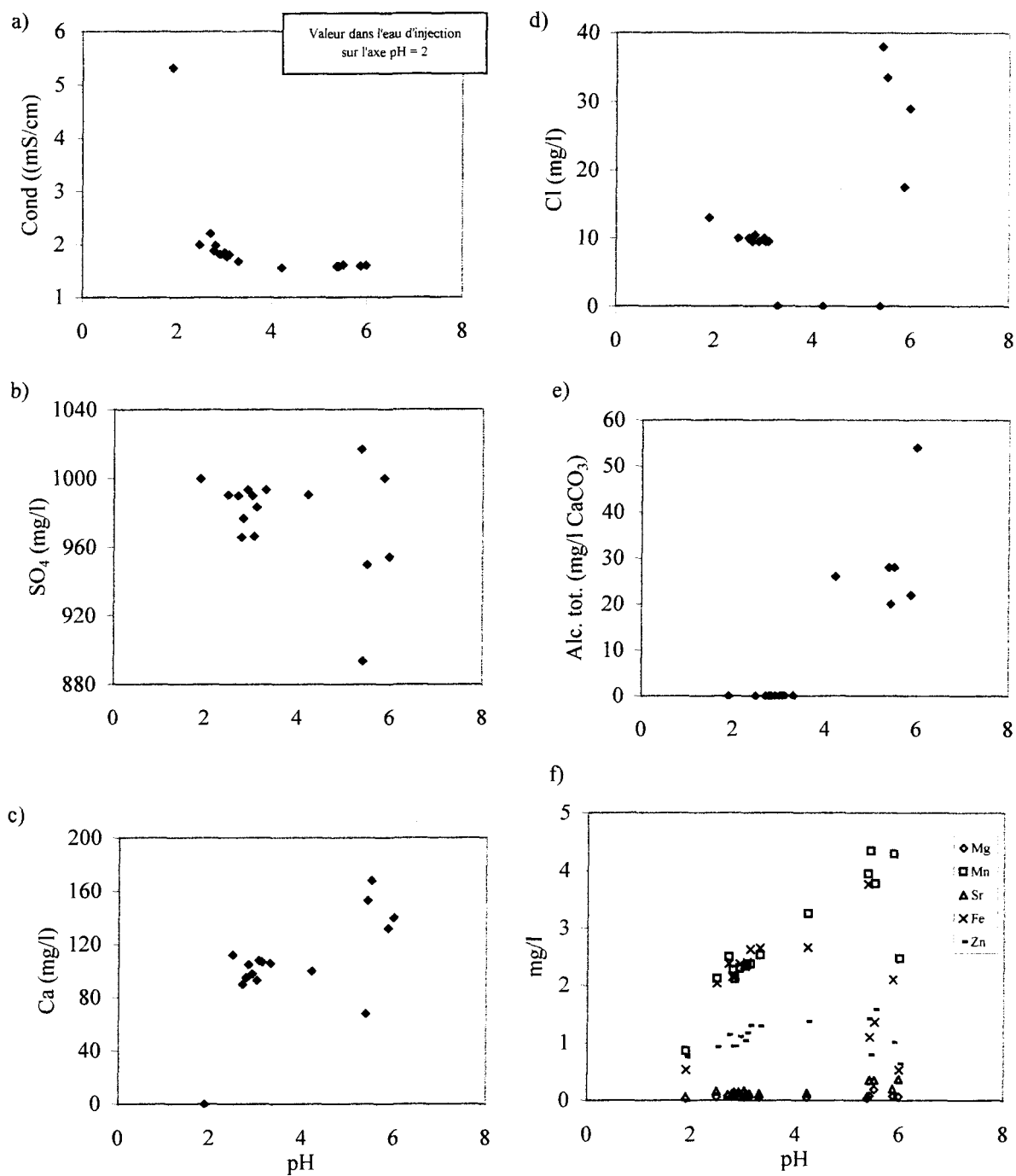


Figure 12.3: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 1 à pH 2; a) Conductivité électrique, b) SO₄, c) Ca, d) Cl, e) Alcalinité totale, f) Autres ions.

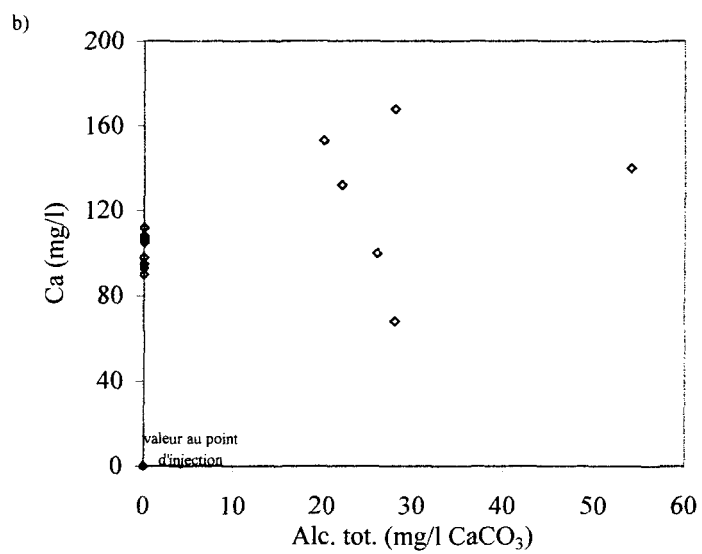
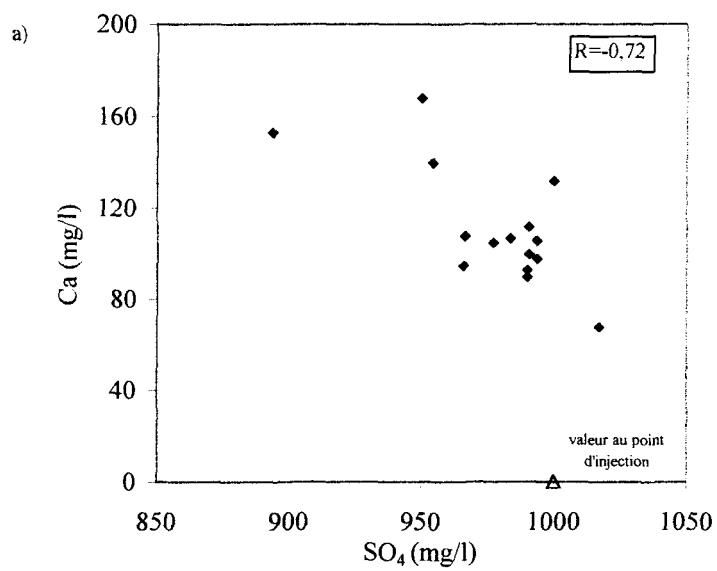


Figure 12.4: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ (a) et de l'alcalinité (b) pour l'échantillon 1 à pH 2.

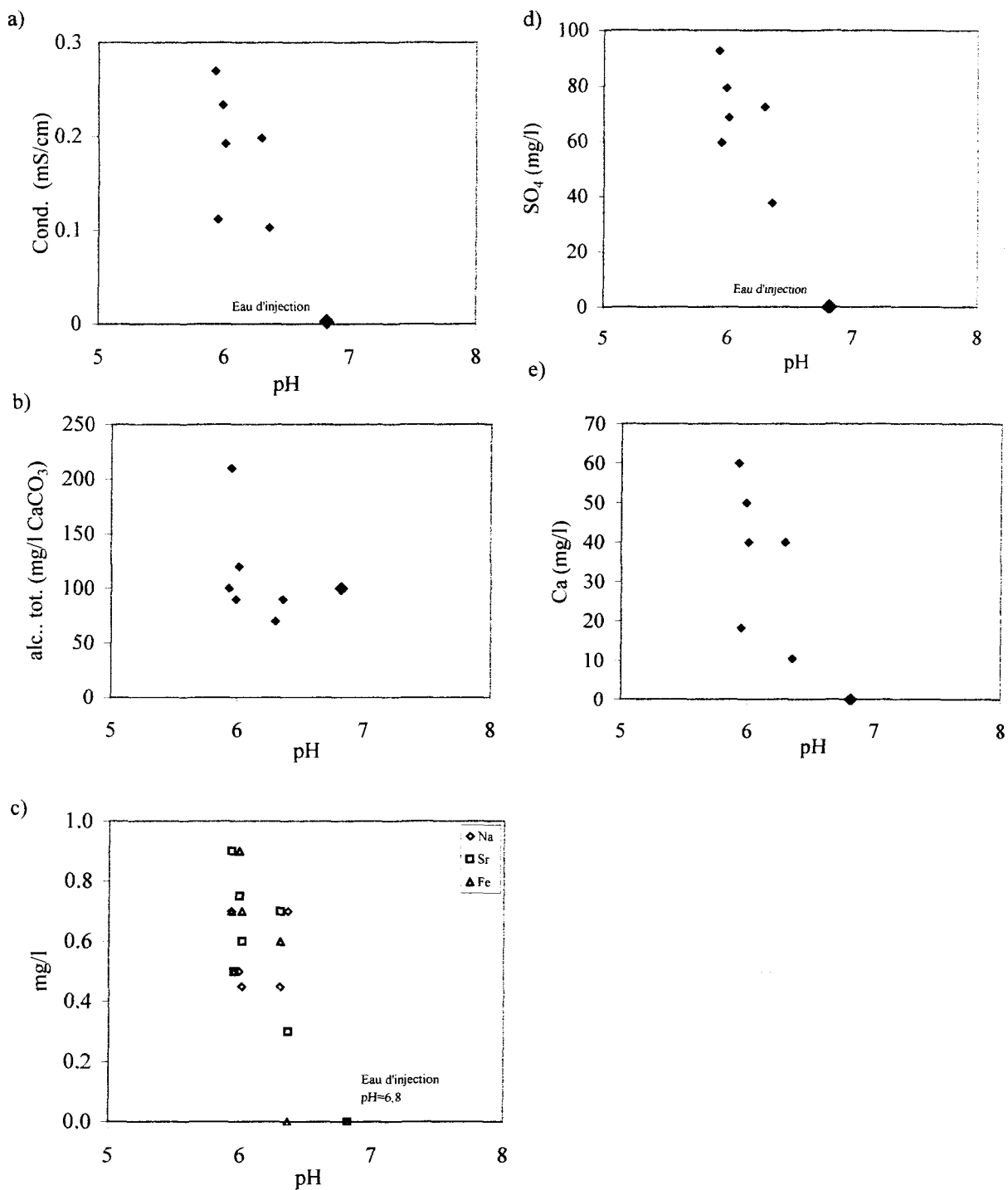


Figure 12.5: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 2 à pH 7; a) Conductivité électrique, b) Alcalinité totale, c) Autres ions, d) SO₄, e) Ca.

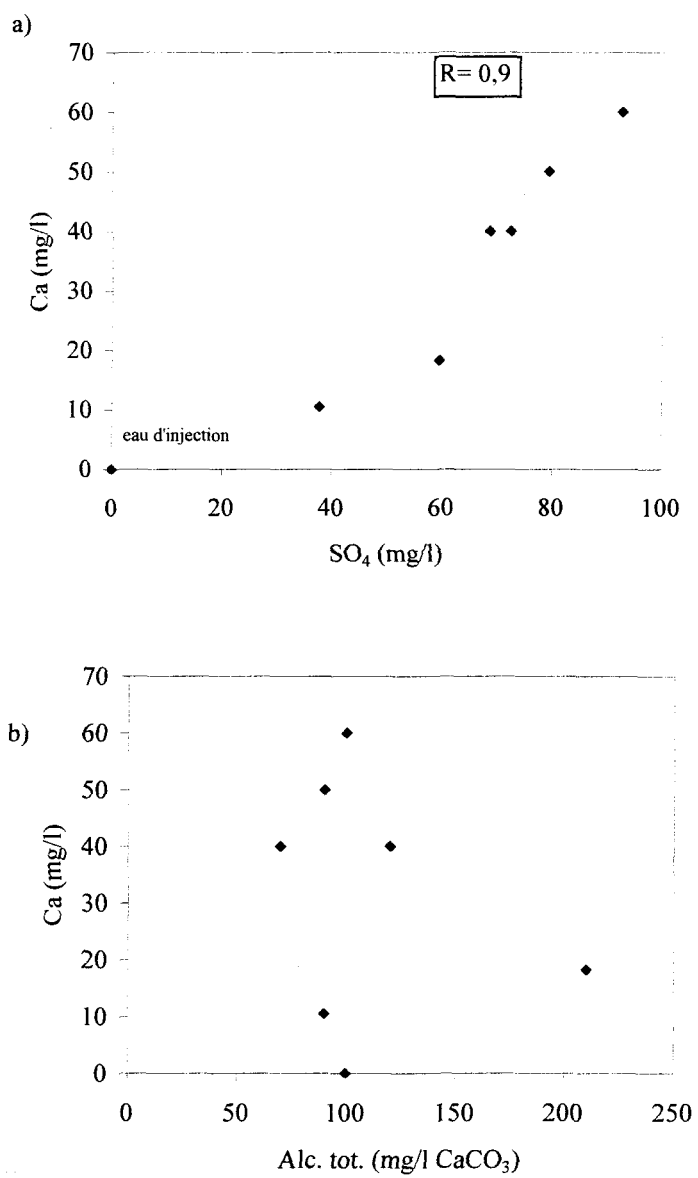


Figure 12.6: Concentration en Ca en fonction de celle de SO₄ (a) et de l'alcalinité totale (b) pour l'échantillon 2 à pH 7.

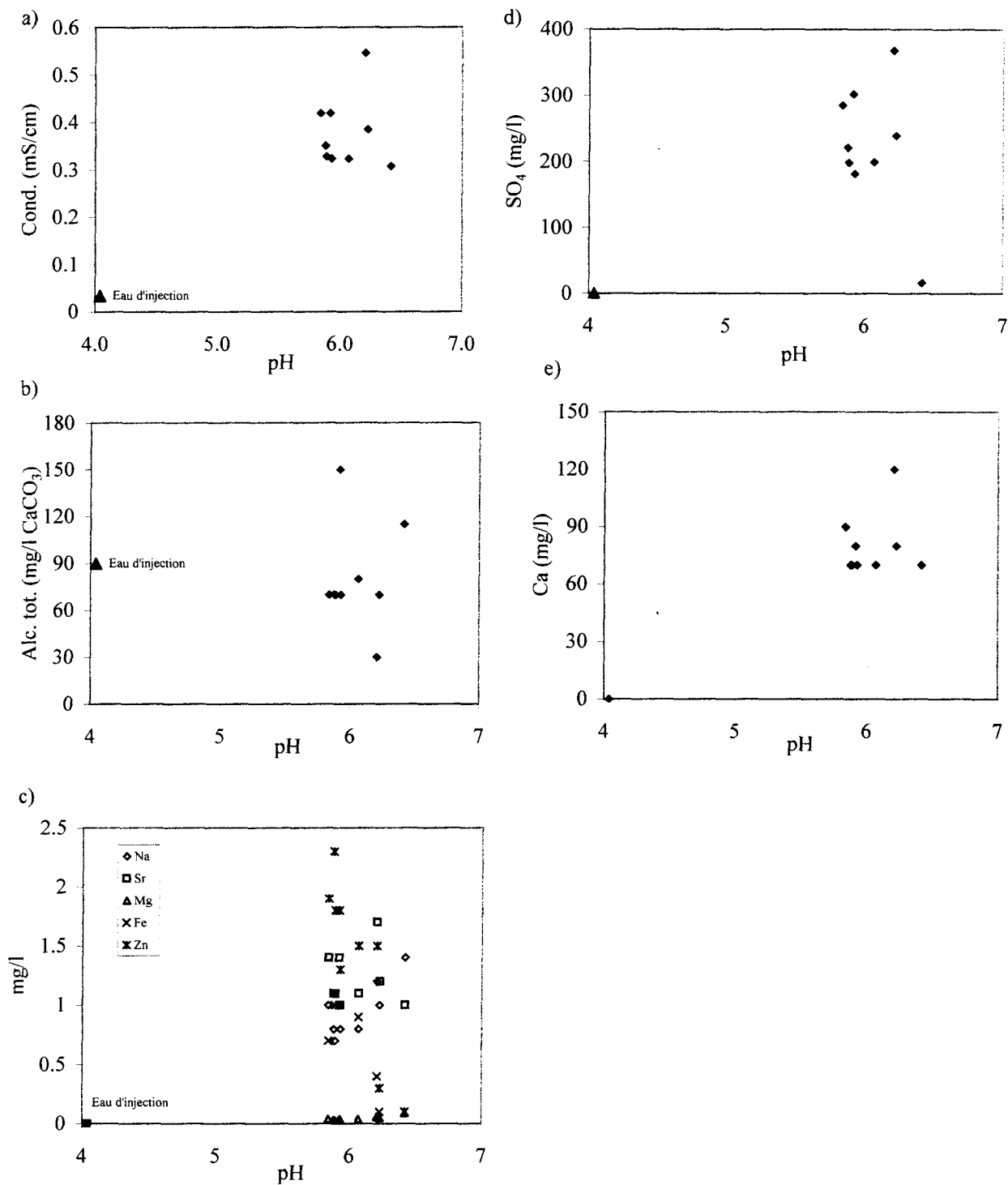


Figure 12.7: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 2 à pH 4; a) Conductivité électrique , b) Alcalinité totale, c) Autres ions , d) SO₄, e) Ca.

Le tracé de Ca en fonction de SO_4 (figure 12.8a) montre une corrélation positive ($R=0,72$) entre ces deux éléments. La gamme de concentration de SO_4 , de 0 à 370 mg/l, est environ trois fois celle de Ca qui est de 0 à 120 mg/l. Le Ca ne montre pas de tendance nette avec l'alcalinité totale due probablement aux erreurs analytiques impliquées pour la mesure de ce dernier paramètre (figure 12.8b).

Dans le cas de l'injection à pH 2, les graphiques des différents paramètres en fonction du pH (figure 12.9) montrent qu'il y a deux groupes d'eau. Le premier groupe d'eaux acides, à un pH de 2, correspond à l'eau d'injection et à un échantillon d'eau prélevé vers la fin de l'essai et moins riches en ions à l'exception de SO_4 . Le deuxième groupe correspond aux eaux moins acides (pH : 6) et riches en ions.

Le graphique de la concentration en Ca en fonction de celle de SO_4 montre l'existence d'une corrélation négative avec ces ions ($R=-0,9$) (figure 12.10a). Le Ca en fonction de l'alcalinité n'est pas représenté étant donné les erreurs analytiques qui peuvent affecter ce dernier paramètre.

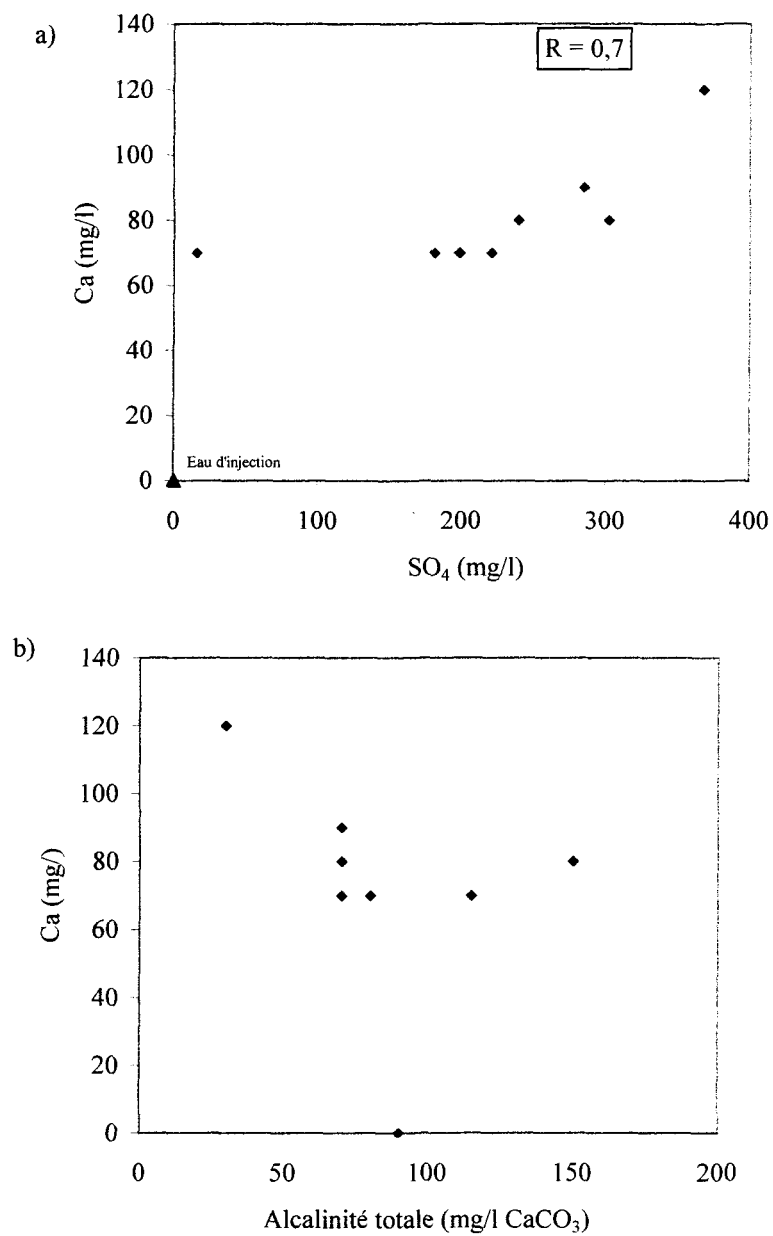


Figure 12.8: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ (a) et de l'alcalinité totale (b) pour l'échantillon 2 à pH 4.

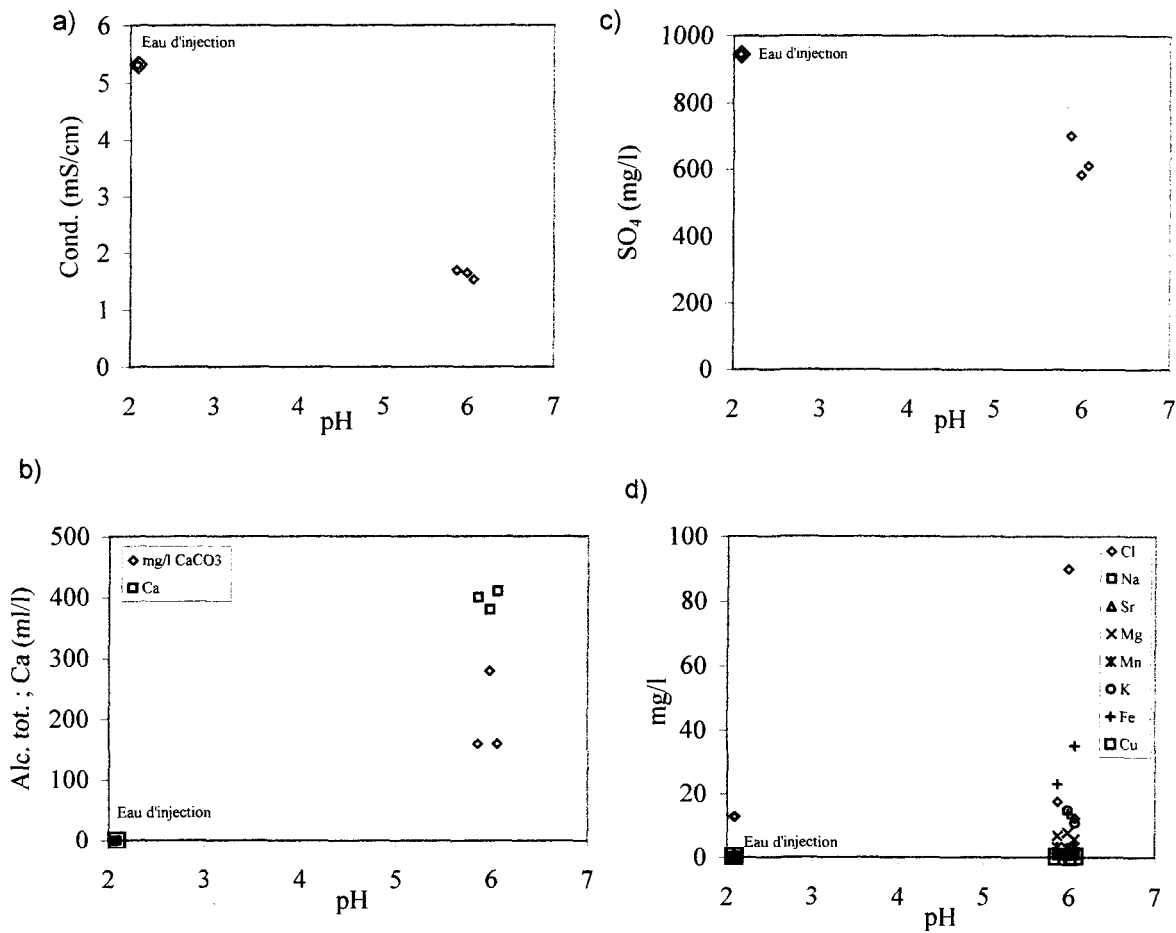


Figure 12.9 Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 2 à pH 2; a) Conductivité électrique, b) Alcalinité totale et Ca, c) SO₄, d) Autres ions.

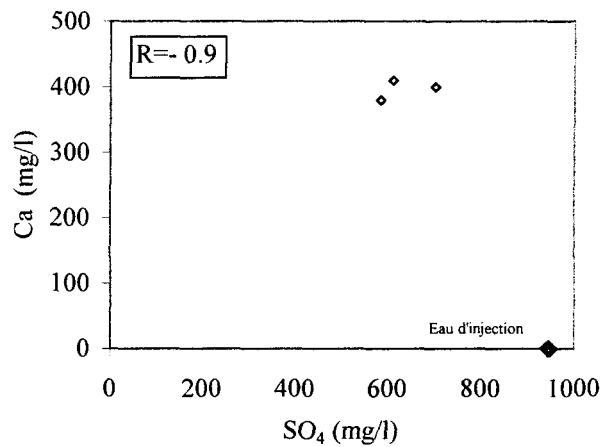


Figure 12.10: Ca en fonction de SO₄ pour l'échantillon 2 à pH 2.

12.2.2 Essais d'injection à pH 2

a) Échantillon 3

Dans le cas de l'échantillon 3 injecté à l'eau à pH 2, la conductivité électrique diminue avec l'augmentation du pH, de 5,6 mS/cm jusqu'à devenir à peu près constante autour de 1,5 mS/cm dès qu'on atteint des valeurs du pH supérieures à 3,5 (figure 12.11a). L'alcalinité suit une évolution inverse de la conductivité (figure 12.11b). La concentration de Ca augmente rapidement avec l'augmentation du pH et atteint 320 mg/l à une valeur de pH de 3,5. À partir de cette valeur de pH, la concentration en Ca devient presque stable (figure 12.11d). Le graphique de Ca en fonction de SO₄ (figure 12.12) montre des points dispersés sans tendance bien nette entre ces deux éléments (R=0,2).

Pour les graphiques des éléments mineurs en fonction du pH, on note une augmentation de la concentration de Mn avec celle du pH. Les eaux moins acides échantillonnées avant 30 heures d'essai sont donc plus riches en Mn (figure 12.11c).

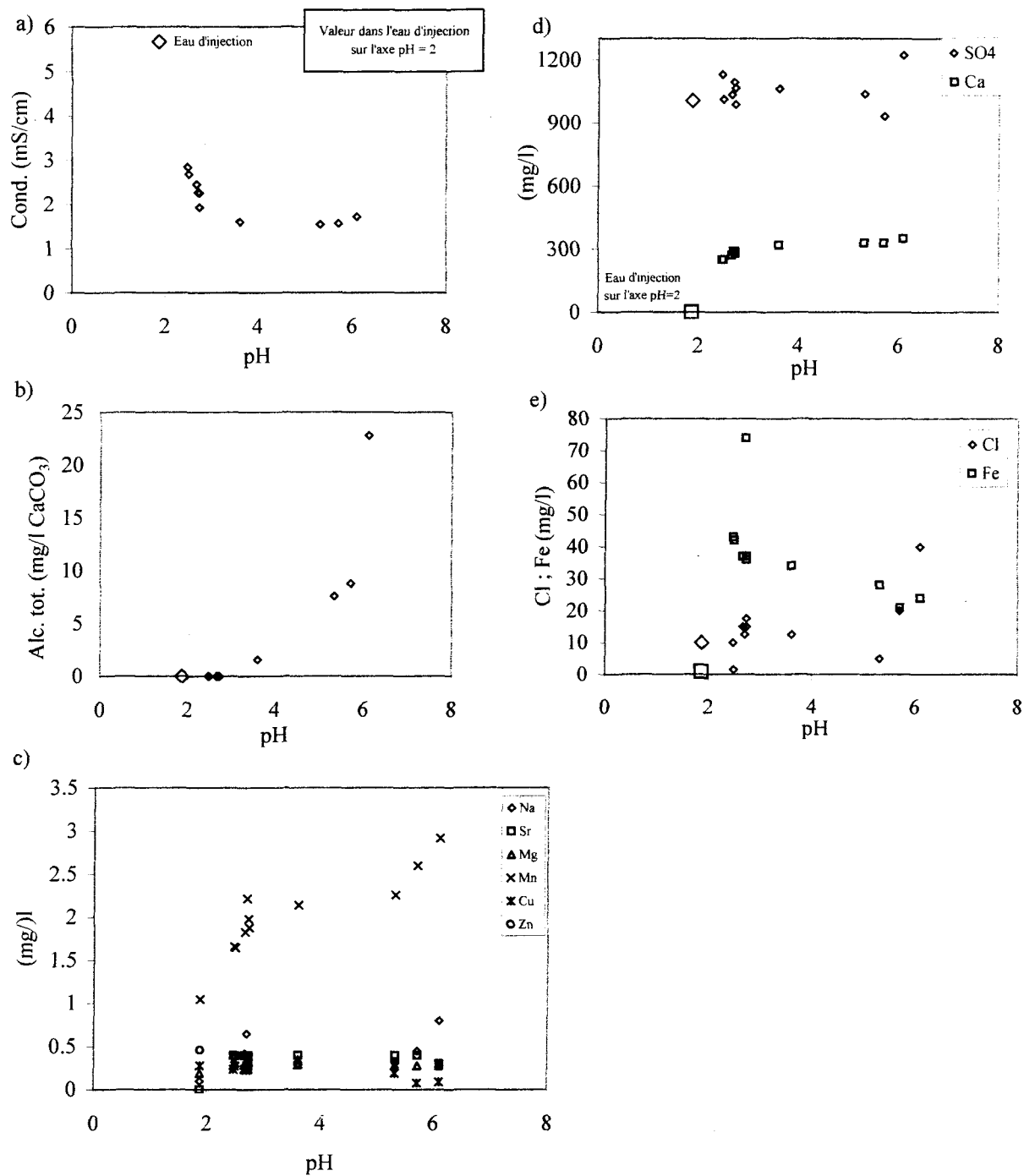


Figure 12.11: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 3 à pH 2; a) Conductivité électrique, b) Alcalinité totale, c) Autres ions, d) Ca et SO₄, e) Cl et Fe.

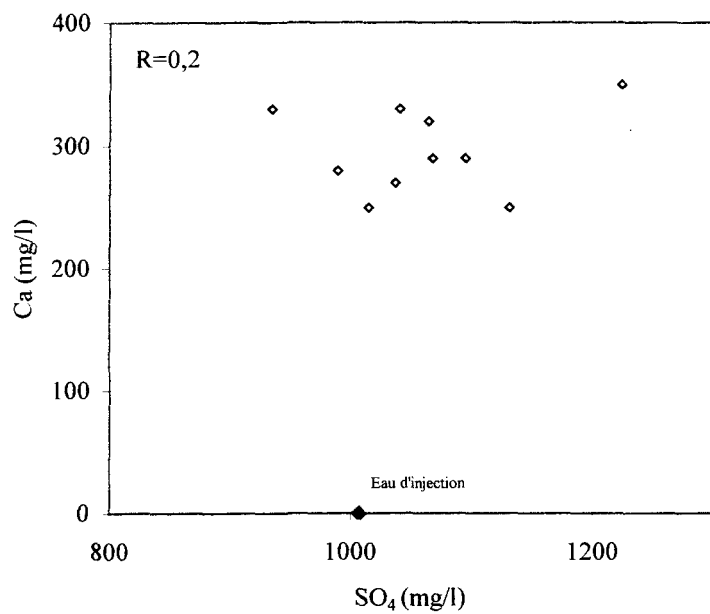


Figure 12.12: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 3 à pH 2.

b) Échantillon 4

Dans le cas de l'échantillon 4 injecté à l'eau à pH 2, les graphiques des différents paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH (figure 12.13) montrent l'existence de deux groupes d'eaux. Le premier groupe a des valeurs de pH faibles, entre 2 et 3, et différentes concentrations en ions. Les ions Ca, Mn, Fe, Mg et Sr présentent une corrélation positive avec le pH, alors que le Cl décrit une corrélation négative avec le pH. Le deuxième groupe d'eau a des valeurs de pH proches de la neutralité ($\text{pH} = 6$) et aussi des concentrations variées en ions, mais plus élevées que dans le premier groupe.

L'évolution des différents paramètres en fonction du pH suit à peu près celle observée dans le cas de l'échantillon 3. La seule exception est que dans le cas de l'essai sur l'échantillon 4, des points de mesure sont manquants entre le pH 2,5 et 6. Le passage d'un pH acide (environ 3) à un pH proche de la neutralité (environ 6) se fait très rapidement due à l'augmentation rapide du débit d'eau vers la fin de l'essai.

Le SO_4 et le Ca suivent le même type d'évolution en fonction du pH, si on exclut les données de l'eau d'injection. Lorsque le pH passe de 2 à 6, la concentration en Ca augmente; alors que la concentration en SO_4 diminue d'un seul coup au début, de 1000 mg/l, la concentration au point de départ, à 770 mg/l, et elle reste stable autour de cette

valeur durant l'essai (figure 12.13d). La figure de Ca en fonction de SO_4 (figure 12.14) montre, en effet, une corrélation positive ($R=0,69$) entre ces deux éléments, ceci sans tenir compte des données au point d'injection. Ce résultat montre qu'aussitôt qu'il y a circulation d'eau d'injection dans la fracture, il y a un rééquilibrage géochimique entre cette eau et le milieu environnant; l'excès de SO_4 (l'eau étant sursaturée en cet ion) est immédiatement précipité sous forme de minéraux secondaires; par la suite les réactions chimiques prennent leur rythme normal en suivant une corrélation positive dans ce cas.

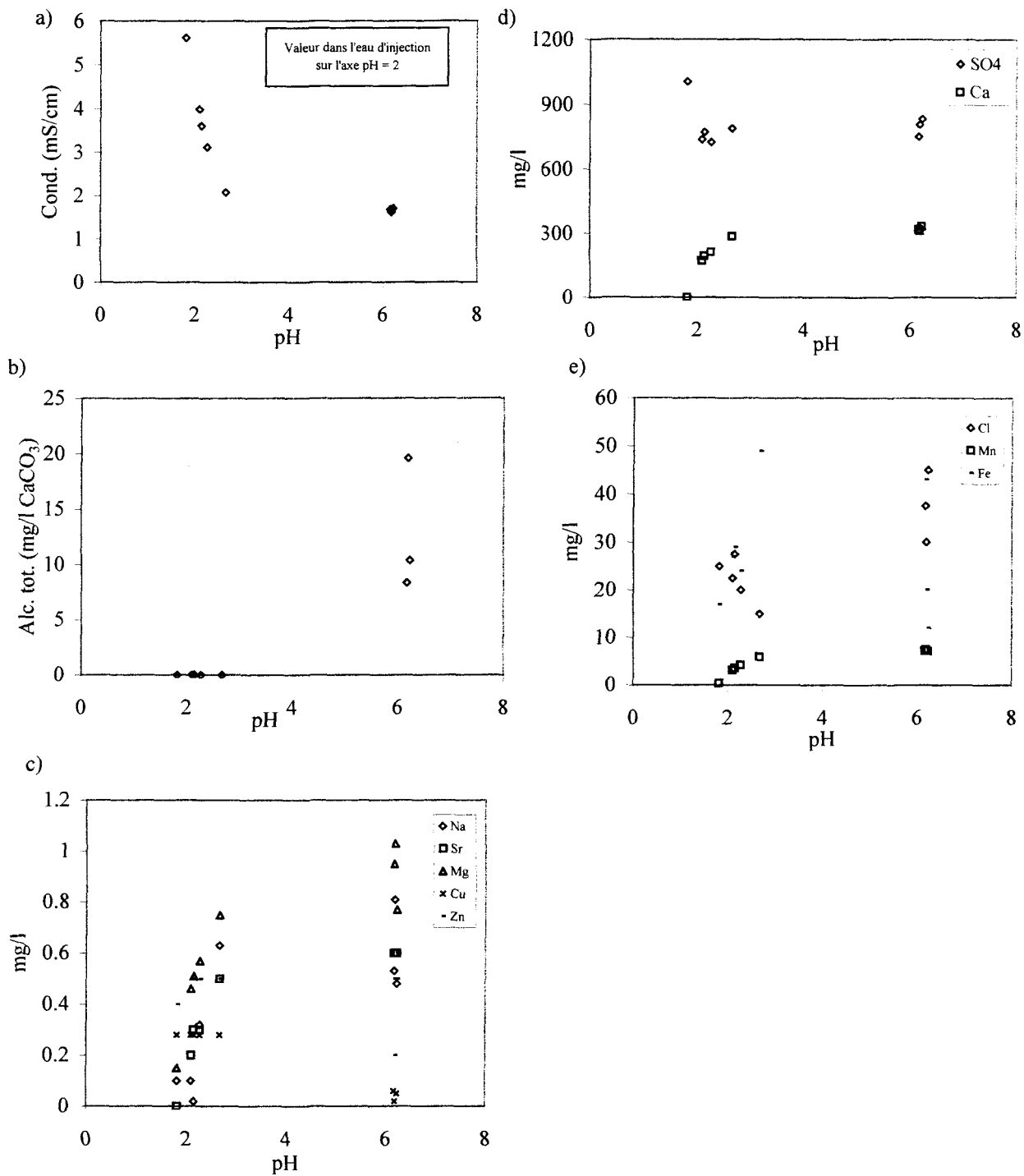


Figure 12.13: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 4 à pH 2; a) Conductivité électrique, b) Alcalinité totale, c) Autres ions, d) Ca et SO₄, e) Cl, Mn et Fe.

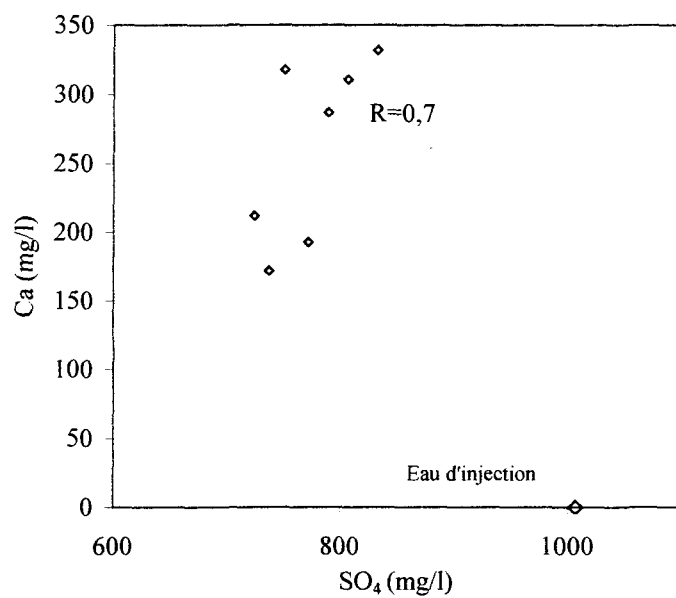


Figure 12.14: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 4 à pH 2.

c) Échantillon 5

Dans le cas de l'échantillon 5 injecté à l'eau à pH 2, les graphiques des différents paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH (figure 12.15) montrent deux groupes d'eau. Un premier groupe est composé d'eaux acides représentant l'eau au point d'injection et l'eau récupérée à la fin de l'essai. Il possède une concentration faible en ions, à l'exception de celle de SO_4 initialement élevée dans l'eau d'injection. Un deuxième groupe d'eau a un pH presque neutre (pH = 6) et une concentration élevée en ions. Étant donné que seuls deux échantillons d'eau ont été récupérés en plus de l'eau d'injection, le tracé de Ca en fonction de SO_4 ne peut être concluant quant à la corrélation entre ces deux ions (figure 12.16).

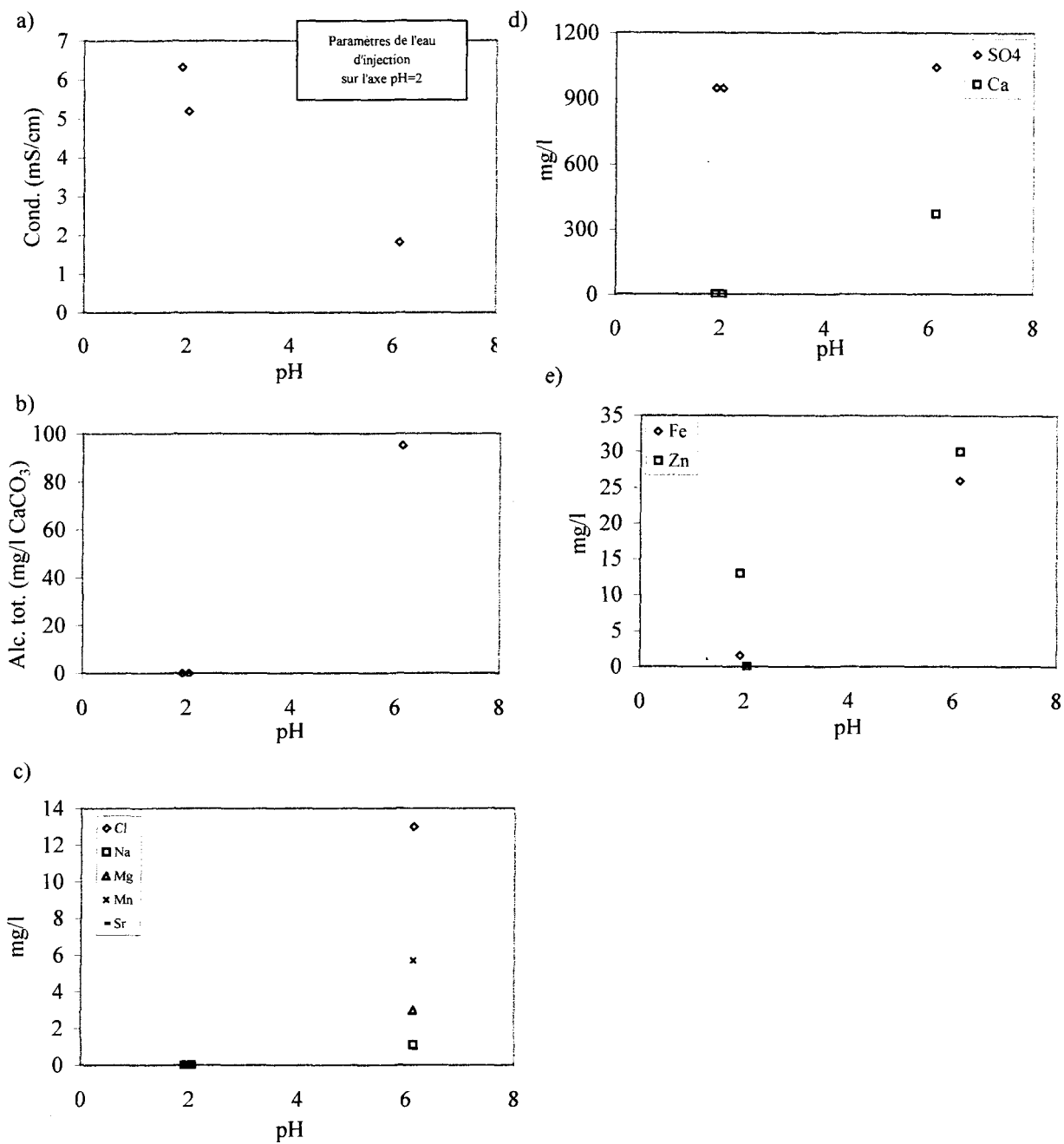


Figure 12.15: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 5 à pH 2; a) Conductivité électrique, b) Alcalinité totale, c) Autres ions, d) Ca et SO₄, e) Zn et Fe.

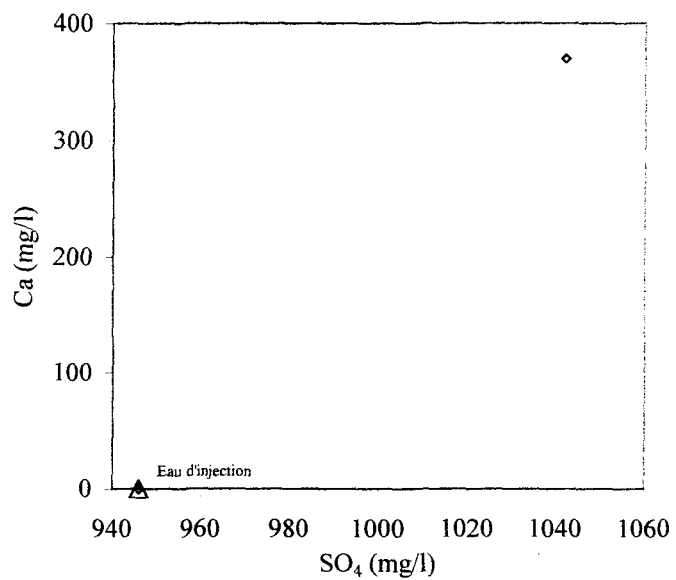


Figure 12.16: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 5 à pH2.

d) Échantillon 6

Les tracés des différents paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH de l'échantillon 6, soumis à une injection d'eau à pH 2, montrent deux types d'eaux (figure 12.17). Le premier type d'eau est acide, à pH entre 2 et 2,7, et présente des concentrations en Ca, Fe, Cl, Mg, Na et Sr augmentant avec l'augmentation du pH (corrélation positive). Le SO_4 subit une diminution de sa concentration avec l'augmentation du pH. Cependant, la concentration varie pour les ions Fe, Cl, Zn et Cu. Ce type d'eau correspond à l'eau d'injection et aux eaux récupérées vers la fin de l'essai. Le deuxième type d'eau a un pH proche de la neutralité, pH autour de 6, et une concentration en Ca presque constante, autour de 300 mg/l. Par contre, la concentration des autres ions varie beaucoup surtout dans le cas des ions mineurs. Le graphique du Ca en fonction du SO_4 (figure 12.18) montre une corrélation très faible ($R=0,06$) entre ces deux éléments.

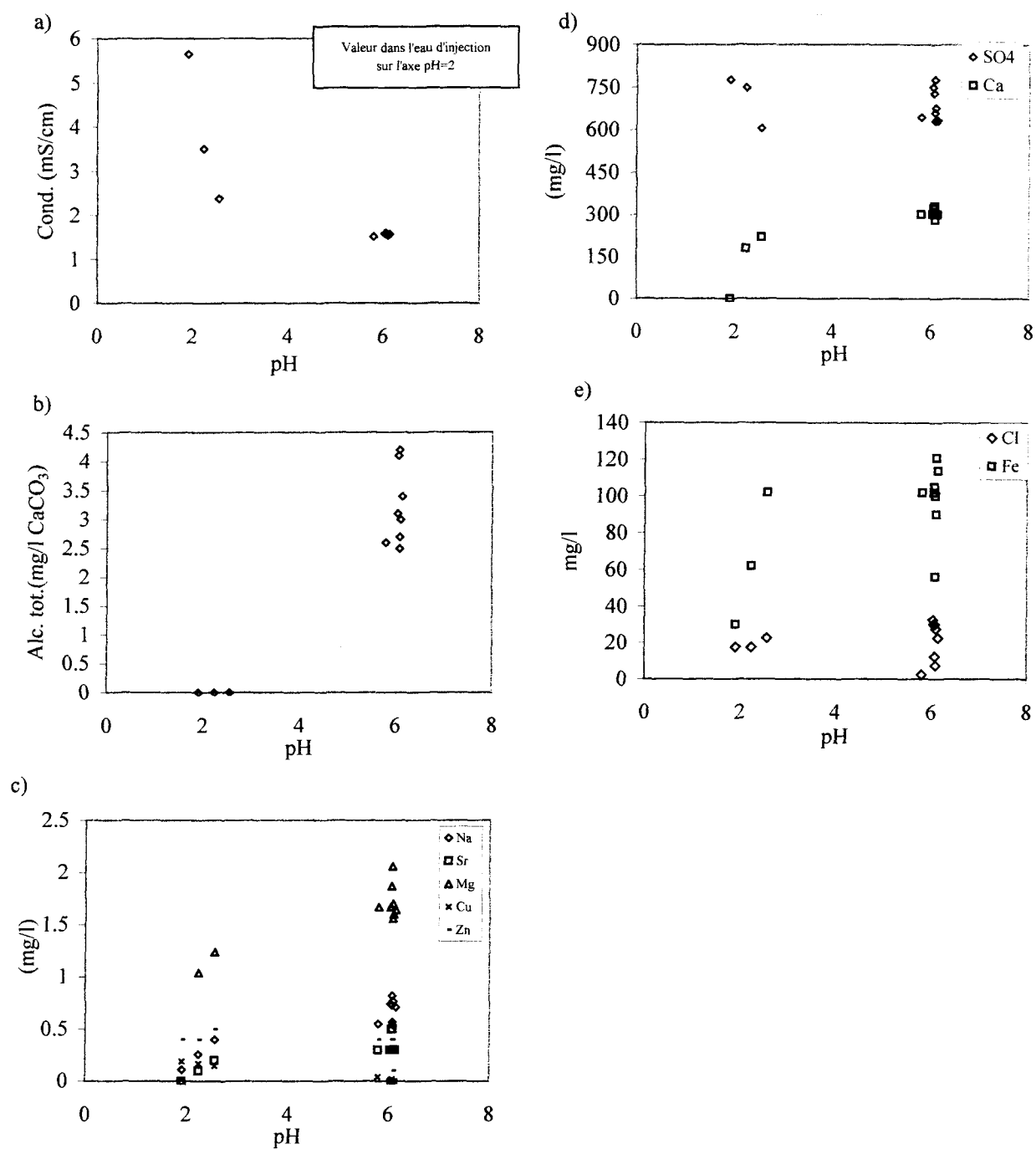


Figure 12.17: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 6 à pH 2; a) Conductivité électrique, b) Alcalinité totale, c) Autres ions, d) Ca et SO₄, e) Cl et Fe.

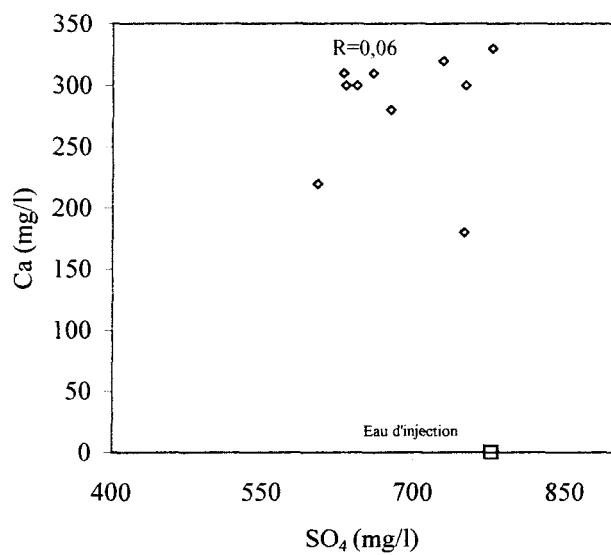


Figure 12.18: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 6 à pH 2.

e) Échantillon 7

Les graphiques des différents paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH de l'échantillon 7, soumis à une injection d'eau à pH 2, montrent deux groupements d'échantillons (figure 12.19). Le premier groupe, correspondant à l'eau au point d'injection, a un pH de 2 et des concentrations faibles en ions, à l'exception de SO_4 initialement abondant dans l'eau d'injection. Le deuxième groupe représente des eaux moins acides, d'un pH entre 4 et 6, et riches en ions. Dans ce cas de l'essai sur l'échantillon 7, au moins un échantillon d'eau présente un pH intermédiaire, d'environ 4,3. Le graphique de Ca en fonction de SO_4 montre une corrélation négative mais non significative ($R=-0,39$) entre ces deux ions (figure 12.20). La concentration en Ca n'est pas tout à fait constante dans le deuxième groupe d'eau, variant de 30 à 250 mg/l, à la différence des autres essais à pH 2. L'augmentation importante de la concentration en Fe dans le deuxième groupe d'eau n'est corrélée avec aucun autre élément.

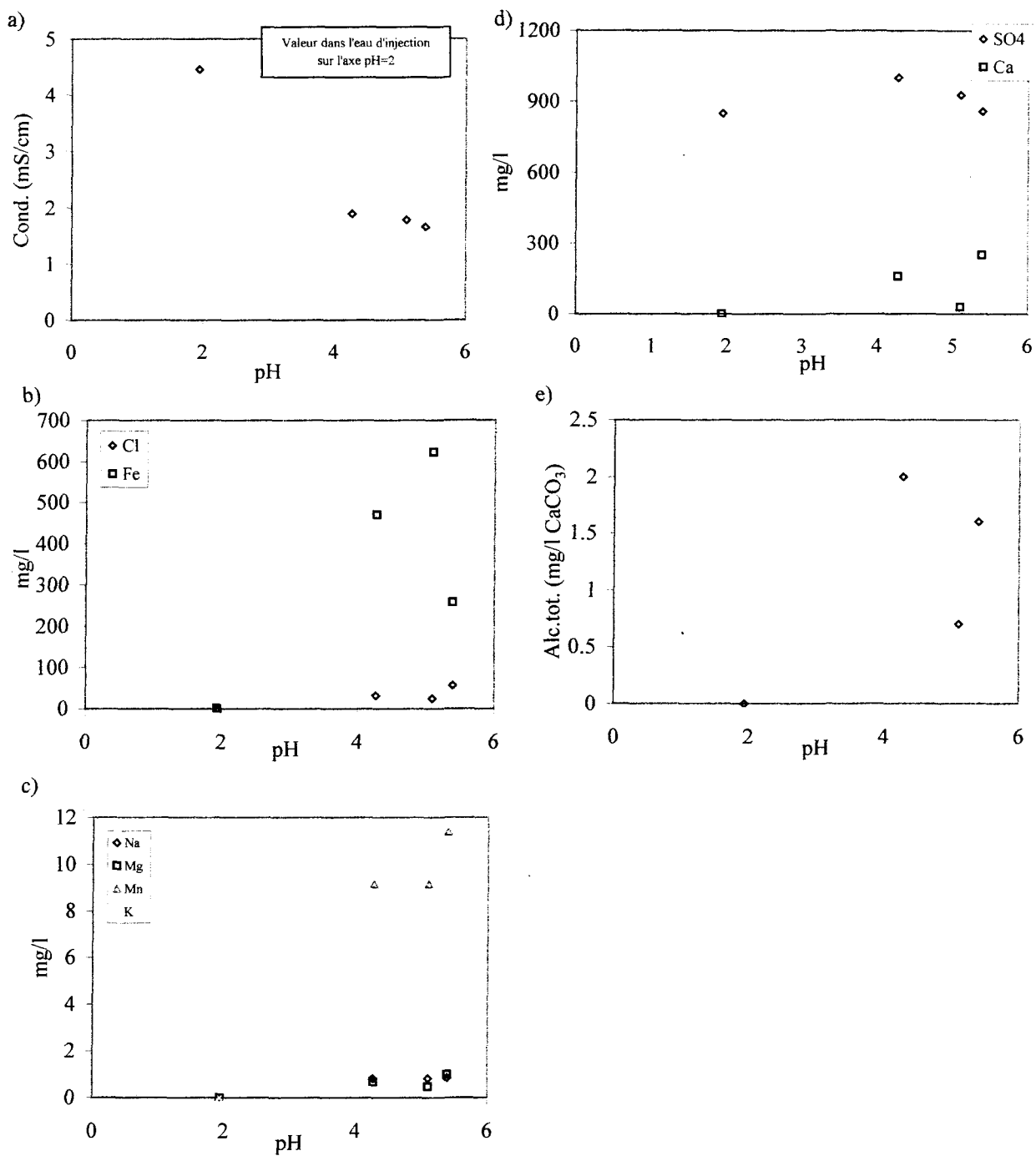


Figure 12.19: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 7 à pH 2; a) Conductivité électrique, b) Cl et Fe, c) Autres ions, d) Ca et SO₄, e) Alcalinité totale.

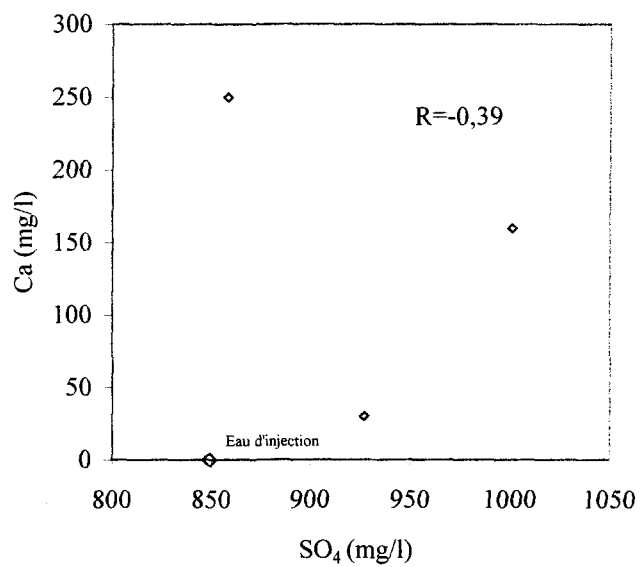


Figure 12.20: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 7 à pH 2.

12.2.3 Essais d'injection à pH 2,5

a) Échantillon 8

Dans le cas de l'échantillon 8 injecté à l'eau à pH 2,5, les graphiques des différents paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH montrent que, à l'exception de l'échantillon de l'eau au point d'injection (à pH 2,5), il n'y a qu'un seul groupe d'eau pour les eaux récupérées à la sortie de la fracture, évoluant autour d'un pH presque neutre (pH de 6) (figure 12.21). Sur les graphiques de SO_4 et de Ca en fonction du pH (figure 12.21b), on note une augmentation de la concentration de Ca avec l'augmentation du pH, alors que celle de SO_4 suit une évolution contraire. Pour le graphique de Fe en fonction du pH, on observe une diminution de la concentration de Fe avec l'augmentation du pH (à l'exception de l'échantillon au point d'injection à pH 2,5) (figure 12.21e). Le graphique de Fe en fonction de SO_4 montre un nuage de points indiquant une tendance à une augmentation de la concentration en Fe avec celle de SO_4 ($R=0,66$) (figure 12.22b). Le graphique de Ca en fonction de SO_4 montre que ces deux éléments ont une corrélation négative ($R=-0,61$) (ceci en excluant toujours le point à pH 2,5) (figure 12.22a). Ces résultats suggèrent qu'aussitôt qu'il y a circulation de l'eau d'injection à l'intérieur de la fracture, un rééquilibrage chimique s'installe entre l'eau et le milieu environnant de la fracture (minéraux de remplissage); d'où les tendances observées, positives ou négatives,

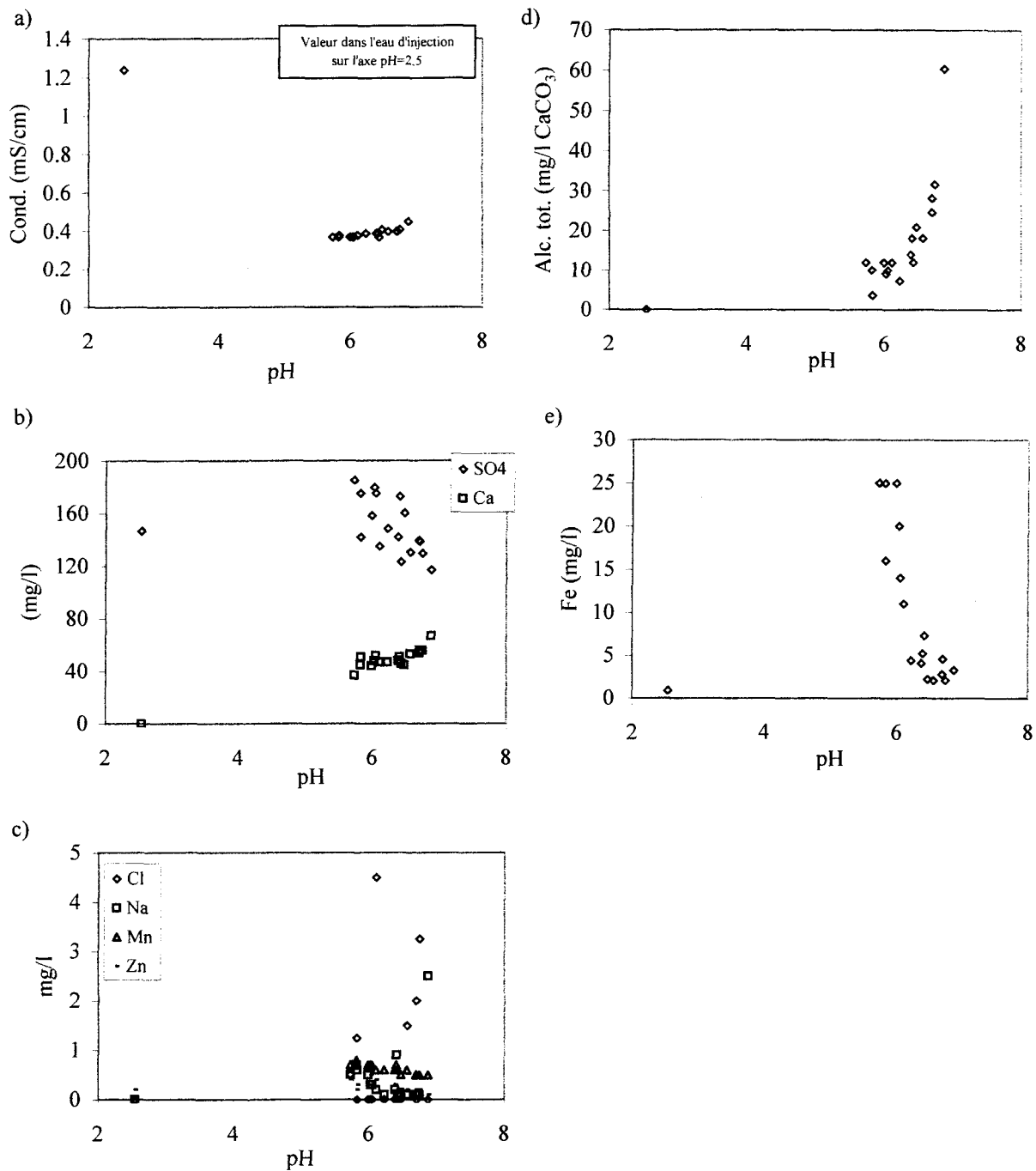


Figure 12.21: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 8 à pH 2,5; a) Conductivité électrique, b) Ca et SO₄, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Fe.

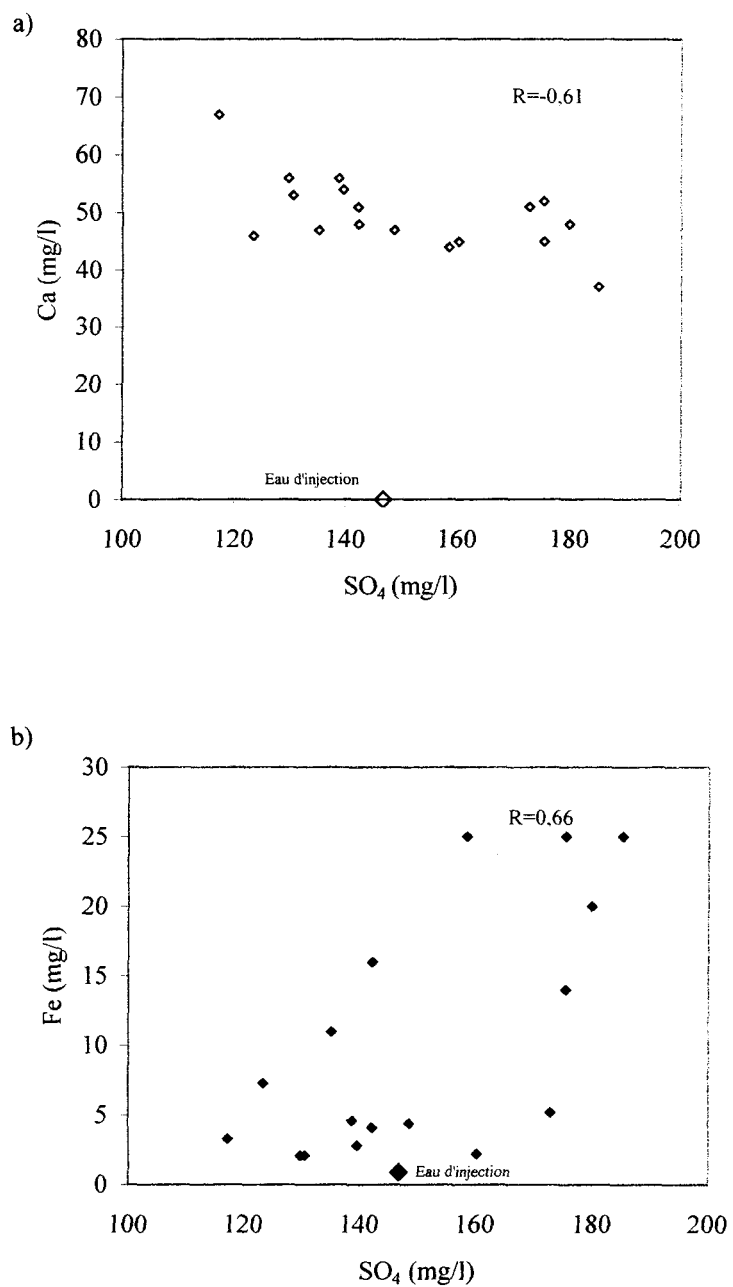


Figure 12.22: Les concentrations de Ca (a) et de Fe (b) en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 8 à pH 2,5.

entre les différents éléments. Lorsqu'une tendance positive est observée entre deux éléments, cela implique un même type de réaction chimique, qui soit libère ou fait précipiter ces éléments. Une tendance négative entre deux éléments indique la présence de différents type de réactions chimiques pouvant libérer un élément pendant qu'un autre précipite.

b) Échantillon 9

Dans le cas de l'échantillon 9 injecté à l'eau à pH 2,5, les graphiques des différents paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH (figure 12.23) montrent l'existence d'un seul groupe d'eau récupérée à la sortie de la fracture. Cette eau présente un pH proche de la neutralité (pH entre 6 et 7). Ces graphiques montrent aussi les conditions de l'eau d'injection, à une valeur de 2,5. Le graphique de Ca en fonction du pH (figure 12.23d) montre une augmentation de la concentration en Ca avec l'augmentation du pH dans le cas des eaux récupérées à la sortie de la fracture. Par contre, dans le cas de SO_4 , sa distribution générale est sous forme de nuage de points autour de la valeur 6 du pH. La conductivité électrique dans l'eau à la sortie subit une légère augmentation avec l'augmentation du pH.

Le graphique de Ca en fonction de SO_4 ne montre qu'une très faible corrélation entre ces deux éléments ($R=0.12$) (figure 12.24). La dispersion des points dans le graphique est due à la grande variation de la concentration de SO_4 durant l'essai (figure

12.22b; tableau 12.2). Le graphique de Fe en fonction du pH (figure 12.23e) montre un profil des points de données généralement vertical, avec une tendance à une diminution de la concentration en Fe avec l'augmentation du pH.

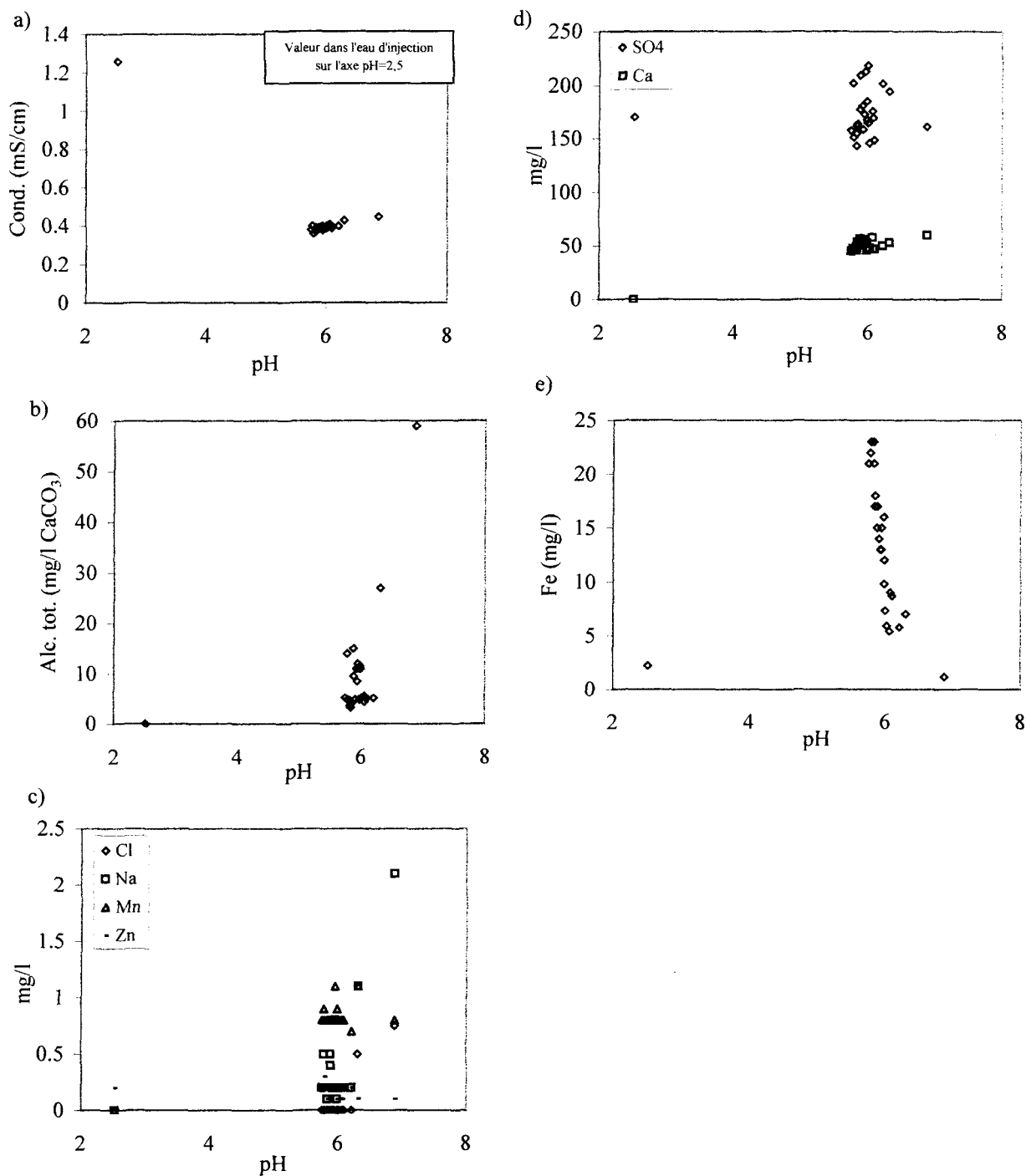


Figure 12.23: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 9 à pH 2,5; a) Conductivité électrique, b) Alcalinité totale, c) Autres ions, d) Ca et SO₄, e) Fe.

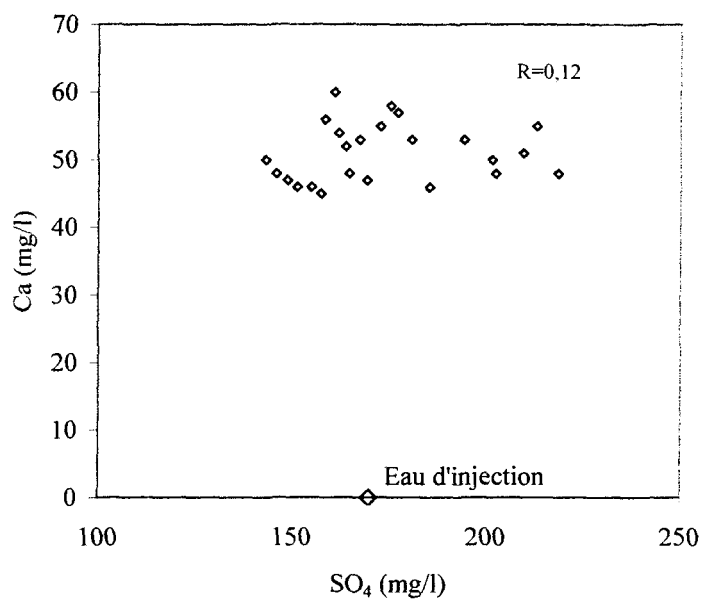


Figure 12.24: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 9 à pH 2,5.

c) Échantillon 10

Dans le cas de l'échantillon 10 injecté à l'eau à pH 2,5, les graphiques des différents paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH montrent que les eaux récupérées à la sortie de la fracture forment un seul groupe réparti sur une gamme de pH entre 5 et 7 (figure 12.25). Les points de données avec des valeurs de pH légèrement acide représentent des eaux récupérées vers la fin de l'essai. Les graphiques montrent une augmentation de la concentration des ions Ca, de 156 à 201 mg/l, et de celle de SO₄, de 488 à 586 mg/l, pour un pH compris entre 5 et 5,7. Ces ions montrent une diminution de leur concentration pour des valeurs de pH plus élevées, atteignant 135 mg/l pour Ca et 348 mg/l pour SO₄ pour un pH de 6,8. Par contre, la concentration en Fe diminue de 49 à 2 mg/l avec l'augmentation du pH (figure 12.25e).

Le graphique de Ca en fonction de SO₄ (figure 12.26) montre une corrélation positive entre ces deux éléments ($R=0,8$), ce qui suggère la présence d'une réaction chimique favorisant soit leur enrichissement ou leur appauvrissement simultané durant l'essai. La gamme de concentrations de SO₄ est, par contre, deux fois plus élevée que celle de Ca.

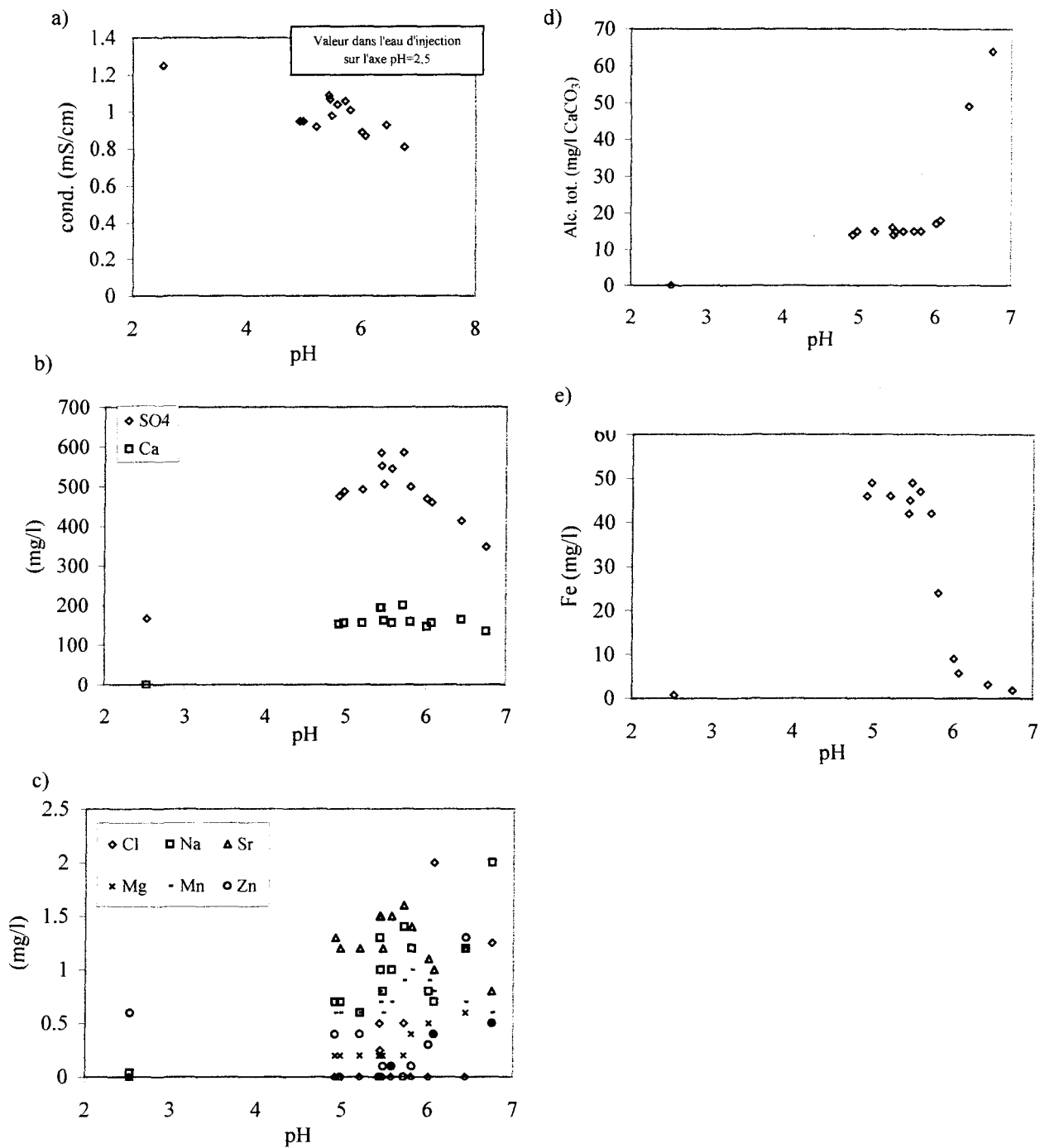


Figure 12.25: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 10 à pH 2,5; a) Conductivité électrique, b) Ca et SO₄, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Fe.

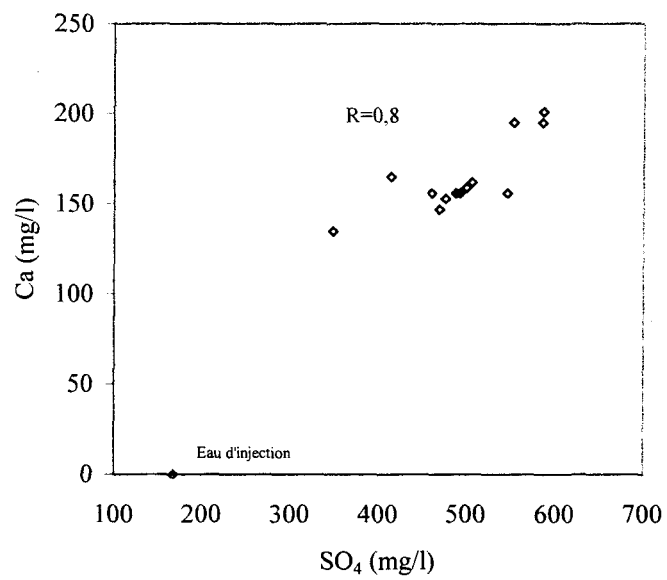


Figure 12.26: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 10 à pH 2,5.

d) Comparaisons des résultats des essais à pH 2,5

Dans le cas des essais à pH 2,5 sur les échantillons 8, 9 et 10, les résultats géochimiques montrent deux types de tendance comparés aux résultats hydrauliques. La première tendance correspond à celle des échantillons 8 et 9. Leur pH durant l'essai est plus stable et ne descend pas plus bas que 6. Les ions Ca et SO₄ montrent une corrélation négative dans le cas de l'échantillon 10, alors que dans le cas de l'échantillon 9, il y a une dispersion de données. La deuxième tendance correspond à celle de l'échantillon 10. Le pH devient de plus en plus acide durant l'essai et surtout vers la fin. Les ions Ca et SO₄ montrent une corrélation positive et ont des concentrations plus importantes.

Les eaux récupérées forment généralement un seul groupe d'eau avec une gamme de pH proche de la neutralité, impliquant que d'importantes réactions entrent en cause entre l'eau et les minéraux de remplissage des fractures dès le début de l'injection. Ces réactions se maintiennent durant toute la durée de l'essai.

12.2.4 Essais d'injection à pH 4

a) Échantillon 11

Dans le cas de l'échantillon 11, injecté à l'eau à pH 4, les graphiques des divers paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH (figure 12.27) montrent un seul groupe d'eaux avec un alignement vertical des points à la valeur 6,6 du pH. Le tracé de Ca en fonction de SO_4 (figure 12.28) ne montre pas de tendance nette entre ces deux éléments ($R=-0,1$) avec des concentrations en Ca variant de 6 à 8 mg/l, presque le double des concentrations de SO_4 .

b) Échantillon 12

Dans le cas de l'échantillon 12 injecté à l'eau à pH 4, les graphiques des divers paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH montrent un seul groupe d'eau avec des valeurs de pH entre 5,9 et 6,7. L'ion SO_4 ne montre pas de tendance bien définie en fonction du pH. Le Ca montre, par contre, une diminution de sa concentration en fonction du pH. La concentration de Ca varie de 6,7 à 11 mg/l alors que celle de SO_4 se situe entre 0 et 17 mg/l (figure 12.29; tableau 12.3). L'alcalinité subit une augmentation avec l'augmentation du pH. Le graphique de Ca en fonction de SO_4 (figure 12.30) ne montre pas de tendance bien nette entre ces deux éléments ($R=0,03$).

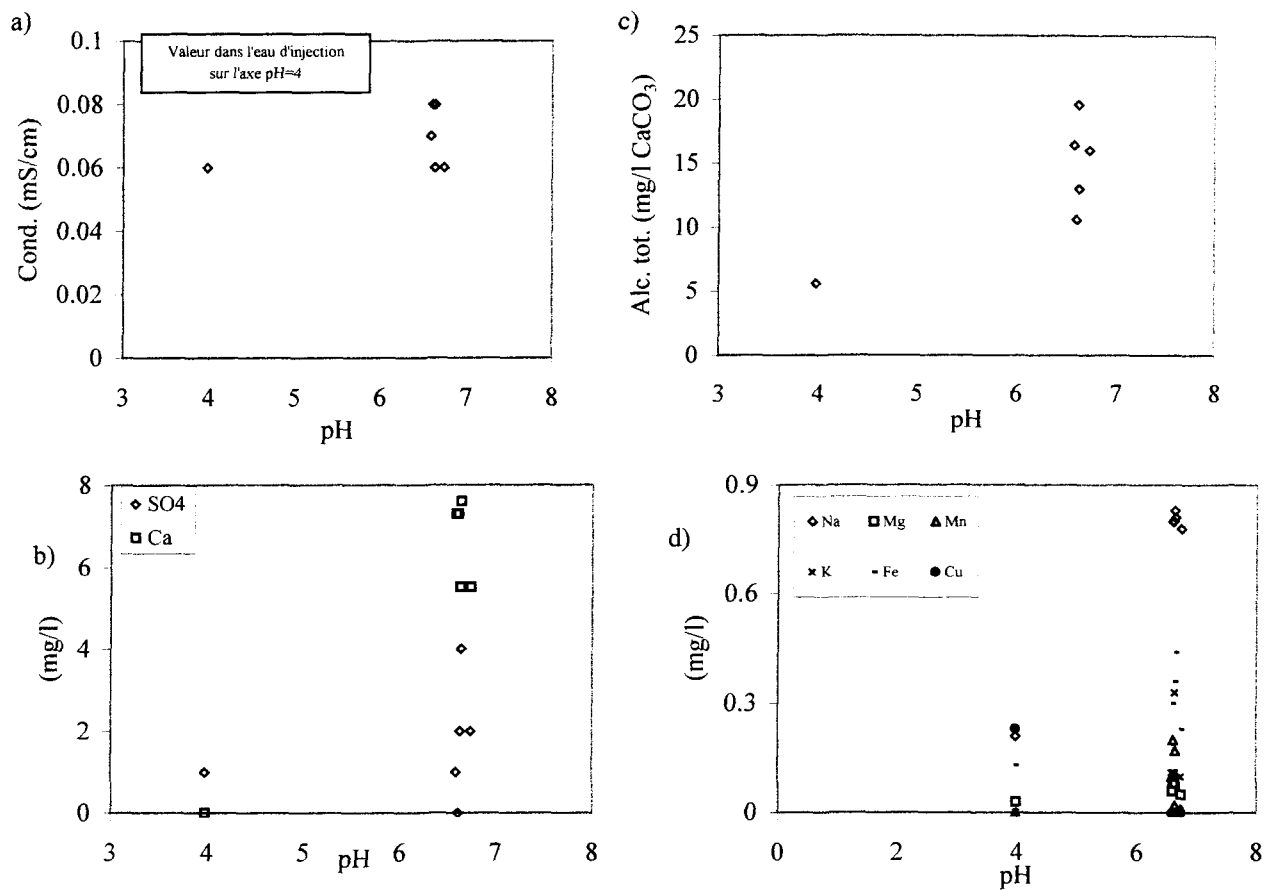


Figure 12.27: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 11 à pH 4; a) Conductivité électrique, b) Ca et SO₄, c) Alcalinité totale, d) Autres ions.

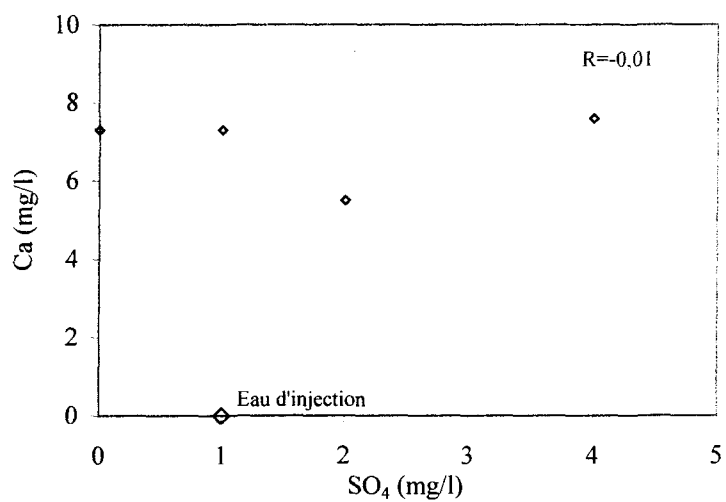


Figure 12.28: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 11 à pH 4.

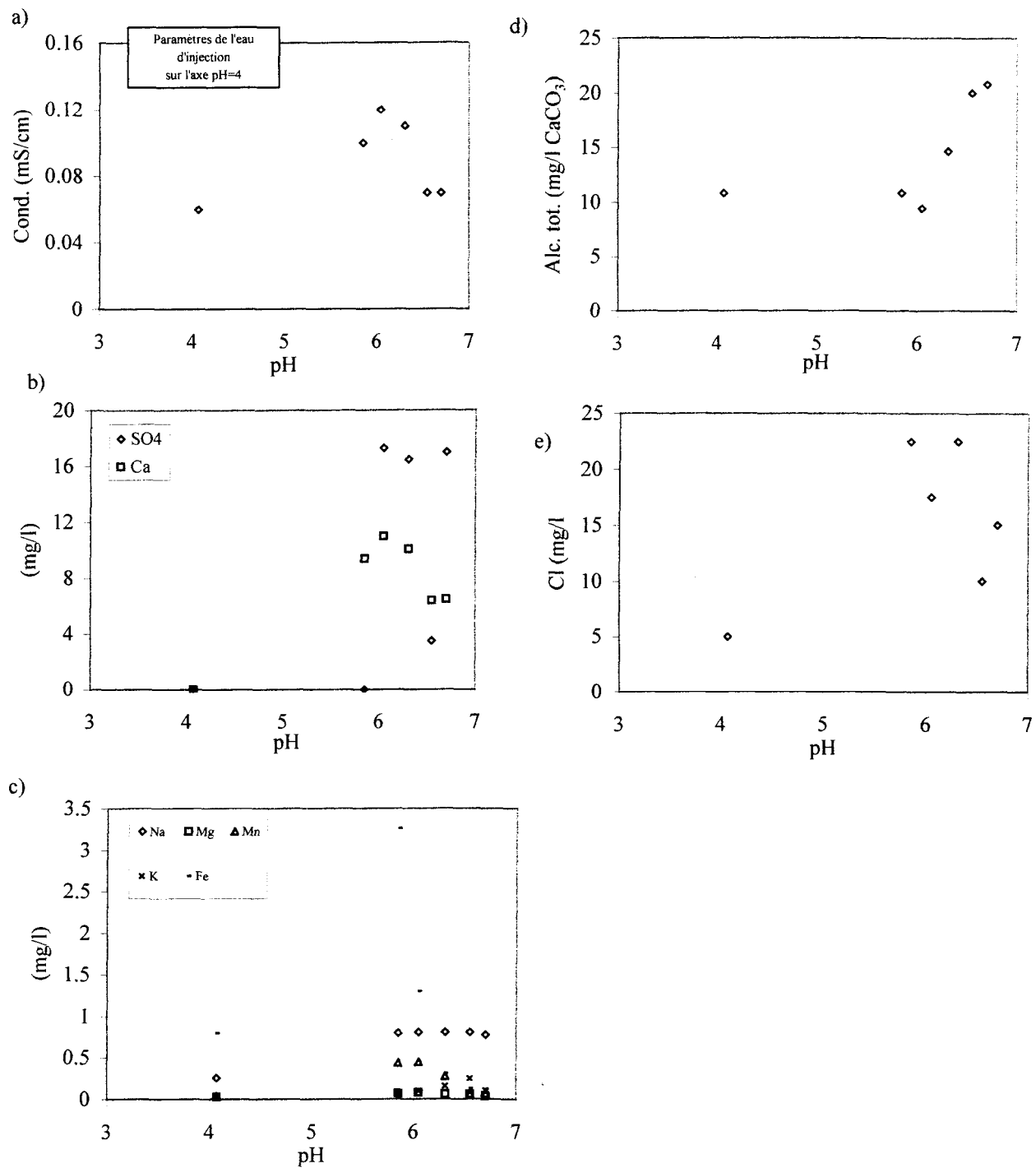


Figure 12.29: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 12 à pH 4; a) Conductivité électrique, b) Ca et SO₄, c) Autres ions, d) Alcalinité totale, e) Cl.

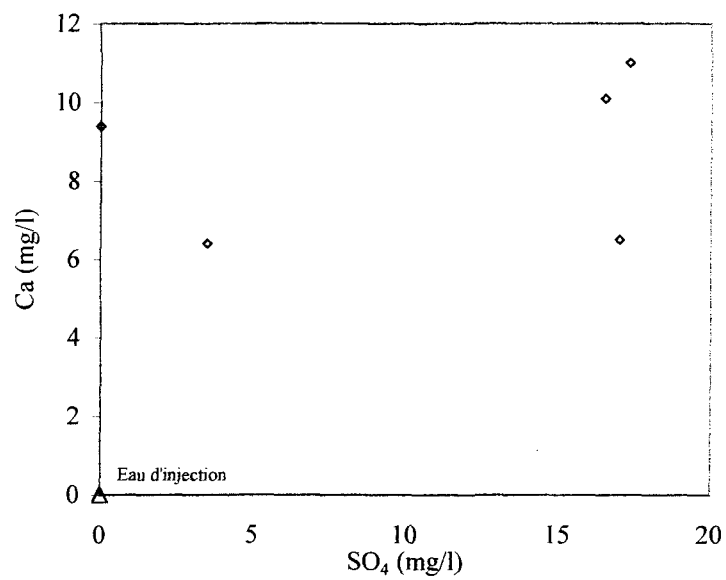


Figure 12.30: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 12 à pH 4.

c) Comparaisons des résultats des essais à pH 4

Dans les trois essais à pH 4, sur les échantillons 2, 11 et 12, on note la présence d'un seul groupe pour les eaux récupérées et à pH autour de 6. À l'exception de l'échantillon 11 qui montre une diminution de Ca avec l'augmentation du pH, le Ca avec le SO_4 ne montrent généralement pas de tendance ni entre eux ni avec le pH. La concentration des ions dans le cas de l'essai sur l'échantillon 2 est plus élevée que dans le cas des essais sur les échantillons 11 et 12, en particulier les ions SO_4 et Ca. La concentration de SO_4 est plus élevée que celle de Ca dans le cas des échantillons 2 et 12 alors qu'elle devient plus faible dans le cas de l'échantillon 11.

12.2.5 Essais d'injection à pH 7

a) Échantillon 13

Dans le cas de l'échantillon 13 injecté à l'eau à pH neutre, les graphiques des paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH montrent un seul groupe d'eau, à un pH neutre, entre 6,7 et 6,8, soit la même valeur que l'eau d'injection, mais dont la concentration en ions est légèrement plus élevée que celle de l'eau d'injection (figure 12.31). La concentration des ions dans les eaux récupérées reste faible ne dépassant pas 1 mg/l dans le cas de SO_4 et de Ca; on ne peut conclure sur une tendance entre ces deux éléments (figure 12.32).

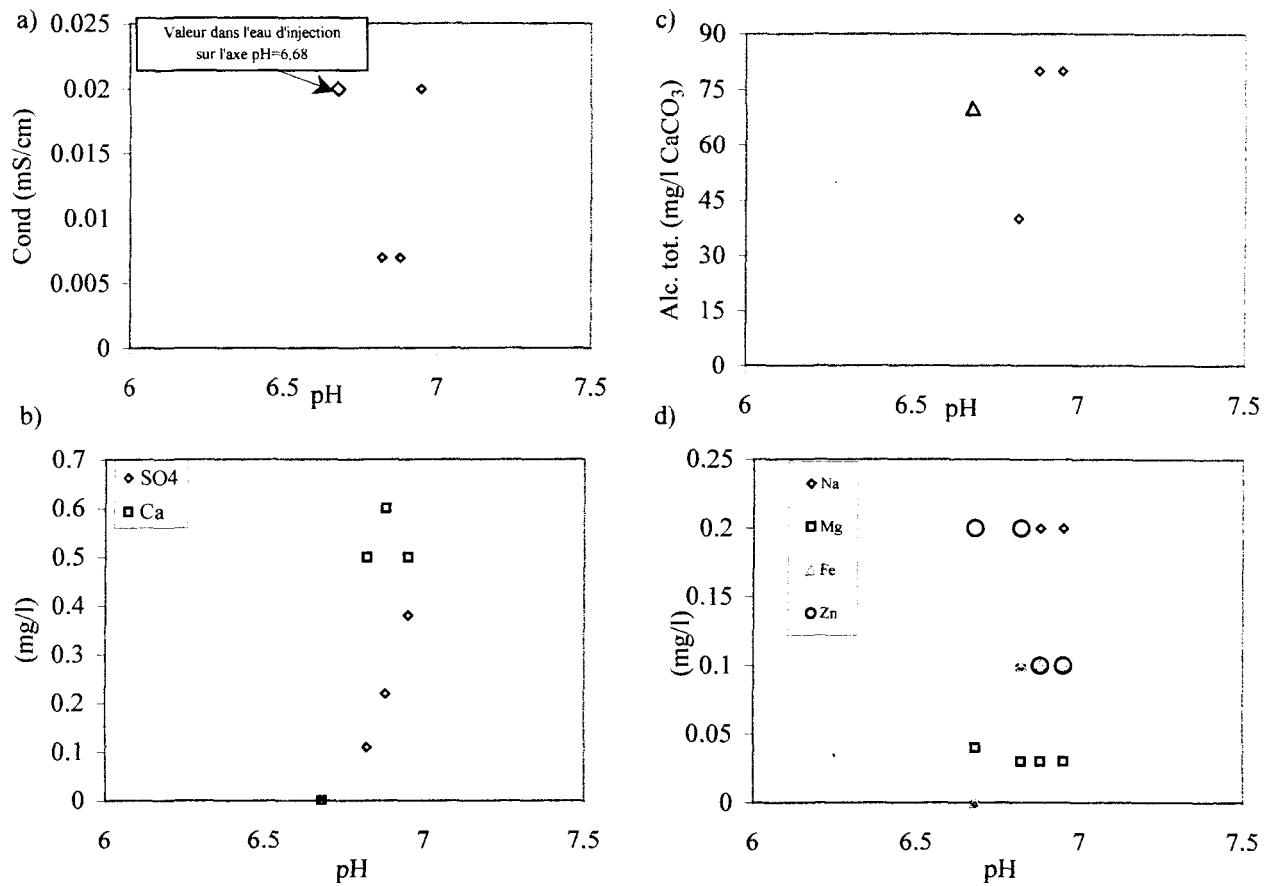


Figure 12.31: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 13 à pH 7; a) Conductivité électrique, b) Ca et SO_4 , c) Alcalinité totale, d) Autres ions.

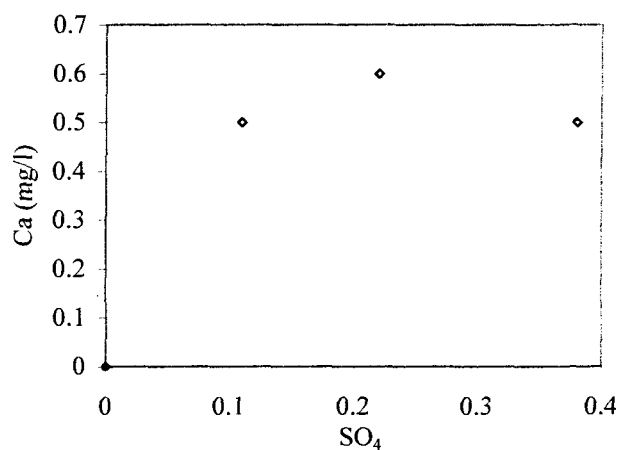


Figure 12.32: Concentration de Ca en fonction de celle de SO_4 pour l'échantillon 13 à pH 7.

b) Échantillon 14

Dans le cas de l'échantillon 14 injecté à l'eau à pH neutre, les graphiques des paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH montrent un seul groupe d'eau à pH neutre, avec des concentrations en ions atteignant les quelques mg/l (figure 12.33). Étant donné la très faible concentration en ions Ca et SO_4 , surtout en SO_4 , aucune tendance entre ces deux éléments ne peut être notée (figure 12.34).

c) Comparaisons des résultats des essais à pH 7

Dans les trois essais à pH 7 sur les échantillons 2, 13 et 14, les eaux récupérées forment un groupe à pH entre 6 et 7. La concentration en ions est faible à l'exception du cas de l'essai de l'échantillon 2, où la concentration des ions est très élevée et où une certaine tendance positive entre les ions Ca et SO_4 est observée.

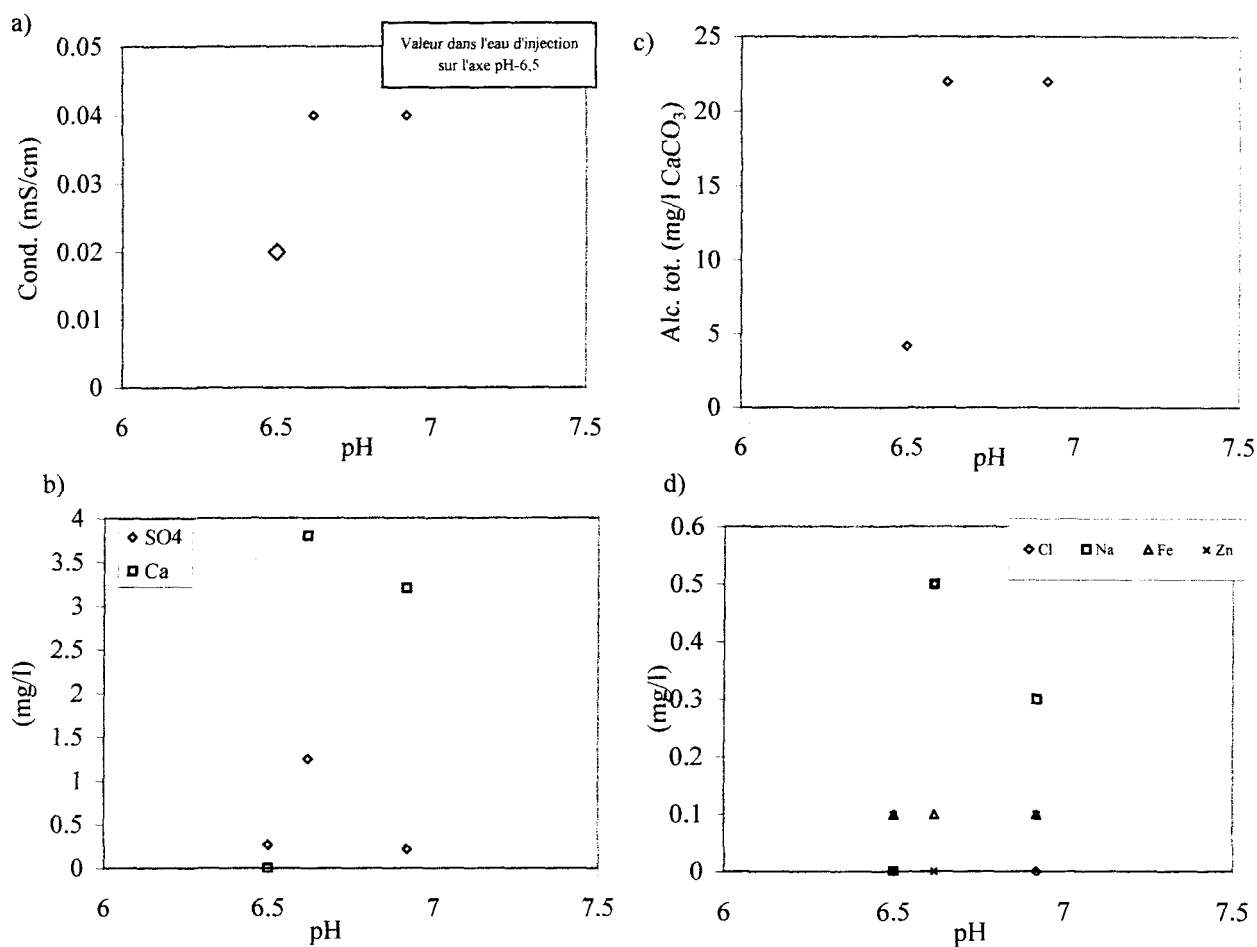


Figure 12.33: Paramètres physico-chimiques et chimiques en fonction du pH pour l'échantillon 14 à pH 7; a) Conductivité électrique, b) Ca et SO₄, c) Alcalinité totale, d) Autres ions.

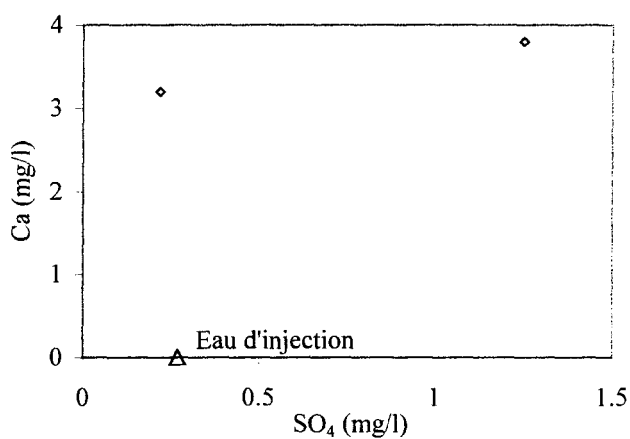


Figure 12.34: Concentration de Ca en fonction de celle de SO₄ pour l'échantillon 14 à pH 7.

13 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

L'interprétation des résultats des essais d'injection d'eau dans les fractures consiste en un premier temps à identifier les liens entre les résultats hydrauliques, les résultats géochimiques et les observations macroscopiques et microscopiques sur chaque échantillon. Par la suite, des tendances générales, pour chaque type d'essai, sont décrites.

L'interprétation des résultats géochimiques est réalisée à l'aide du programme PHREEQE (Parkhurst et al., 1993). Ce programme permet d'évaluer la tendance d'un certain nombre de minéraux à précipiter ou à se dissoudre, à partir de leur degré de saturation dans l'eau analysée. Les minéraux sélectionnés pour les interprétations dans notre cas sont ceux que le programme PHREEQE juge susceptibles d'entrer en jeu lors des réactions de dissolution ou de précipitation. Le programme calcule les indices de saturation des minéraux en se basant sur la concentration des ions mesurés dans l'eau et il indique les minéraux qui ont les indices les plus élevés. Dans le cas des minéraux à base de Fe, ils sont présentés par le programme PHREEQE sous forme d'oxydes. Dans les conditions de basse température, comme celles in situ à la mine et celles maintenues durant les essais expérimentaux (entre 8 et 13 °C), se sont plutôt les hydroxydes de fer qui peuvent précipiter.

Par définition, l'indice de saturation (I.S.) est l'état de saturation d'une solution par rapport à un minéral. Il est défini par la relation :

$$I.S. = \log \frac{PAI}{K}$$

où K est la constante d'équilibre de la réaction impliquant la dissolution d'un minéral, tel que la calcite, et PAI est le rapport des activités des produits et des réactifs lorsque la réaction générale n'a pas atteint l'équilibre (ou lorsque les conditions d'équilibre ne sont pas encore connues).

À l'équilibre, le I.S. est égal à 0; tandis qu'une valeur positive ou négative de I.S. indique une sursaturation ou une sous-saturation d'une solution par rapport à un minéral donné.

Étant donné que les processus impliquant la dissolution de la calcite dans les veines fracturées peuvent jouer un rôle important sur le comportement hydraulique des fractures, il est important d'estimer la cinétique de dissolution de la calcite. L'équation fondamentale la plus souvent utilisée pour le taux de dissolution de la calcite est celle mentionnée dans Sjöberg (1976); elle est définie par la formule :

$$R = \frac{dC_{Ca}}{dt}$$

où R est le taux de dissolution de la calcite ($\text{gl}^{-1}\text{h}^{-1}$), C_{Ca} est la concentration en Ca (g/l) et t est le temps (heures).

Deux autres paramètres importants peuvent jouer un rôle significatif dans la cinétique de dissolution de la calcite : le premier est la surface de contact de la calcite avec l'eau et le deuxième est le volume d'eau écoulé entre deux phases de récupération d'eau. La surface de contact de la calcite avec l'eau est considérée dans notre cas comme la surface de la fracture couverte d'une couche de calcite. La mesure de la surface de la fracture recouverte par de la calcite est obtenue d'une façon directe sur les photos des surfaces des fractures. Le résultat de l'estimation de la surface de contact de la calcite des deux parois avec l'eau est donné dans le tableau 13.1. Des erreurs peuvent affecter ce paramètre puisqu'une très fine couche de calcite sur les surfaces des fractures a été souvent négligée. De même, il est supposé que la calcite est le seul minéral présent dans la fracture. En tenant compte du volume d'eau écoulé entre deux phases de récupération d'eau à la sortie de la fracture, on fait référence au débit d'eau moyen durant cette même phase.

Tableau 13.1: Estimation de la superficie de la fracture recouverte par la calcite pour les échantillons testés.

Échantillon no.	Superficie totale de la fracture recouverte par la calcite (cm ²)
1	58,88
2	75,46
3	66,94
4	43,8
5	70,58
6	67,2
7	51,86
8	61,98
9	61,18
10	58,02
11	61,45
12	65,91
13	64,36
14	53,25

Une nouvelle équation du taux de dissolution de la calcite peut être ainsi définie par la formule :

$$R' = R/A = \frac{dC_{Ca}}{A dt} \quad (\text{gl}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1})$$

où A est la surface des deux parois de la fracture recouverte par de la calcite, en cm^2 .

L'ajout du paramètre du volume d'eau dans l'équation peut masquer les tendances du taux de dissolution de la calcite lorsqu'il est étudié en fonction du débit d'eau; c'est pour cette raison que le volume d'eau n'a pu être ajouté dans l'équation. Les graphiques du taux de dissolution par unité de surface en fonction du débit d'eau moyen permettront de déterminer les relations qui existent entre ces deux paramètres pour les différents types d'essais. À partir de la pente de l'alignement du nuage des points dans le graphique de R' en fonction du débit, une nouvelle équation du taux de dissolution de la calcite pourra être tirée. Pour la construction des graphiques, à chaque valeur de la concentration de Ca a été assignée une valeur moyenne de débit d'eau. La valeur du débit moyen est affectée à la fin de chaque intervalle étant donné que la durée de cet intervalle n'est pas constant pour un même essai. Le débit d'eau représente le volume d'eau écoulée divisé par l'intervalle de temps entre deux prélèvements de l'eau récupérée.

13.1 CAS DES ESSAIS MULTIPLES SUR UN MÊME ÉCHANTILLON

13.1.1 Échantillon 1

Dans le cas de l'échantillon 1, les résultats d'injection à l'eau à pH 2 montrent qu'il y a un apport des ions, tels que Ca, HCO₃ et CO₃ (alcalinité), Na, Mg, Mn, Sr, Cu et K dans l'eau durant l'essai (figure 11.2; tableau 12.2), provenant de la dissolution de minéraux de remplissage de la fracture et de la matrice rocheuse. Le Ca et les ions carbonates et bicarbonates sont les seuls éléments majeurs qui entrent dans l'eau. La gamme des concentrations de Ca varie entre 90 et 170 mg/l. Comme le témoigne la pétrographie en lame mince (annexe 9), ces ions majeurs proviennent de la dissolution de la calcite présente dans la fracture. Les photos des surfaces de la fracture après l'essai (annexe 5 – photos 1) témoignent de la formation de chenaux à certains endroits causée par la dissolution de la calcite. La sous-saturation des eaux en calcite lors de l'essai favorise la dissolution de la calcite présente dans la fracture (figure 13.1a). La valeur de I.S. de ces minéraux est plus proche de la saturation entre 0 et 50 heures d'essai, période où les concentrations en Ca les plus élevées dans l'eau ont été enregistrées.

La dissolution des cristaux de calcite s'accompagne d'une augmentation du pH, à partir de 2, la valeur au point d'injection, jusqu'à des valeurs proches de la neutralité (pH environ 6). La stabilisation du pH autour de 6 durant l'essai indique que les réactions de dissolution de la calcite se font proche de l'équilibre.

La concentration de SO_4 (figure 11.2e), par contre, subit généralement une diminution de sa valeur par rapport à celle au point d'injection lors de l'essai (1000 mg/l), avec une valeur minimale de 894 mg/l. Le SO_4 entrerait donc en phase de précipitation probablement sous forme de gypse, surtout entre 0 et 50 heures d'essai. Les valeurs de I.S. du gypse et de l'anhydrite sont en effet légèrement élevées surtout durant cette période initiale d'essai, ce qui suggère qu'une proportion de SO_4 est entrée en phase solide. Après les 50 premières heures d'essai, le sulfate retrouve sa concentration au point d'injection. La saturation générale des eaux en gypse et en anhydrite durant l'essai est due à la forte présence des ions sulfates dans l'eau d'injection, condition favorisant leur précipitation en ces minéraux secondaires.

Étant donné les quantités plus importantes de Ca libérées dans l'eau par rapport à celles de SO_4 qui précipitent, le processus de la dissolution de la calcite est donc prédominant par rapport à celui de la précipitation du gypse. Une proportion de Ca issue de la dissolution de la calcite entrerait en phase solide avec le SO_4 sous forme de gypse.

Les eaux sont sursaturées en hématite et en goéthite durant les 50 premières heures d'essai (figure 13.1c), ce qui favorise leur précipitation. À basse température, l'ion Fe précipite plutôt sous forme hydroxydes de fer. Des dépôts d'hydroxydes sont en effet observés sur les surfaces de la fracture après l'essai (annexe 5 – photos 1). Ces dépôts

d'hydroxydes témoignent aussi d'une libération préalable de métaux dans l'eau, tels que le Fe qui serait précipité en grande partie, d'où sa faible présence dans l'eau (figure 11.2f). Après les premières 50 heures d'essai, il y a diminution très rapide de la valeur de I.S. de ces minéraux de fer, en dessous du seuil de saturation, résultant de la diminution de la concentration de Fe. L'origine du Fe et des autres métaux (Zn et Cu) peut être une oxydation des minéraux sulfurés présents surtout dans la matrice rocheuse. Le Mn, Mg et Sr proviendraient des carbonates.

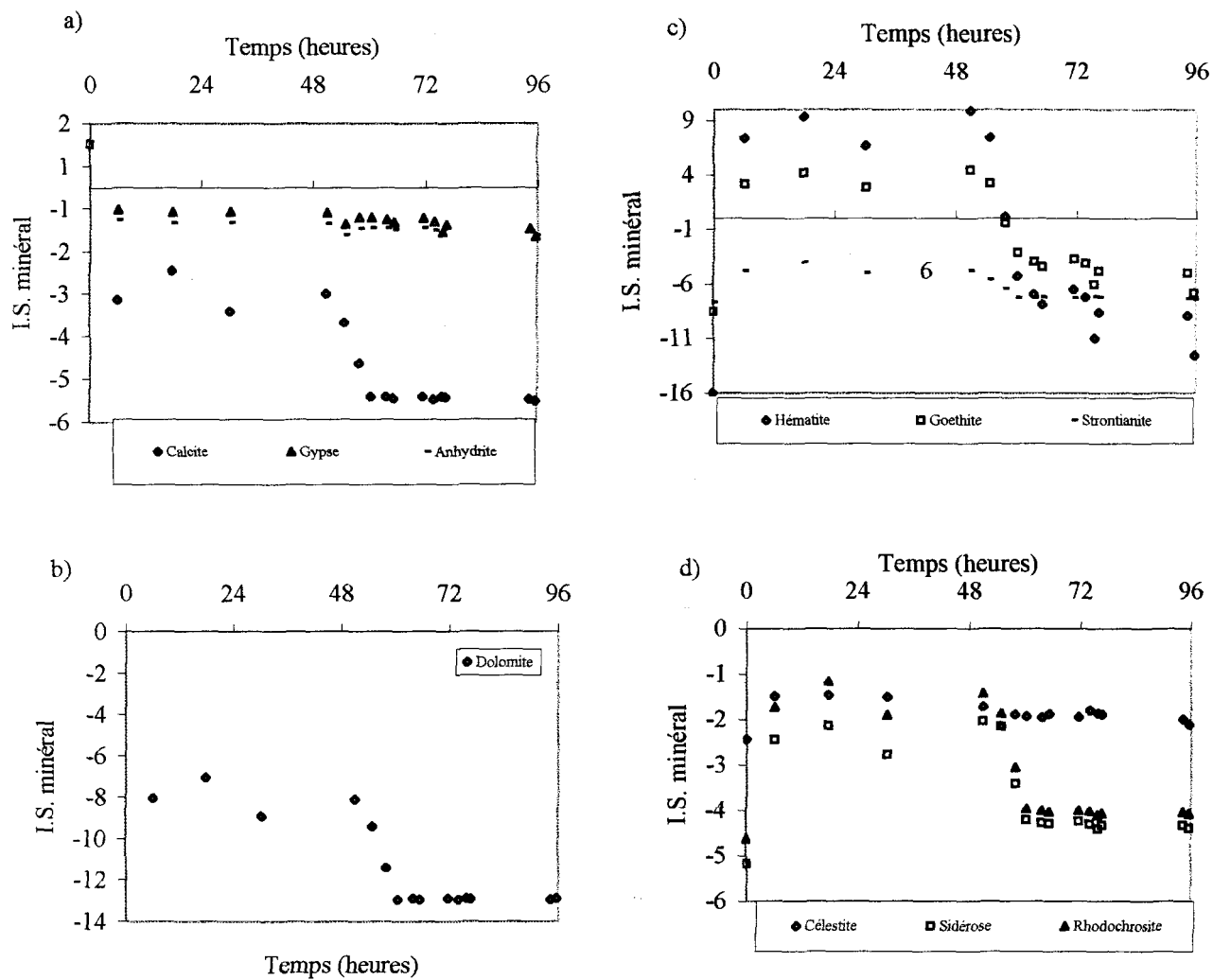


Figure 13.1: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 1 à pH 2.

Les eaux sont par contre sous-saturées en dolomite, en sidérose et en rhodochrosite, avec des indices de saturation plus bas que -1 et presque stable durant les 50 premières heures d'essai; par la suite, ces indices de saturation diminuent rapidement pour se stabiliser à des valeurs beaucoup plus faibles.

Les comportements hydraulique et géochimique de l'échantillon 1 laissent supposer une corrélation entre le débit d'eau (ou la transmissivité de la fracture) et les paramètres physico-chimiques, et que d'importantes interactions entre les deux types de processus se passent durant l'essai. En effet, l'augmentation du pH et de la concentration en ions dans les eaux récupérées, entre 0 et 50 heures d'essai, correspond à des débits d'eau compris entre 2 et 9 ml/h, et à une gamme de transmissivité de la fracture allant de 6×10^{-11} à $2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$; alors que la diminution du pH et de la concentration des ions après cette période correspond à des valeurs de débit d'eau plus grandes entre 15 et 50 ml/h, et à des valeurs de transmissivité plus élevées entre $1,3 \times 10^{-10}$ et $4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ (figures 11.1 et 11.2; tableau 12.1).

L'indice de saturation des minéraux étudiés est généralement plus élevé pour les valeurs de débits (et de transmissivité) plus faibles, entre 2 et 9 ml/h, durant les 50 premières heures d'essai. Cet indice diminue après cette période, correspondant à une gamme des valeurs de débit plus élevées (figures 11.1 et 13.1).

Les graphiques de la concentration de Ca en fonction du débit moyen (défini comme étant le volume d'eau écoulée divisé par la durée de la récupération d'eau à la sortie de la fracture) et en fonction de la transmissivité moyenne, montrent en effet des corrélations négatives ($R=-0,74$) pour des gammes de débit et de transmissivité variant de 2 à 30 ml/h et de $0,5 \times 10^{-10}$ et $8,5 \times 10^{-10}$ m²/s respectivement (figure 13.2). Le SO₄ montre, cependant, une faible corrélation positive ($R=0,45$) avec le débit moyen et la transmissivité (figure 13.2).

Les graphiques du taux de dissolution de la calcite par unité de surface ($R'=R/A$) et du débit moyen en fonction du temps montrent bien l'interaction qui existe entre R' et le débit (figure 13.3). Dans les 50 premières heures, il y a une diminution de R' de $0,47 \times 10^{-3}$ à $0,12 \times 10^{-3}$ gl⁻¹cm⁻²h⁻¹, pour une faible diminution du débit d'eau moyen de 5,7 à 5,3 ml/h. Après cette période d'essai, il y a augmentation de ce taux R' de $0,12 \times 10^{-3}$ à $2,7 \times 10^{-3}$ gl⁻¹cm⁻²h⁻¹, en suivant l'augmentation du débit moyen de 5,3 à 38 ml/h. Le graphique de R' en fonction du débit moyen montre une faible corrélation positive ($R=0,4$) entre ces deux paramètres; l'équation de la droite de R' en fonction du débit (Q) est $R' = 0,025 \times Q$ (gl⁻²cm⁻²) pour l'intervalle de débit entre 5,3 et 34 ml/h (R' étant nul à l'instant zéro).

Puisque la pression d'injection a été variée durant le même essai sur l'échantillon 1, on peut comparer entre eux les résultats hydrauliques obtenus sous différents niveaux de

pression. Sous un même confinement, l'augmentation de la pression d'injection d'eau (ou l'augmentation du rapport P_i/P_c) entraîne une augmentation du débit d'eau (tableau 12.1). Cette augmentation du débit permet aussi une augmentation de la transmissivité de la fracture; ceci malgré l'augmentation de la pression d'injection (Δh dans l'équation de la transmissivité) (tableau 12.1). La faible corrélation entre le taux de dissolution par unité de surface avec le débit ($R=0,4$) est probablement due à l'augmentation induite de ce débit à la suite des augmentations de la pression d'injection d'eau; l'effet des processus chimiques (réaction de dissolution de la calcite) sur l'augmentation de ce débit était moins important.

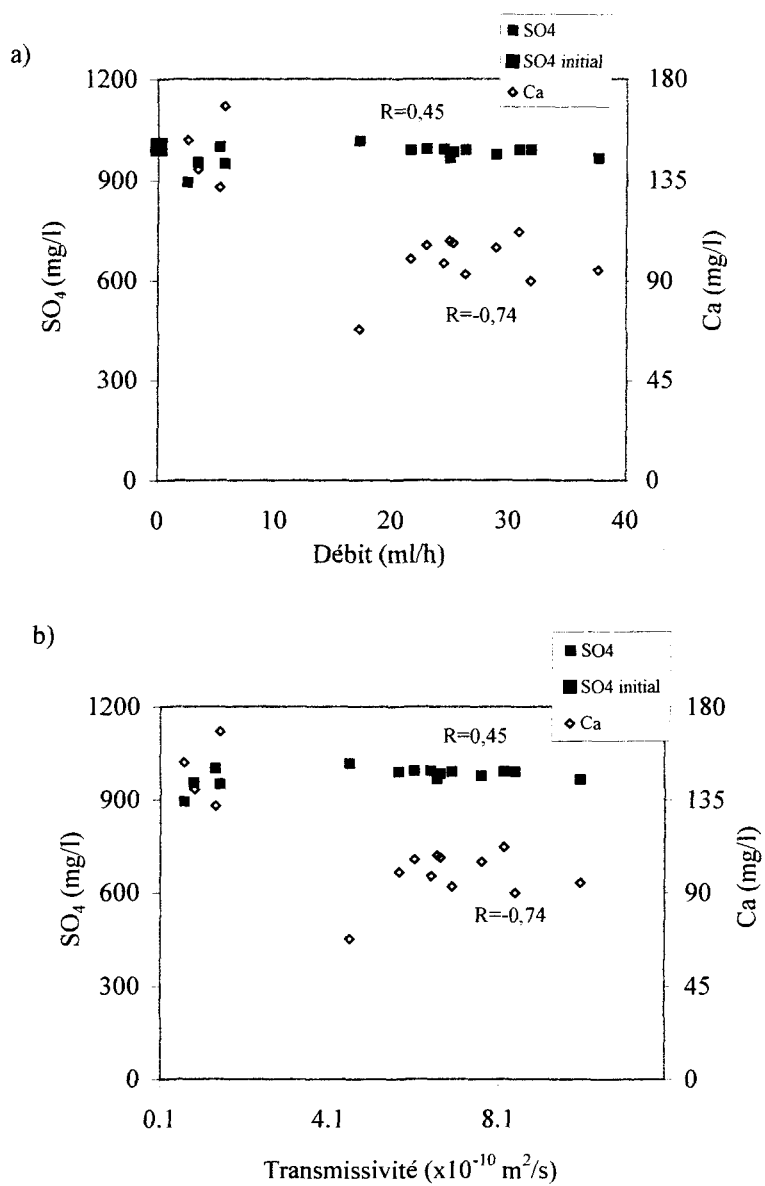


Figure 13.2: Ca et SO₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 1 à pH 2.

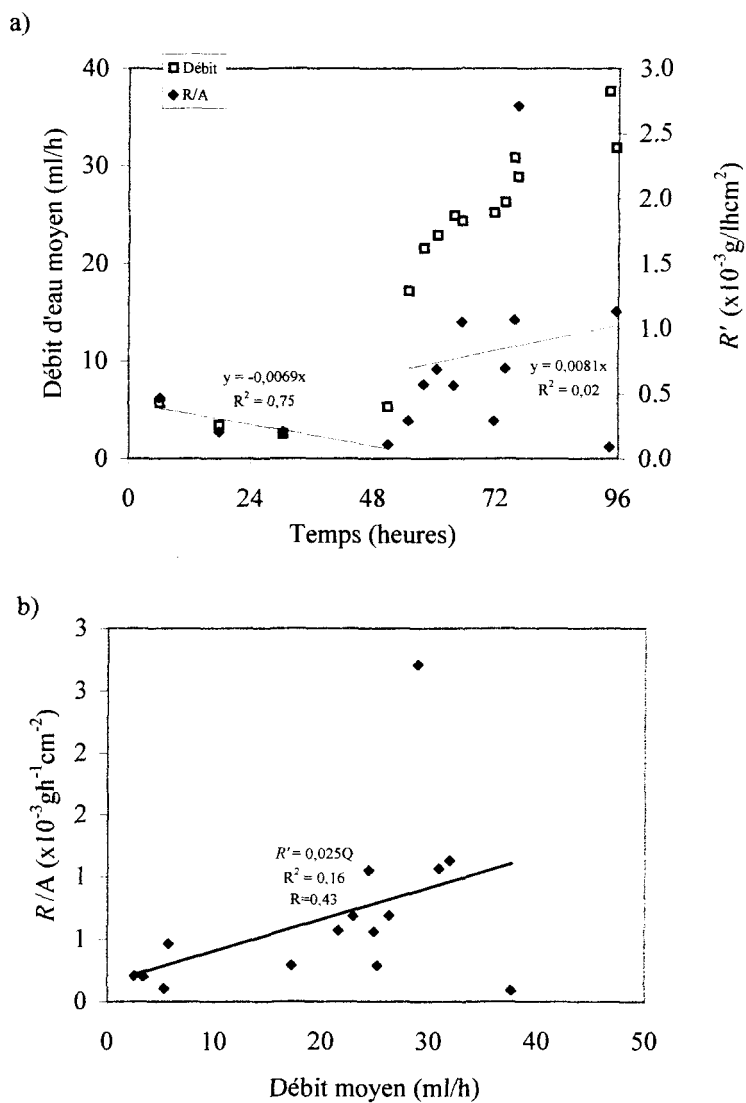


Figure 13.3: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' (R/A), en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit moyen (b) pour l'échantillon 1 à pH 2.

13.1.2 Échantillon 2

a) L'injection à pH 7

Dans le cas de l'échantillon 2 injecté à l'eau à pH 7, l'augmentation de la concentration de Ca jusqu'à 60 mg/l (figure 11.6b et tableau 12.4) témoigne de la présence d'importantes réactions de dissolution de la calcite dans la fracture, même sous un pH neutre (annexe 5 - photos 2 et annexe 9 – photos 17 et 18). Cette dissolution s'effectue à une valeur de pH proche de la neutralité (pH autour de 6), non loin de la valeur au point d'injection. L'indice de saturation en calcite en dessous de la saturation (figure 13.4a) montre que les conditions de la dissolution de la calcite sont toujours favorisées.

La concentration de SO_4 est, par contre, un peu plus élevée que celle de Ca et atteint 93 mg/l (figure 11.6b, tableau 12.4). Puisque l'eau d'injection contient très peu de SO_4 , l'augmentation de la concentration en cet ion durant l'essai serait due à une importante réaction d'oxydation des minéraux sulfurés abondamment présents dans la matrice rocheuse, tels que la pyrite. L'indice de saturation en gypse et en anhydrite est en dessous de la saturation, ce qui ne favorise pas leur précipitation (figure 13.4b). Le Fe subit une légère augmentation, ce qui supporte l'hypothèse de l'oxydation des sulfures. Bien que des hydroxydes ont pu être déposés sur les surfaces de la fracture de l'échantillon 2 lors des essais subséquents à pH 4 et à pH 2, l'indice de saturation en goethite et en hématite qui est

au-dessus de la saturation est en faveur de la précipitation de Fe également lors de l'essai à pH 7.

D'autres éléments mineurs, tels que Na et Sr, subissent aussi une augmentation de leur concentration sans dépasser les 1 mg/l durant l'essai (figure 11.6c). Le Na proviendrait de la dissolution des feldspaths présents dans la matrice rocheuse, alors que Sr proviendrait de la dissolution des minéraux carbonatés accessoires, tels que la strontianite (SrCO_3). La dissolution de ce type de carbonate contribuerait à un apport de plus d'ions carbonatés et bicarbonatés dans l'eau, et, par conséquent, influencerait la corrélation qui existe entre l'alcalinité et l'ion Ca. La faible corrélation entre l'alcalinité et Ca peut être aussi due aux erreurs analytiques, surtout celles impliquées dans la mesure de l'alcalinité, car ce paramètre est moins stable en fonction du temps.

Il semble exister une relation entre le débit d'eau et la transmissivité de la fracture d'une part, et la chimie des eaux récupérées à la sortie de la fracture d'autre part. En effet, la concentration en ions est plus faible durant les 8 premières heures de l'essai, correspondant à des valeurs de débit et de transmissivité plus élevées, entre 40 et 150 ml/h et entre 1×10^{-9} et 4×10^{-9} m²/s respectivement (figure 11.3 et figure 11.5). Après ces 8 premières heures d'essai, les concentrations en ions sont plus élevées et les valeurs de débit et de transmissivité sont plus faibles, entre 8 et 40 ml/h et entre 1×10^{-9} et 5×10^{-10} m²/s respectivement. L'augmentation continue de la concentration des ions, tels que le Ca,

malgré la diminution de la transmissivité de la fracture avec le temps durant l'essai, implique que les réactions chimiques (de dissolution et d'oxydation) entre l'eau et les minéraux de la fracture demeurent loin de l'équilibre et de la saturation, ce qui favorise toujours la libération de ces ions.

Les corrélations de Ca et de SO₄ avec le débit d'eau et la transmissivité montrent des fortes corrélations négatives ($R=-0,96$ pour Ca et $R=-0,99$ pour SO₄) indiquant une diminution de la concentration de Ca et de SO₄ avec l'augmentation du débit et de la transmissivité de la fracture, lesquels varient de 10 à 84 ml/h et de $2,9 \times 10^{-10}$ à $2,3 \times 10^{-9}$ m²/s respectivement (figure 13.5).

Le taux calculé de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , subit une diminution en fonction du temps durant l'essai en suivant la diminution du débit (figure 13.6a). Les deux prélèvements d'eaux effectués durant les 8 premières heures d'essai montrent cependant un taux R' généralement plus faible que les eaux récupérées après cette période. Ce faible taux de dissolution au départ serait dû aux conditions de non saturation de la fracture : l'eau entrant dans la fracture circulerait sur une surface plus petite et entraînant donc moins de réaction chimique avec les minéraux. La droite de régression du taux de dissolution en fonction du temps suit une pente de $-0,001 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-2}$. Les valeurs de ce taux de dissolution varient entre $0,064 \times 10^{-3}$ et $0,16 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$. Le graphique de R' en fonction du débit montre deux types d'évolution (figure 13.6b): pour un

débit entre 11 et 44 ml/h, on observe une forte corrélation positive ($R=0,98$) entre R' et le débit, formant une droite de pente $0,0028 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$, alors qu'entre 54 et 80 ml/h, la pente du taux de dissolution R' en fonction du débit est négative ($R=0,64$) et elle est de $-0,0012 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. Rappelons que cette corrélation négative entre le débit et le taux de dissolution apparaît au début de l'essai, due probablement à la non-saturation de l'échantillon.

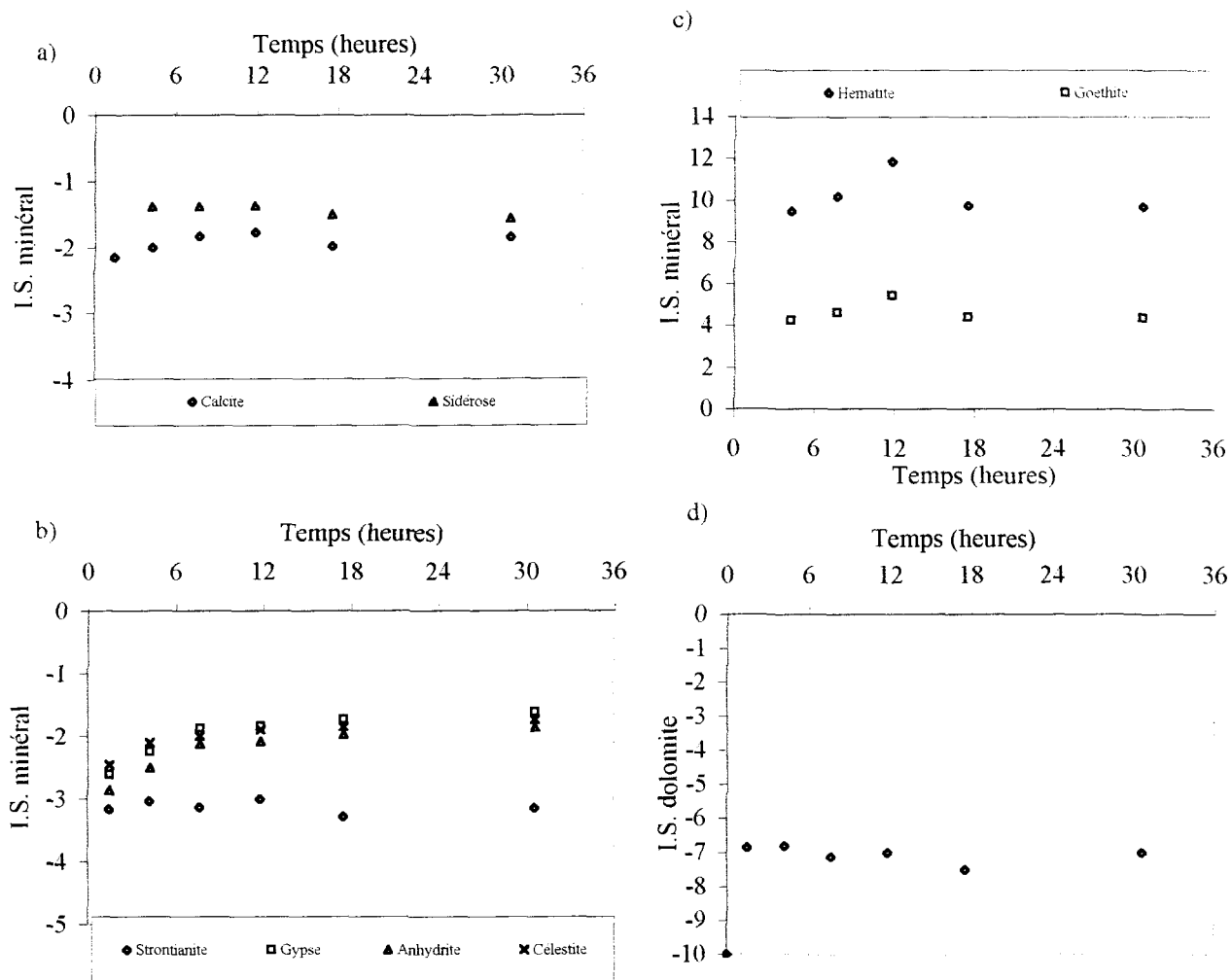


Figure 13.4: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 7.

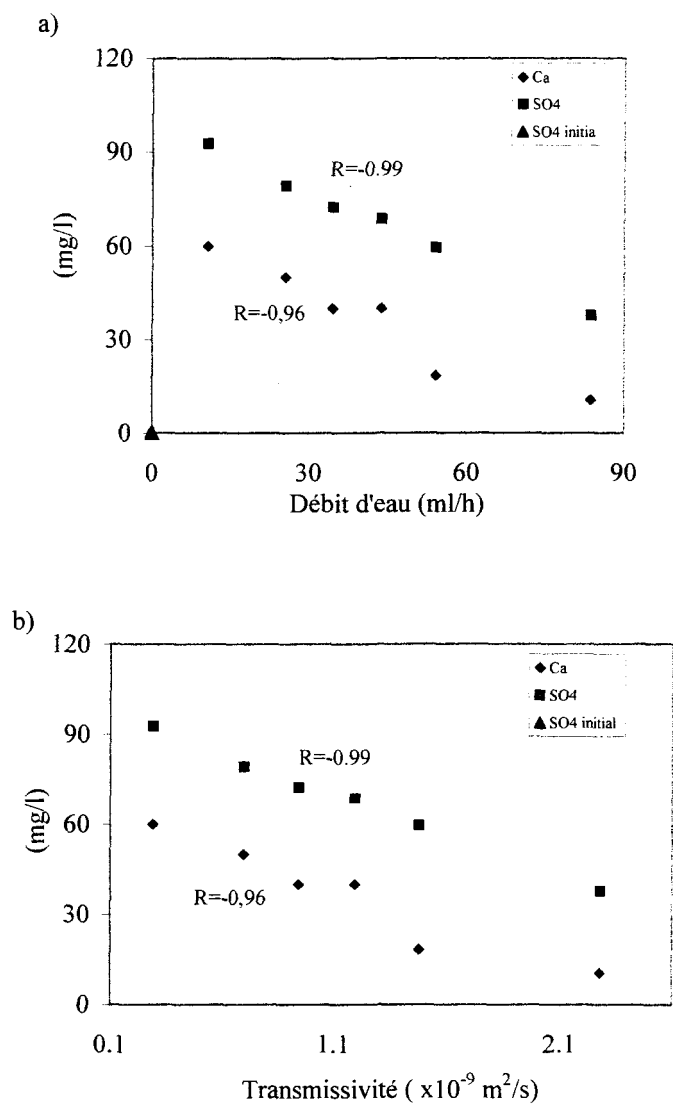


Figure 13.5: Ca et SO_4 en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 2 à pH 7.

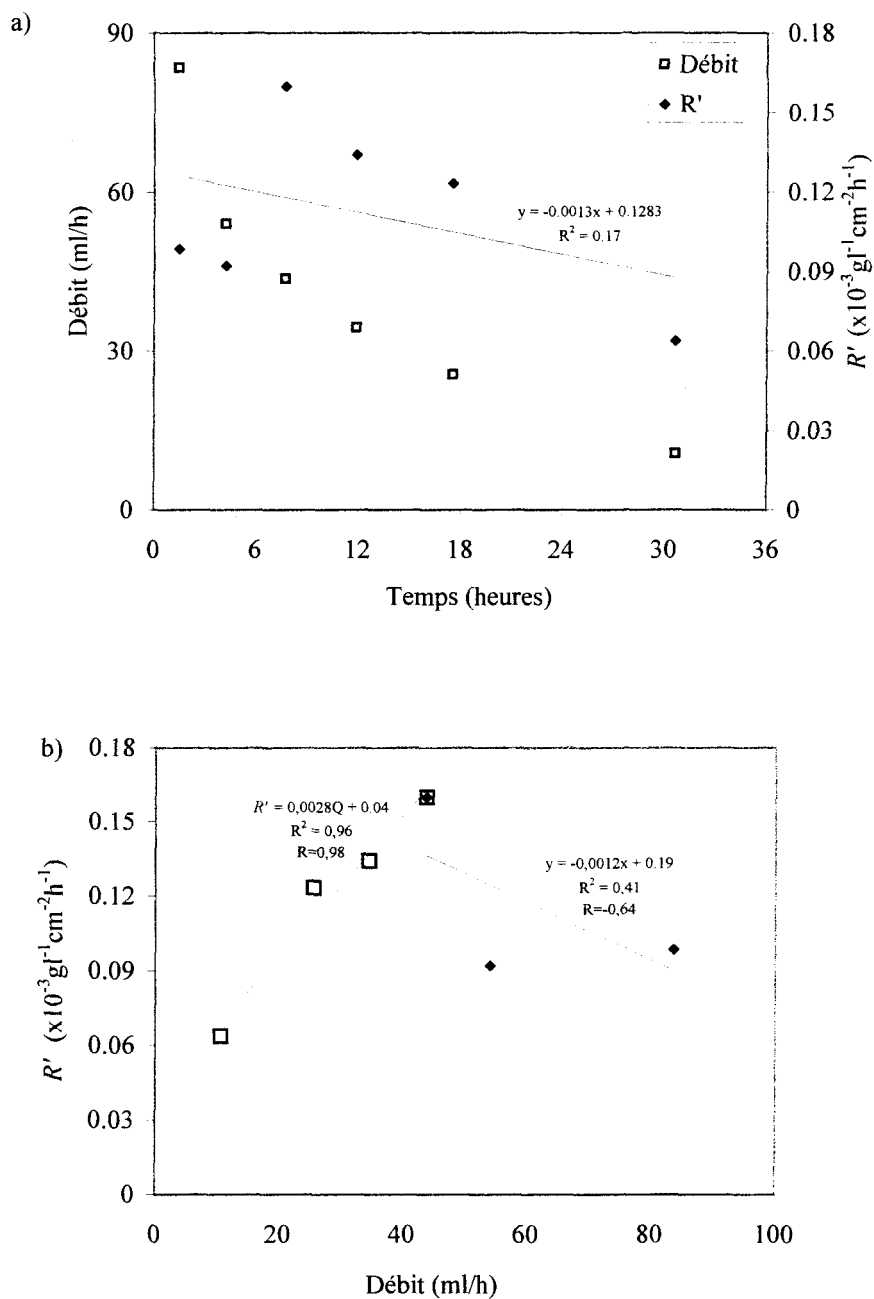


Figure 13.6: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 2 à pH 7.

b) L'injection à pH 4

Dans le cas de l'essai à pH 4 sur l'échantillon 2, la présence de Ca, dont la concentration varie entre 70 et 120 mg/l dans l'eau (figure 11.7a), est le résultat de la dissolution de la calcite présente dans la fracture (annexe 5 - photos 2 et annexe 9 – photos 17 et 18). Les eaux récupérées durant l'essai montrent une sous-saturation en calcite (figure 13.7a); leur indice de saturation augmente en fonction du temps tout en restant en dessous du seuil de la saturation. Ces conditions sont en faveur de la dissolution continue de la calcite dans la fracture. En effet, la stabilisation du pH autour de 6, et donc proche de l'équilibre le long de l'essai, témoigne de cette dissolution continue de la calcite.

Dans le cas de SO_4 , il subit une augmentation importante de 0,6 à 368 mg/l. Le SO_4 proviendrait de l'oxydation des minéraux sulfurés présents dans la matrice. Cependant on ne remarque pas d'augmentation remarquable de la concentration des métaux, à comparer à celle de SO_4 , pour confirmer cette hypothèse (figure 11.7c). Le dépôt d'hydroxydes sur les surfaces de la fracture peut s'être formé lors de l'essai à pH 4 comme aussi lors des autres essais, en particulier lors de l'essai à pH 2 (annexe 5 - photos 2). L'indice de saturation en goethite et en hématite, qui est au-dessus de la saturation, est en faveur de la précipitation des hydroxydes durant l'injection à pH 4; par conséquent, il appuie l'hypothèse émise quant à l'origine de SO_4 .

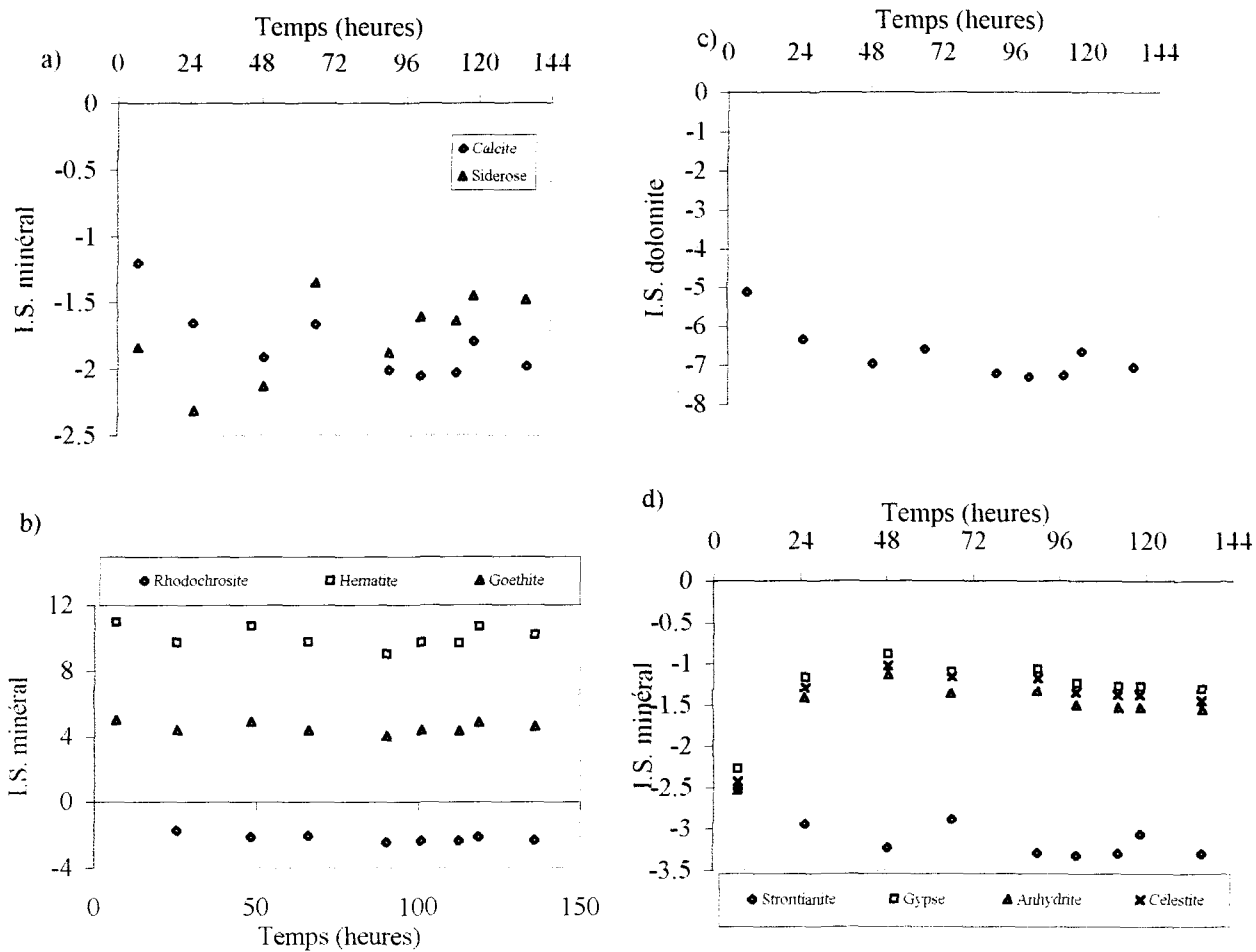


Figure 13.7: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 4.

Les valeurs de I.S. des autres minéraux (figure 13.7), tels que celui du gypse, de la sidérose et de la rhodochrosite, sont en-dessous du seuil de la saturation ne favorisant pas leur précipitation. Les métaux mineurs proviendraient de l'oxydation des minéraux sulfurés et/ou des feldspaths présents dans la matrice rocheuse.

En tenant compte des résultats hydrauliques, on remarque qu'entre 24 et 80 heures, la gamme des débits enregistrée est la plus basse, entre 3 et 7 ml/h, mais la concentration générale des ions n'est pas toujours la plus élevée, par rapport aux autres périodes de l'essai (figure 11.7). Les graphiques de corrélation de la concentration de Ca et de SO_4 en fonction du débit et de la transmissivité montrent des faibles corrélations négatives surtout dans le cas de Ca ($R=-0,42$); le SO_4 a une corrélation un peu plus marquée avec les paramètres hydrauliques ($R=-0,57$) (figure 13.8). Cette faible corrélation en fonction du débit (et de la transmissivité), surtout dans le cas de Ca, serait due à l'augmentation du rapport P_i/P_c à plusieurs reprises durant l'essai. La variation du débit et de la transmissivité durant l'essai est en grande partie due à la variation imposée de la pression d'injection.

Le taux calculé de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , varie en fonction du temps en suivant la variation du débit durant les 80 premières heures d'essai; après cette période, la variation de ce taux ne suit pas toujours celle du débit en fonction du temps. L'importante augmentation de la pression d'injection d'eau, de 0,55 à 1,24 MPa après 80

heures d'essai, serait la cause de ce changement de tendance entre R' et le débit (figures 13.9a). Il en résulte une faible corrélation ($R=0,4$) entre le taux de dissolution de la calcite par unité de surface et le débit (figures 13.9b). La pente de la droite de régression du taux de dissolution en fonction du débit est de $0,012 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ ($R=0,4$) pour une gamme de débits allant 4,2 à 9 ml/h. La gamme des valeurs du taux de dissolution générées durant cet essai va de $0,052 \times 10^{-3}$ à $0,144 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$.

La diminution de la transmissivité de la fracture durant l'essai est probablement due aux phénomènes de dissolution de la calcite superficielle localisés autour des points de contact entre les parois de la fracture en combinaison avec le dépôt d'hydroxydes, entraînant une diminution de l'espace des vides dans cette fracture avec le temps.

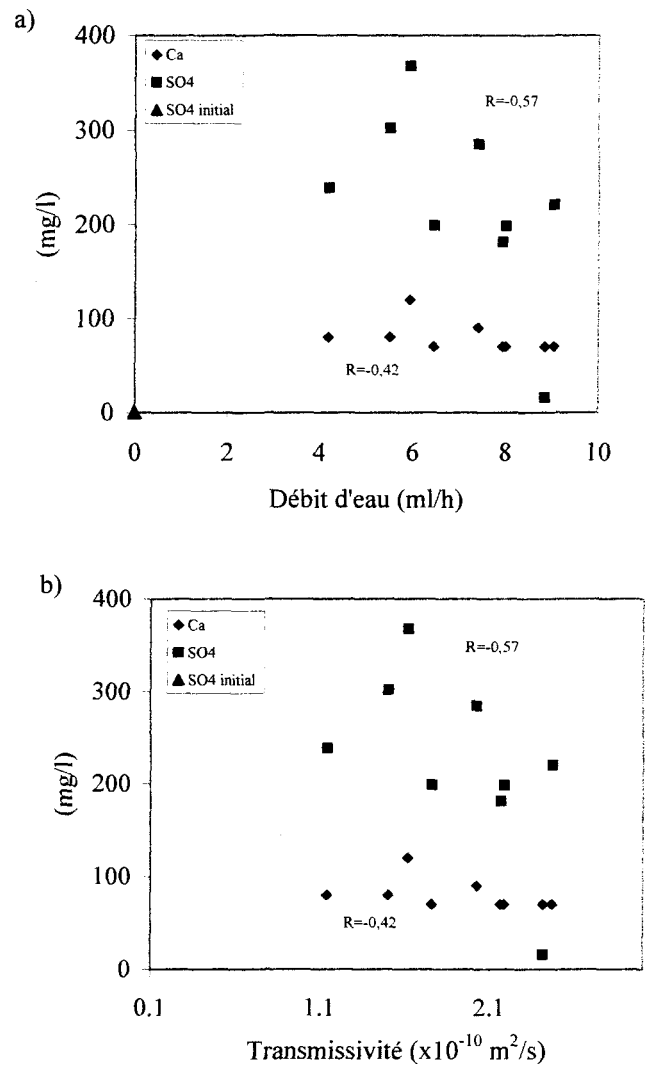


Figure 13.8: Ca et SO_4 en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 2 à pH 4.

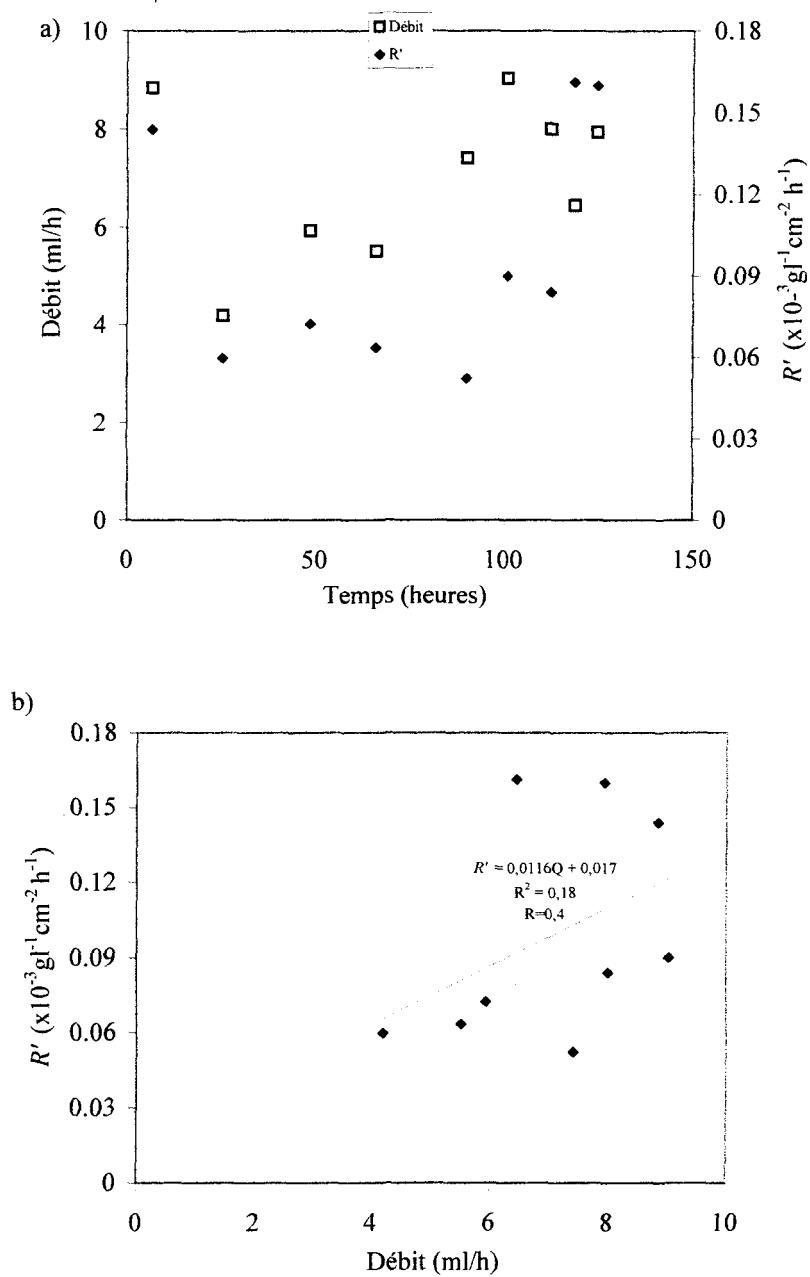


Figure 13.9: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a); et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 2 à pH 4.

c) L'injection à pH 2

Les résultats de l'état de saturation des eaux par rapport aux minéraux susceptibles de jouer un rôle dans les réactions chimiques, pour l'échantillon 2 injecté à l'eau à pH 2, sont présentés en fonction du temps dans la figure 13.10. Dans le cas de la calcite, l'indice de saturation (I.S.) augmente à des valeurs proches de -1, entre 0 et 6 heures d'essai, sans atteindre la saturation ce qui favoriserait sa dissolution et la libération de Ca et des ions carbonatés. En effet, durant cette période la concentration de Ca est la plus élevée et atteint 410 mg/l (figure 11.8b). Le large chenal créé dans la fracture (Annexe 5 – photos 2) est une évidence de la dissolution de la calcite. Les conditions favorables à la dissolution de la calcite permettent de maintenir le pH proche de la neutralité durant cette période d'essai. Après les 6 premières heures d'essai, la valeur de I.S. diminue plus bas que -1,4 due à une diminution de la quantité de Ca qui entre dans l'eau.

L'importante augmentation de Zn et de Fe (figure 11.8c) serait due à une oxydation de minéraux sulfurés présents dans la matrice rocheuse. Des dépôts d'hydroxydes de couleur brunâtre sont aussi remarqués sur les deux parois de la fracture après l'essai (Annexe 5 – photos 2). La sursaturation en goethite, en hématite et en sidérose, entre 0 et 6 heures d'essai, est en faveur de leur précipitation durant cette période (figure 13.10b et c). L'indice de saturation de la rhodochrosite suit une évolution à peu près semblable à celle de la sidérose mais avec des valeurs un peu plus faibles.

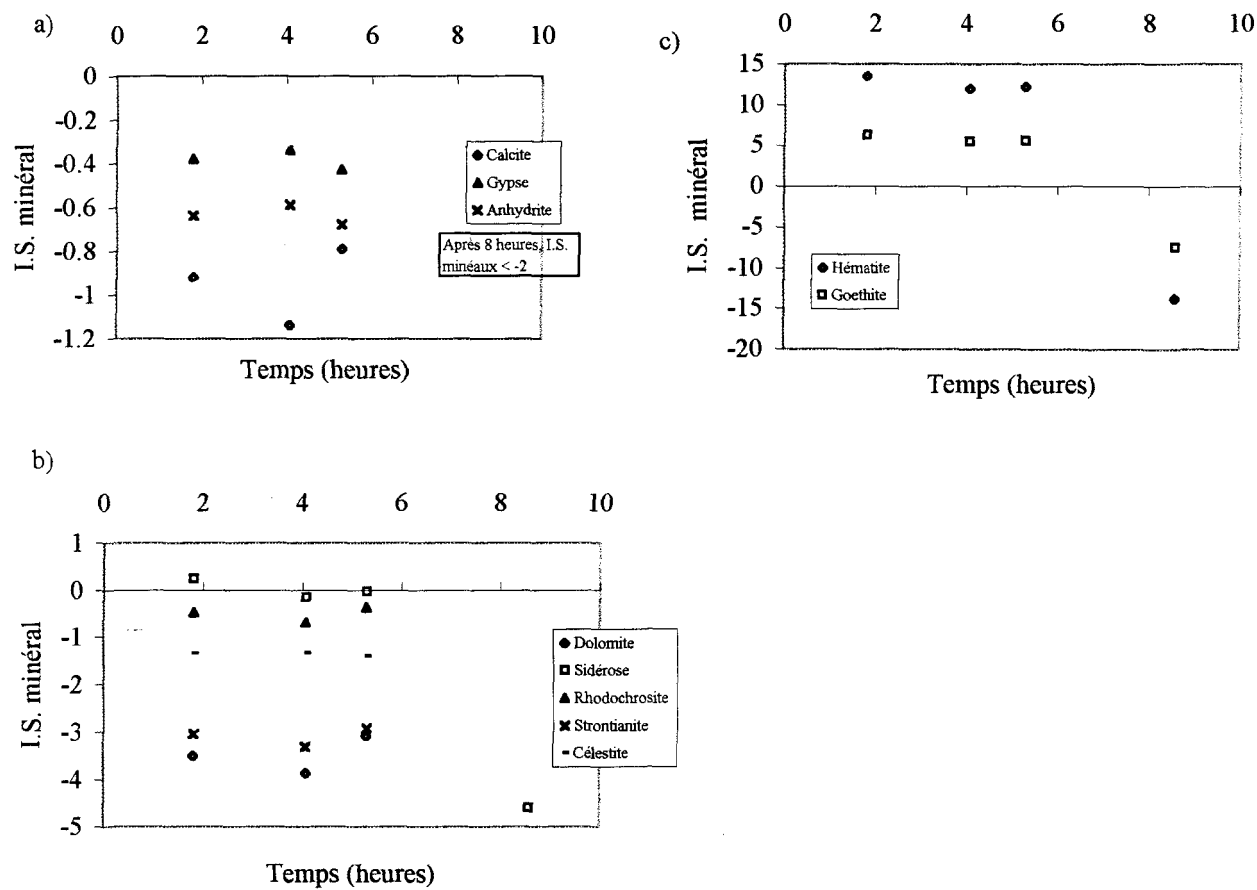


Figure 13.10: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 2 à pH 2.

Toutefois, puisque l'augmentation de SO_4 (figure 11.8b), qui serait issue de l'oxydation des minéraux sulfurés, n'est pas détectée entre 0 et 6 heures d'essai (il y a plutôt une diminution de SO_4 de sa valeur au point d'injection, 945 mg/l, jusqu'à environ 583 mg/l durant l'essai), il est probable que cet ion ait précipité sous forme de minéraux secondaires, tels que le gypse. En effet, l'indice de saturation de ce minéral n'est pas loin de la saturation, et est compatible avec sa précipitation durant la même période d'essai. Avec des valeurs de I.S. un peu plus faible que celles du gypse, l'anhydrite peut aussi être déposée durant cette période d'essai.

La concentration des éléments chimiques, tels que le Ca, Fe, Zn, K et l'alcalinité, et le pH, augmente dans les eaux récupérées entre 0 et 6 heures d'essai (figure 11.8), correspondant à une gamme de débit et de transmissivité allant de 40 à 150 ml/h, et de 5×10^{-10} à 4×10^{-9} m²/s respectivement (figure 11.5). Après cet intervalle d'essai, la concentration de ces ions et le pH diminuent à la suite de l'augmentation rapide et spontanée du débit d'eau et de la transmissivité, dépassant les 1000 ml/h et 1×10^{-8} m²/s respectivement, vers 6 heures et demi d'essai (ceci sans augmentation de P_i).

Dans les graphiques de Ca et de SO_4 en fonction du débit et de la transmissivité, la valeur extrême du débit atteint à la fin de l'essai, et qui est de 800 ml/h (figure 11.5a), n'a pas été considérée pour les courbes de régression afin de mieux faire ressortir les tendances entre les différents paramètres étudiés. Dans le cas de SO_4 , on note une forte corrélation

négative entre cet ion et le débit ($R=-0,96$) (figure 13.11); ceci témoigne de l'importante influence du comportement hydraulique sur la quantité de SO_4 précipitée dans l'eau. Dans le cas de Ca, sa corrélation avec le débit est très faible ($R=-0,14$) indiquant que le Ca reste constant indépendamment du débit. Les gammes de débit et de transmissivité durant l'essai, avant d'atteindre les valeurs maximales à la fin, vont de 34 à 800 ml/h et de 9×10^{-10} à $2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement.

Le graphique du taux de dissolution de la calcite par unité de surface en fonction du temps montre une variation de ce taux dans le même sens que le débit en fonction du temps, entre 0 et 6 heures d'essais (figure 13.12a). La gamme des valeurs de ce taux va de $2,46 \times 10^{-3}$ à $4,36 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$. Après les 6 premières heures d'essai, la concentration de Ca chute jusqu'à devenir nulle avec l'augmentation du débit à environ 800 ml/h (figure 11.8b). Le phénomène d'écoulement préférentiel d'eau dans les chenaux créés réduit la surface de la calcite qui entre en contact avec l'eau circulant; de plus, la quantité de Ca qui est libérée se trouve d'avantage diluée dans le grand volume d'eau récupérée. Le calcul du taux de dissolution de la calcite par unité de surface pour la période de la fin de l'essai ne peut donc être fiable et il donnerait des valeurs sous estimées de R' . Le graphique de R' en fonction du débit montre une corrélation positive ($R=0,74$) avec une pente de la droite de régression $0,113 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ pour une gamme des débits de 34 à 45 ml/h (figure 13.12b).

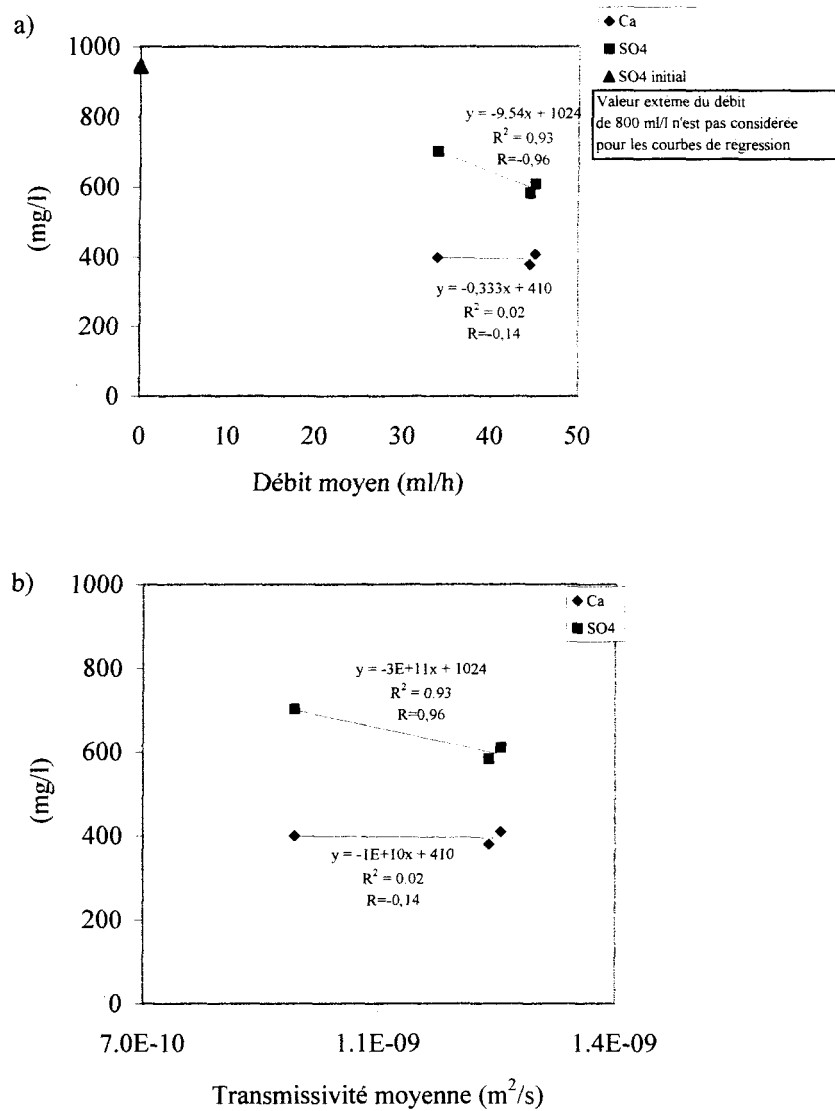


Figure 13.11: Ca et SO₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 2 à pH 2.

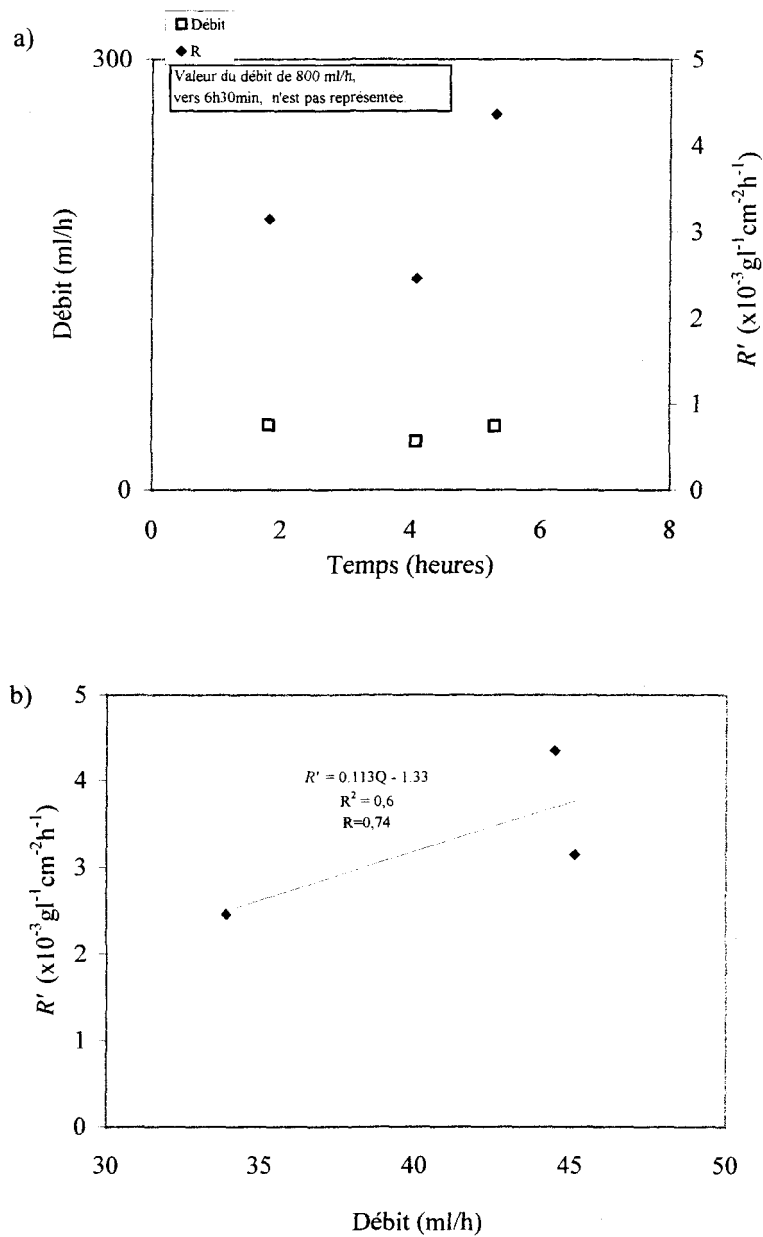


Figure 13.12: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a); R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 2 à pH 2.

13.2 CAS DES ESSAIS À PH 2

13.2.1 Échantillon 3

Dans le cas de l'échantillon 3 injecté à l'eau à pH 2, la quantité de Ca libérée dans l'eau est assez élevée durant les 30 premières minutes d'essai (entre 350 et 400 mg/l) (figure 11.10b); ceci est dû à une importante dissolution de la calcite présente dans la fracture (annexe 5 – photos 3 et annexe 9 – photos 19 et 20). L'indice de saturation de la calcite maintenu sous le seuil de saturation (entre -2 et -4,5) est une indication de leur dissolution continue durant l'essai (figure 13.13a). Le résultat de cette dissolution est une augmentation du pH jusqu'à 6 dès le premier prélèvement d'eau après une dizaine de minutes d'essai; puis une diminution progressive jusqu'à des valeurs proches de celle du pH au point d'injection, vers la fin (figure 11.10a).

L'apport des ions Mn, Fe et de SO_4 dans l'eau (figure 11.10) suggère une oxydation des minéraux sulfurés présents dans la fracture par endroits et aussi dans la matrice rocheuse (annexe 5 – photos 3). La sursaturation des eaux en hématite et en goethite, entre 0 et 30 minutes, est en faveur de leur précipitation (figure 13.13b). Cependant, seul un léger dépôt d'hydroxydes est observé sur les deux surfaces de la fracture après l'essai. La presque saturation des eaux en gypse et en anhydrite durant l'essai ne permet sans doute pas encore leur précipitation. Les eaux sont, par contre, sous saturées en dolomite,

rhodochrosite et sidérose dont les valeurs d'indice de saturation diminuent encore plus après les 30 premières minutes d'essai.

La diminution continue du pH et de la concentration en ions (à l'exception de SO_4 et de Fe) après les 30 premières minutes d'essai serait due à l'augmentation du débit d'eau et de la transmissivité de la fracture qui dépassent 1000 ml/h et $3 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ respectivement (figures 11.9 et 11.10). Le très court temps de résidence de l'eau dans la fracture ne permet pas d'atteindre l'équilibre chimique entre l'eau et les minéraux de remplissage de la fracture, d'où le retour du pH vers sa valeur de départ de 2 à la fin de l'essai.

L'augmentation continue du débit d'eau, sans atteinte d'un plateau, dans la fracture durant tout l'essai pourrait être attribuée à l'hétérogénéité des minéraux de la veine et à leur arrangement dans la fracture. L'observation microscopique des lames minces de la veine fracturée (annexe 9 – photos 19 et 20) montre l'existence d'au moins trois minéraux (calcite, quartz et pyrite) avec des cristaux de tailles variées arrangés aléatoirement, ne dépassant pas 0,9 mm dans le cas de la calcite et 0,2 mm dans le cas du quartz. La dissolution de la calcite créerait des espaces vides entre les minéraux moins solubles, tels que le quartz et la pyrite, ce dernier est bien mis en évidence sur les photographies des surfaces de la fracture après l'essai (annexe 5 – photos 3). Ce type de dissolution favoriserait une augmentation de façon continue et rapide du débit (et de la transmissivité) avec le temps; et ceci malgré la faible épaisseur de la veine fracturée (inférieure à 0,9 mm).

Les graphiques de corrélation de Ca en fonction du débit et de la transmissivité (figure 13.14) montrent une forte corrélation négative ($R=-0,97$) indiquant une étroite relation entre le comportement hydraulique et les processus de dissolution de la calcite dans la fracture pour des gammes de débit et de transmissivité situées entre 438 et 1556 ml/h et entre $1,5 \times 10^{-8}$ et $5,4 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement. Le SO_4 ne montre cependant qu'une faible corrélation avec le débit et la transmissivité (figure 13.14). Il semble donc que les réactions qui permettent l'apport ou la diminution de la quantité de SO_4 (l'oxydation et la précipitation) ne sont pas affectées uniquement par les paramètres hydrauliques.

Le graphique du taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , et du débit en fonction du temps montre une augmentation de ce taux et du débit en fonction du temps, entre 0 et 37 minutes d'essai (figure 13.15a). Les valeurs de ce taux varient dans une gamme allant de 28,5 à $65 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ pour une gamme de débit allant de 438 à 1295 ml/h. Après 37 minutes d'essai, ce taux semble chuté à cause de la dilution de la concentration de Ca dans le grand volume d'eau traversant la fracture (débit d'eau atteignant 1556 ml/h). Pour des valeurs de débit entre 438 et 1295 ml/h, il existe une corrélation positive entre le taux de dissolution de la calcite et le débit ($R=0,98$); la pente de la droite décrivant cette corrélation est de $0,047 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ (figure 13.15b).

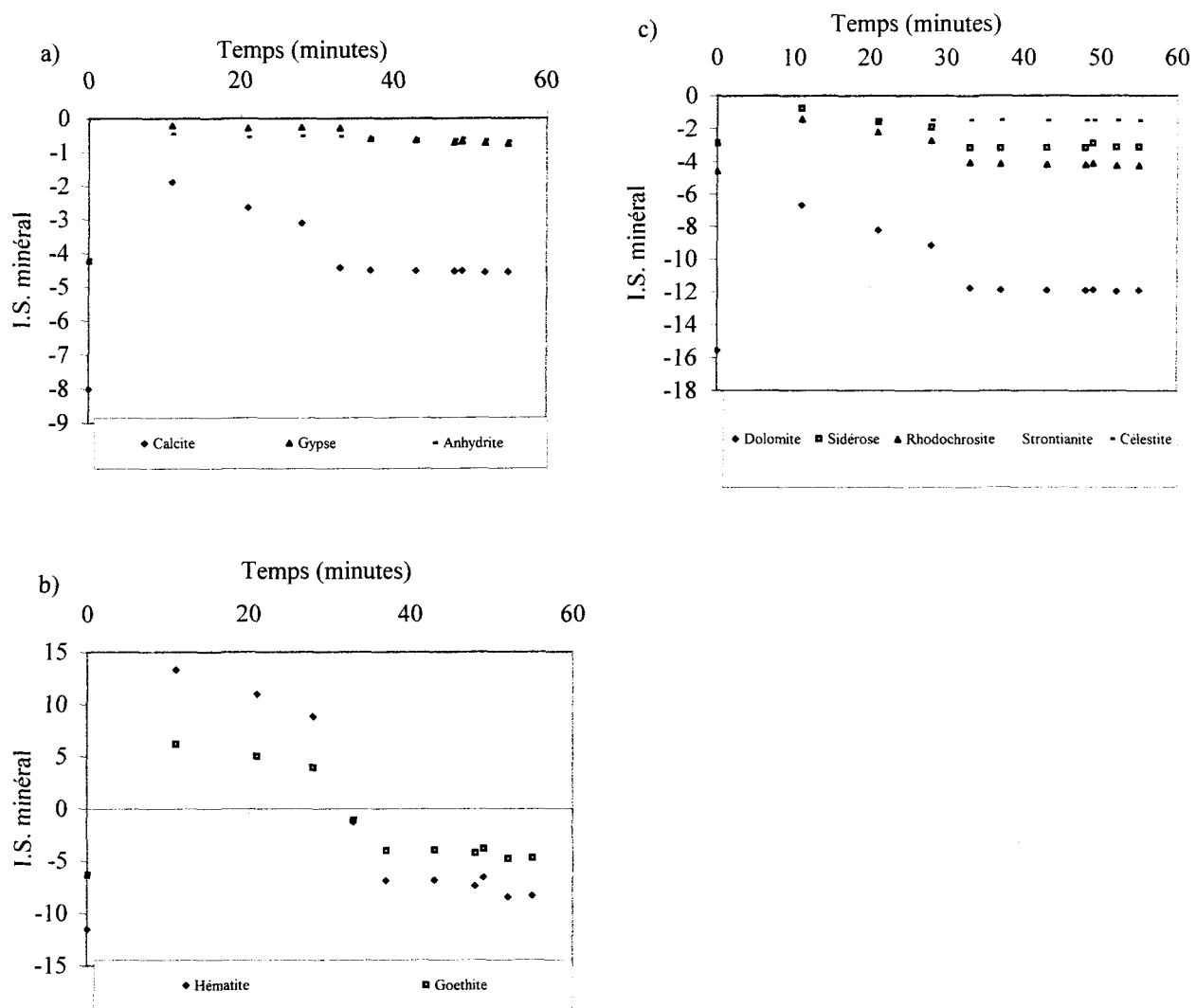


Figure 13.13: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 3 à pH 2.

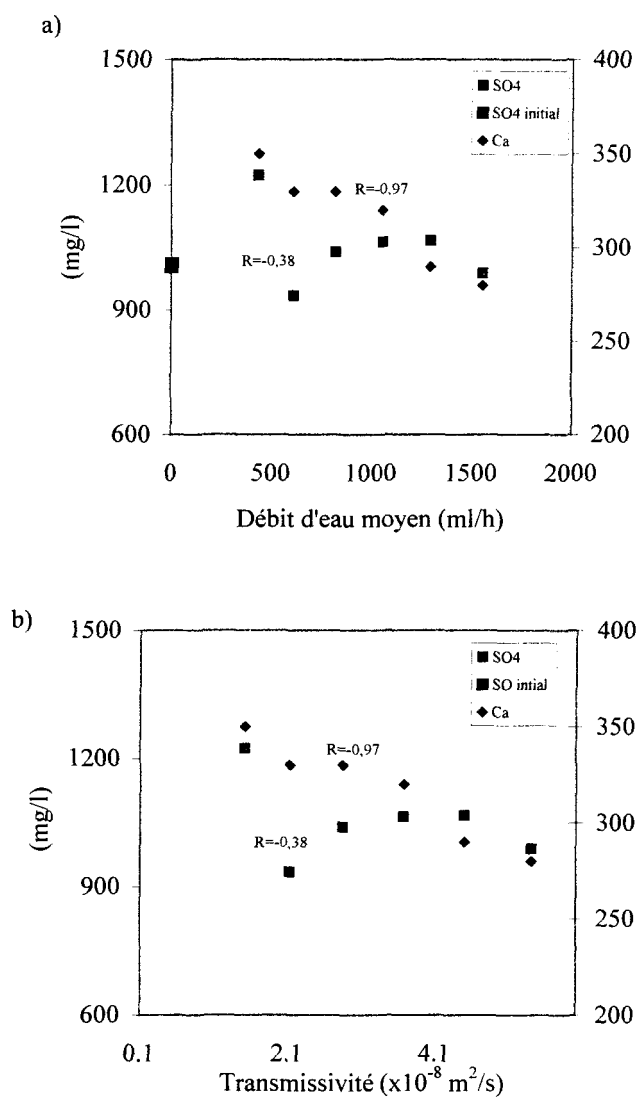


Figure 13.14 : Ca et SO₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 3 à pH 2.

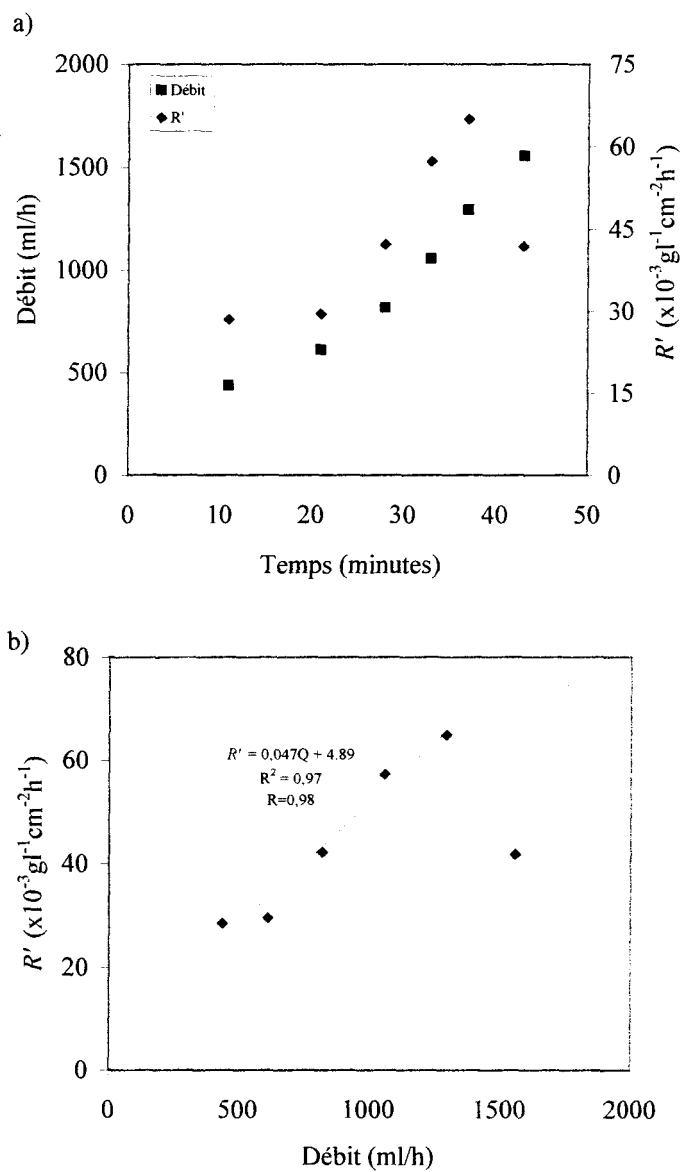


Figure 13.15: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 3 à pH 2.

13.2.2 Échantillon 4

Dans le cas de l'échantillon 4, injecté à l'eau à pH 2, l'augmentation de la concentration en Ca dans l'eau (entre 300 et 311 mg/l), entre 0 et 140 minutes de l'essai (figure 11.12b), est le résultat d'une importante dissolution de la calcite, aboutissant à la création de chenaux, dont un chenal principal bien développé sur les deux surfaces de la fracture (annexe 5 – photos 4 et annexe 9 – photos 21 et 22). Les eaux récupérées durant l'essai sont sous-saturées en calcite (I.S.<-2) (figure 13.16a) et donc en faveur de la dissolution de ces minéraux durant cette période d'essai. Il en résulte une évolution du pH proche de la neutralité (pH autour de 6) durant presque toute la durée de l'essai, de 0 jusqu'à environ 140 minutes (figure 11.12a). Après ce temps, la sous-saturation des eaux récupérées est beaucoup plus prononcée due à la circulation d'un grand volume d'eau dans la fracture; ceci permet le retour du pH vers sa valeur initiale plus acide.

La diminution de la concentration en SO_4 de 1000 mg/l (figure 11.12b), la concentration au point d'injection, à environ 737 mg/l durant l'essai serait le résultat de sa précipitation sous forme de minéraux secondaires, tels que le gypse. En effet, les eaux récupérées à la sortie de la fracture sont saturées en gypse et en anhydrite (figure 13.16a et c) entre 0 et 140 minutes d'essai; cette condition favorise donc la précipitation de SO_4 avec le Ca. S'il y a précipitation de tels minéraux, la concentration mesurée de Ca issue de la dissolution de la calcite serait donc sous estimée.

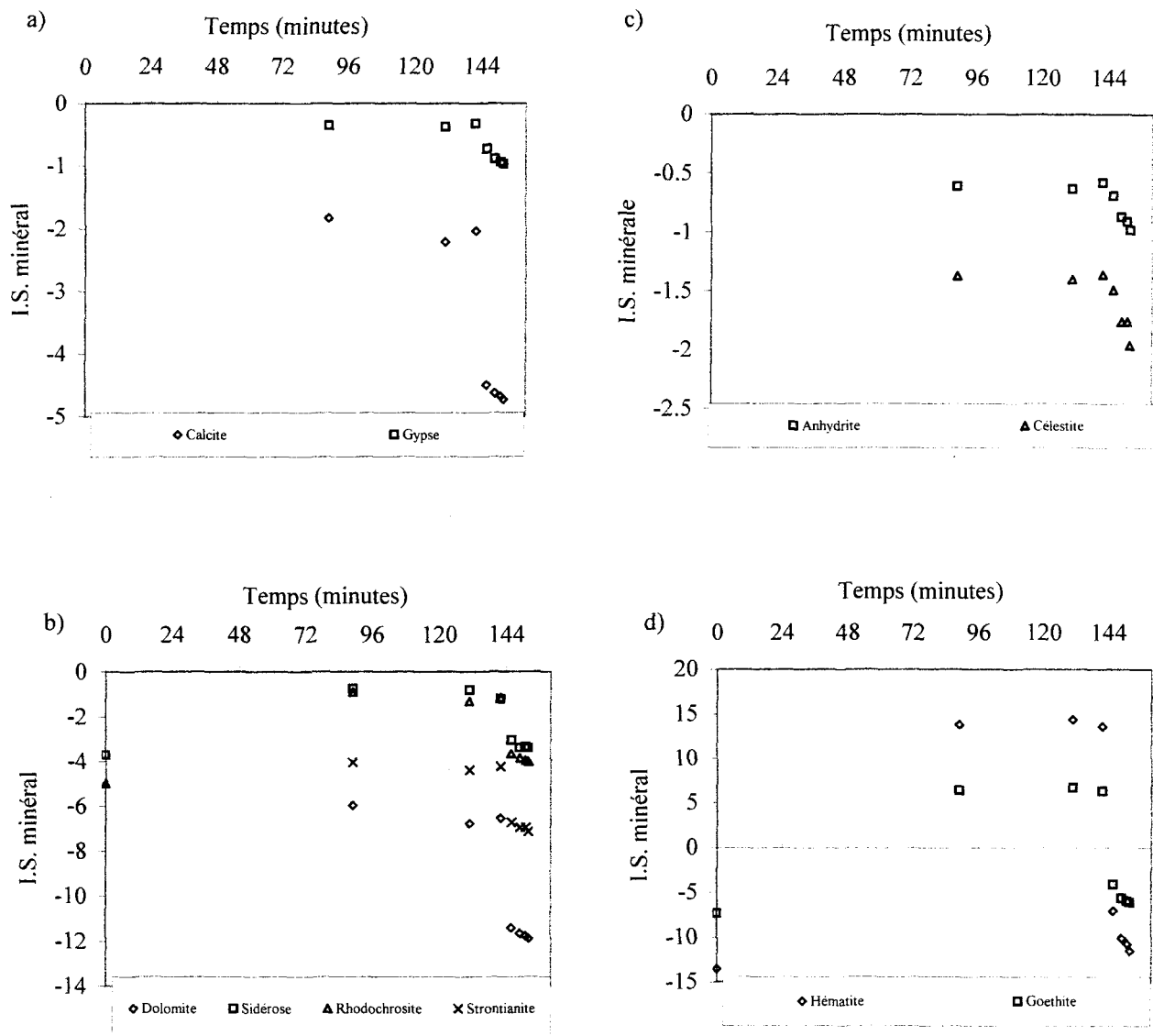


Figure 13.16: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 4 à pH 2.

Les eaux sont, par contre, sursaturées en minéraux d'oxydes de fer, tels que l'hématite et la goethite durant les 140 premières minutes d'essai (figure 13.16d), ce qui permet leur précipitation; d'où le léger dépôt d'hydroxydes remarqué sur les surfaces de la fracture (annexe 5 – photos 4). L'ion Fe proviendrait de l'oxydation des minéraux sulfurés dans la matrice rocheuse. Les ions Mn, Sr et Mg proviendraient des carbonates. L'ion Cl proviendrait des plagioclases.

La création des chenaux dans la fracture est la cause de l'augmentation spontanée du débit d'eau (et de la transmissivité) après les 140 minutes d'essai (figure 11.11). Cette augmentation du débit apporte un changement de la chimie des eaux récupérées après cet intervalle de temps (figure 11.12; tableau 12.1). L'eau injectée dans la fracture suit un trajet préférentiel qui est celui des chenaux; la surface de cette fracture (recouverte par la calcite) qui entre en contact avec le grand volume d'eau circulant est donc réduite. Il en résulte une dilution de la quantité des ions, libérés par les réactions chimiques, dans le grand volume d'eau récupérée après une certaine période de l'essai.

Les graphiques de corrélation de Ca avec le débit d'eau moyen et avec la transmissivité moyenne montrent deux types de tendance (figure 13.17) : pour des gammes de débit et de transmissivité allant de 25 à 136 ml/h, et de $1,96 \times 10^{-10}$ à $1,08 \times 10^{-9}$ m²/s respectivement, la concentration de Ca augmente avec l'augmentation du débit ($R=0,99$); et pour des gammes de débit et de transmissivité plus larges, allant de 136 à 3974 ml/h, et de

$1,08 \times 10^{-9}$ à $3,19 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement, la concentration de Ca diminue ($R=0,93$). La première phase de Ca en fonction du débit, correspondant à des valeurs de débit entre 25 et 136 ml/h, est la période la plus convenable pour le calcul du taux de dissolution de la calcite durant l'essai. Dans la deuxième phase d'essai, correspondant à des valeurs de débit plus élevées, la concentration de Ca se trouve être diluée dans le grand volume d'eau qui traverse la fracture. Dans le cas de SO_4 , sa concentration augmente pour une augmentation du débit de 25 à 136 ml/h et reste plus au moins stable pour les valeurs de débit plus élevées ($R=-0,62$). La gamme de débit et transmissivité va de 24 à 3974 ml/h et de 2×10^{-10} à $3 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement (figure 13.17).

Le graphique du taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , et du débit en fonction du temps montre une faible augmentation de ce taux en fonction du temps de $4,5 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$, atteint vers 95 minutes, à $10,4 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$, atteint vers 137 minutes (figure 13.18a). Le débit moyen subit aussi une faible augmentation de 25 ml/h à 72 ml/h pendant cette période. Après cette période d'essai, le taux de dissolution augmente rapidement jusqu'à environ $236 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$, correspondant à un débit d'environ 4000 ml/h, vers la fin de l'essai. Le graphique du taux de dissolution R' en fonction du débit peut être subdivisé en deux parties (figure 13.18b): une première partie pour des valeurs de débit entre 25 et 522 ml/h, et avec une forte corrélation positive ($R=0,98$) entre R' et le débit sous une pente de la droite de régression de $0,186 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$; la deuxième partie du graphique correspond à des valeurs de débit supérieures ou égales à 522 ml/h, et avec une corrélation

positive ($R=0,72$) entre R' et le débit sous une pente de la droite de régression de $0,028 \text{ gl}^2\text{cm}^{-2}$. Ce changement de pente de droite du taux de dissolution par unité de surface durant l'essai est dû à l'écoulement préférentiel de l'eau le long de chenaux créés; ce phénomène d'écoulement restreint la surface de la fracture qui entre en contact avec l'eau injectée.

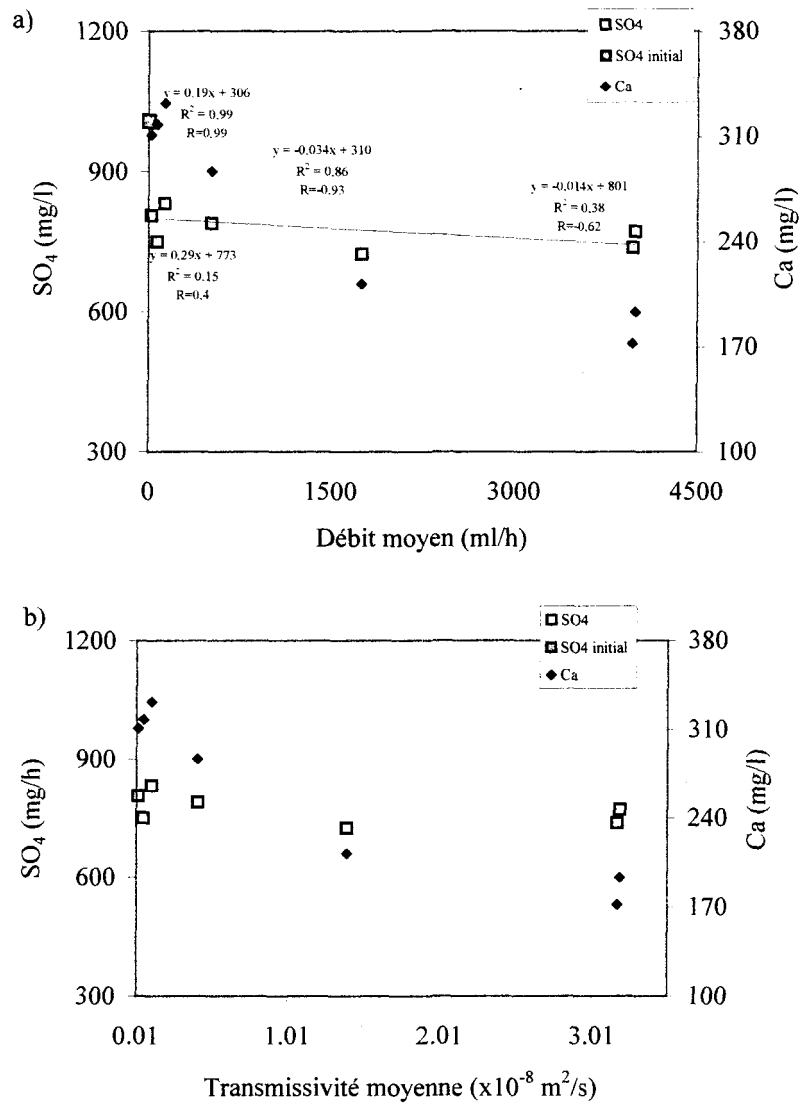


Figure 13.17: Ca et SO₄ en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 4 à pH 2.

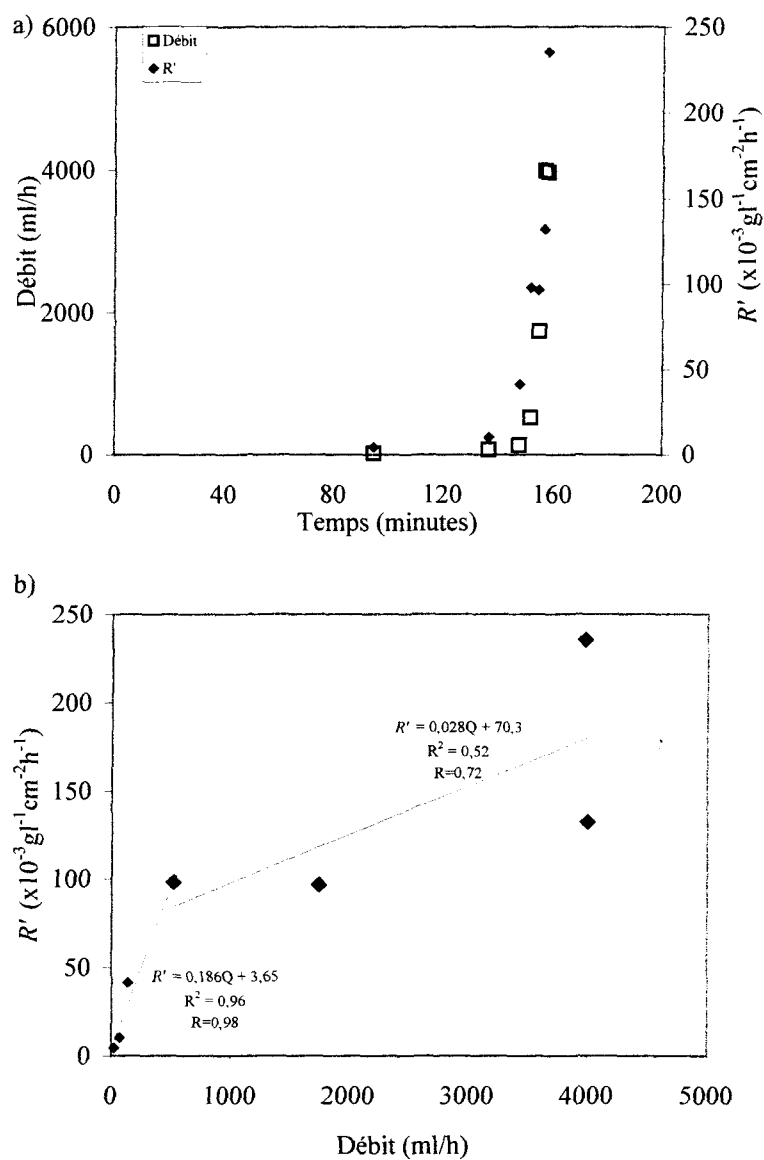


Figure 13.18: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 4 à pH 2.

13.2.3 Échantillon 5

Dans le cas de l'échantillon 5 injecté à l'eau à pH 2, l'augmentation de la concentration de Ca jusqu'à 370 mg/l durant l'essai (figure 11.14b) est le résultat de la dissolution de la calcite présent dans la veine fracturée (annexe 5 – photos 5; annexe 9 – photos 23 et 24). Cette dissolution s'accompagne d'une augmentation du pH vers 6. L'état de saturation en calcite des eaux récupérées montre que, en effet, il y a une sous-saturation en ce minéral favorisant sa dissolution (figure 13.19a). L'augmentation de la concentration de SO₄ de 940 mg/l, la concentration au point d'injection, jusqu'à 1042 mg/l, avec l'augmentation des métaux dans l'eau (figure 11.14b et c), implique qu'il y a une oxydation des minéraux sulfurés de la matrice durant l'essai. L'augmentation de la concentration de Cl (figure 11.14c) serait le résultat d'une dissolution de certains feldspaths dans la matrice rocheuse.

L'état de saturation de l'eau récupérée, vers 2 heures d'essai, par rapport aux minéraux montre une sursaturation des eaux en hématite et en goethite durant l'essai, ce qui favorise la précipitation de Fe, d'où le dépôt d'hydroxydes sur les deux surfaces de la fracture (annexe 5 – photos 5). Cette eau est aussi saturée en sidérose, en rhodochrosite, en gypse, et en anhydrite; mais elle est sous saturée en dolomite et en strontianite.

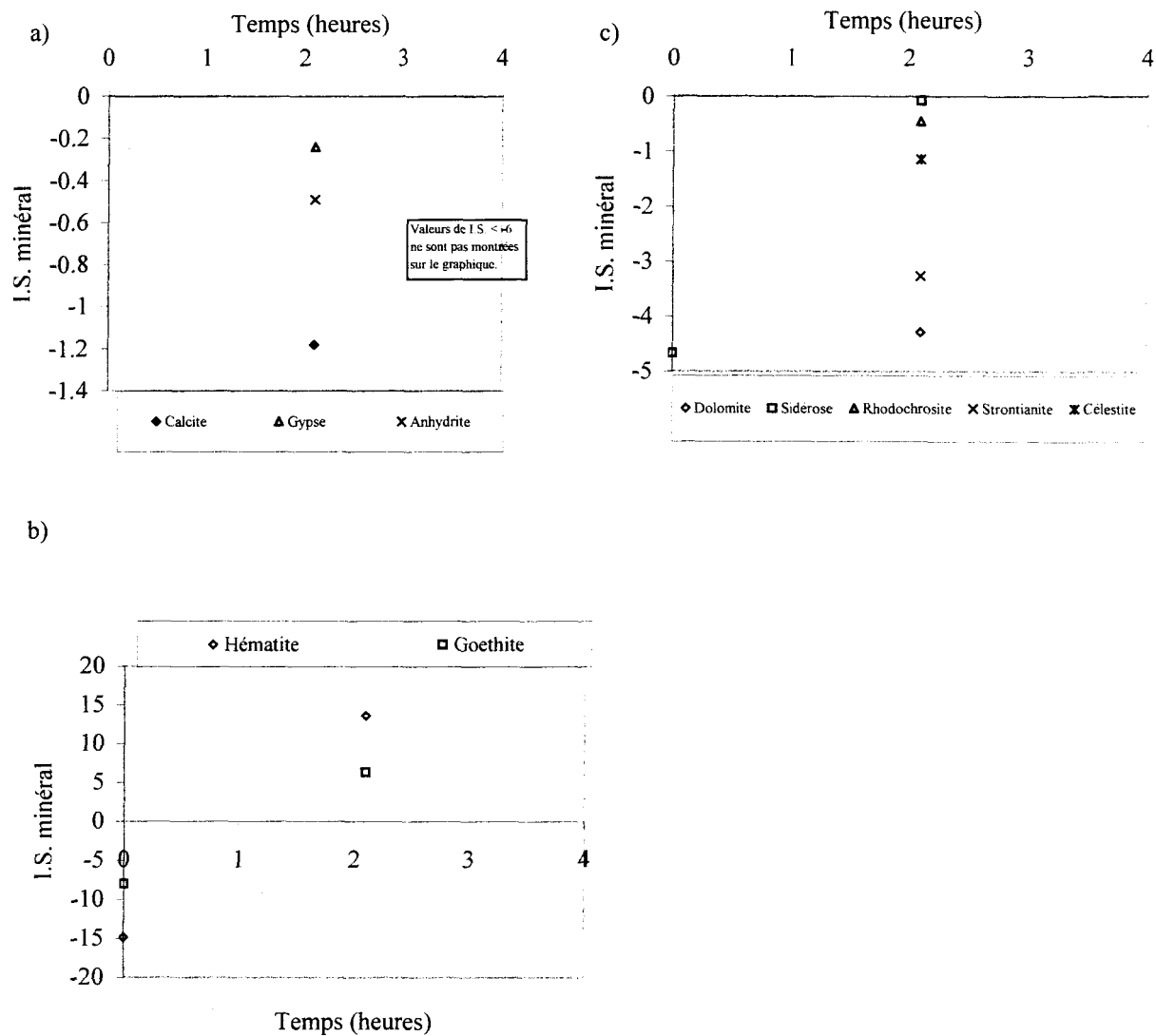


Figure 13.19: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 5 à pH 2.

La formation d'un large chenal dans la fracture est responsable de l'augmentation rapide et spontanée du débit d'eau vers 3 heures d'essai; ce débit dépasse les 160 ml/h, pour une transmissivité supérieure à $1 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ vers la fin de l'essai (figure 11.13). L'augmentation du débit s'accompagne d'une diminution de la concentration en ions dans l'eau jusqu'à atteindre les concentrations de l'eau d'injection vers la fin, après environ 3 heures d'essai (figure 11.14). Étant donné que le débit d'eau est resté stable pendant au moins deux heures avant la fin de l'essai, on peut supposer que la chimie de l'eau est restée aussi stable pendant cette période, comme c'était le cas lors de l'essai sur l'échantillon 4.

Le graphique de Ca en fonction du débit et de la transmissivité montre une diminution de la concentration de Ca avec l'augmentation du débit et de la transmissivité dont les gammes s'étalent de 370 à 1160 ml/h et de $7,9 \times 10^{-10}$ à $3,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement (figure 13.20). Dans le cas de SO_4 , il subit, par contre, une augmentation en fonction du débit et de la transmissivité, puis une diminution jusqu'à sa valeur au point d'injection pour les valeurs du débit et de la transmissivité les plus élevées. Puisqu'il n'y a que deux volumes d'eau récupérée, on ne peut conclure sur le degré de corrélation entre ces ions et les paramètres hydrauliques.

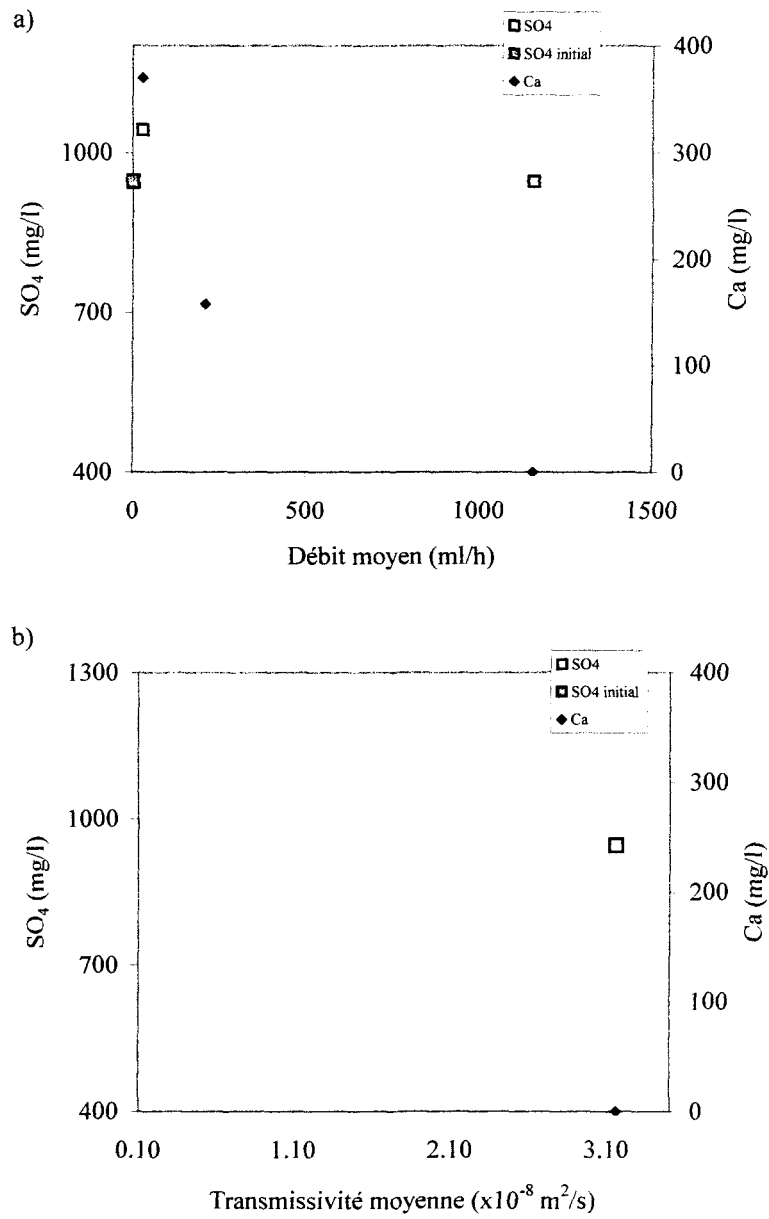


Figure 13.20: Ca et SO_4 en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 5 à pH 2.

Le graphique du taux de dissolution de la calcite et du débit en fonction du temps montre dans un premier temps une faible augmentation de ce taux de 3×10^{-3} à $3,25 \times 10^{-3}$ $\text{gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ avec l'augmentation du débit moyen de 29 à 211 ml/h, entre 2 et 3 heures d'essais (figure 13.21a). Avec l'augmentation rapide du débit qui dépasse 1158 ml/h, après cet intervalle de temps, ce taux de dissolution semble chuter jusqu'à une valeur nulle à la fin de l'essai, après 3 heures et demi. L'estimation du taux de dissolution de la calcite est probablement biaisée à cause de la dilution de la quantité de Ca libérée dans un grand volume d'eau traversant la fracture; en plus, il y a l'écoulement préférentiel de l'eau qui se passe dans les chenaux créés réduisant la surface de la fracture (surface de la calcite) entrant en contact avec l'eau. La figure du taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du débit montre une corrélation positive entre ces paramètres pour des débits entre 29 et 211 ml/h; la faible pente de la droite de régression décrivant cette tendance est de $0,0014 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ (figure 13.21b). Étant donné que la droite de régression entre R' et le débit n'est basée que sur deux points sur le graphique, l'estimation de sa pente peut être affectée par des erreurs.

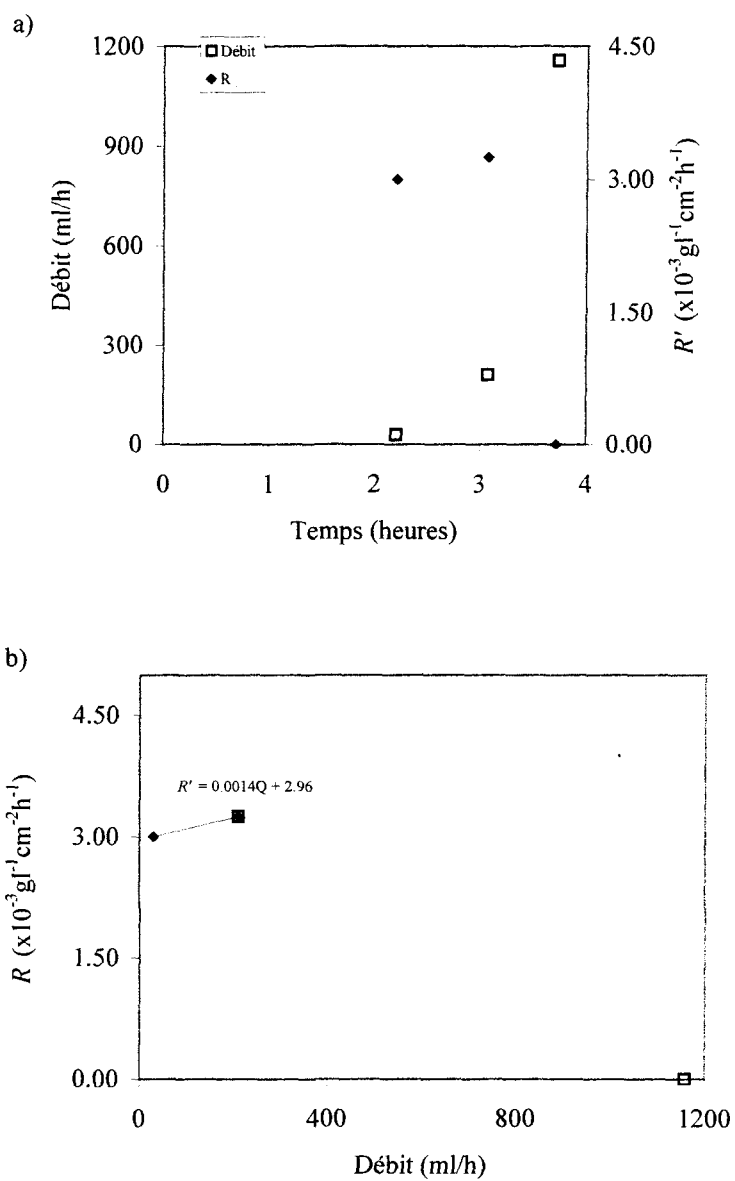


Figure 13.21: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 5 à pH 2.

13.2.4 Échantillon 6

Dans le cas de l'échantillon 6 injecté à l'eau à pH 2, l'augmentation de la concentration de Ca, jusqu'à des valeurs entre 180 et 330 mg/l (figure 11.16b), durant les 16 heures d'essais, témoigne de la dissolution de la calcite abondante dans la fracture (annexe 5 – photos 6 et annexe 9 – photos 25 et 26). Les eaux récupérées à la sortie de la fracture restent toujours sous-saturées en calcite, ce qui est en faveur de la dissolution continue de ce minéral (figure 13.22b et d). Le résultat de cette dissolution est une augmentation du pH autour de 6 durant cette période d'essai. La diminution de la concentration de SO_4 , de sa valeur au point d'injection (777 mg/l) jusqu'à environ 605 mg/l (figure 11.14b), suggère une précipitation de ce dernier sous forme de gypse. Le I.S. du gypse et de l'anhydrite qui est près du seuil de saturation entre 0 et 16 heures d'essai peut sans doute entraîner leur précipitation (figure 13.22a et d).

Les métaux mineurs de même que le Fe proviendraient de l'oxydation des minéraux sulfurés présents dans la matrice. Les graphiques de I.S. des minéraux de fer (figure 13.22e), tels que la goethite et l'hématite, montrent une sursaturation en ces minéraux entre 0 et 16 heures en faveur de leur précipitation; d'où l'important dépôt d'hydroxydes le long des chenaux dans la fracture (annexe 5). Les autres éléments, tels que Cl, Mg et Na, proviendraient de la dissolution des feldspaths de la matrice.

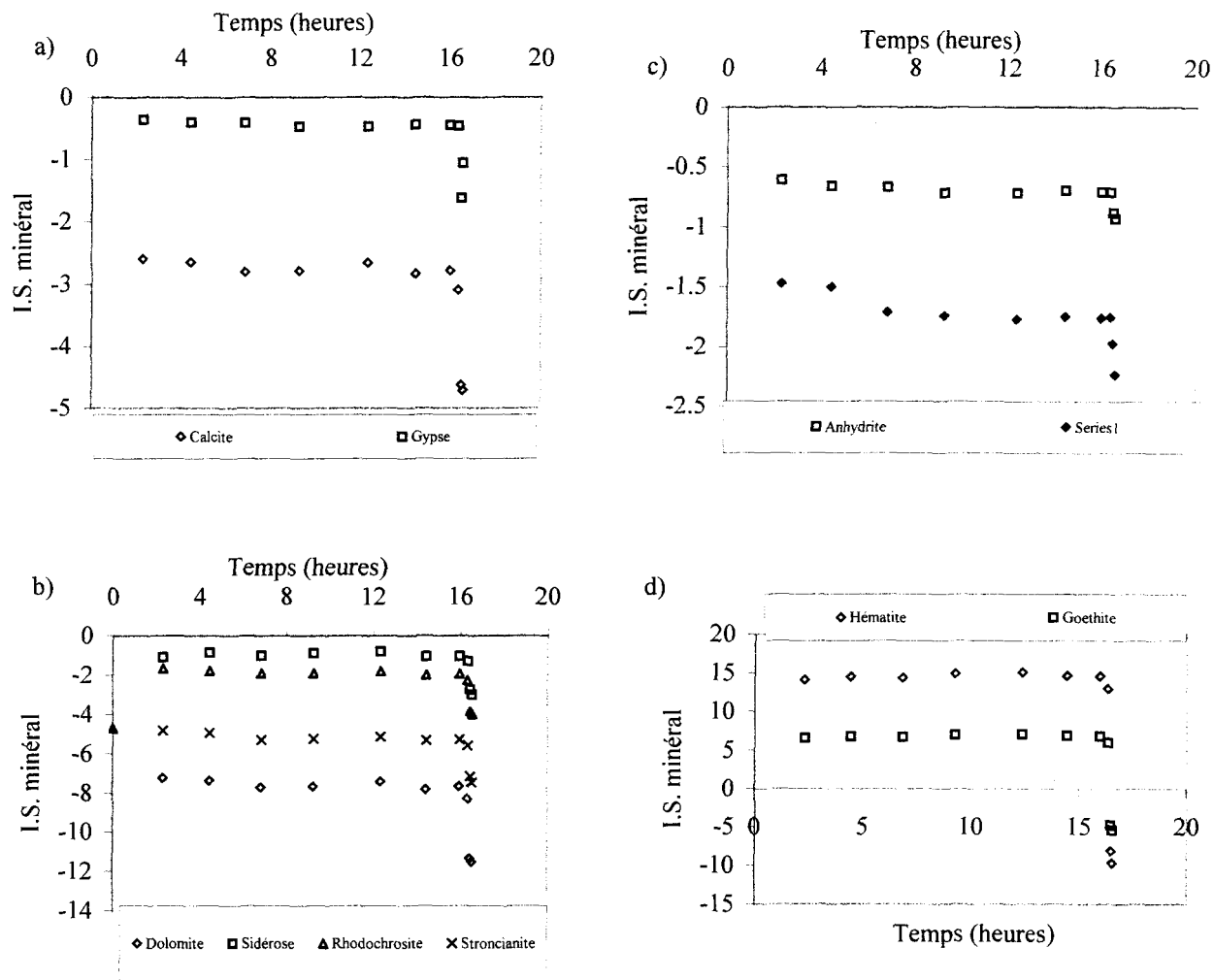


Figure 13.22: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 6 à pH 2.

La concentration des ions dans l'eau diminue, après 16 heures d'essai, avec l'augmentation spontanée et rapide du débit d'eau dont les valeurs dépassent 120 ml/h, pour des valeurs de la transmissivité supérieures à $5 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ (figure 11.15).

Les graphiques de la concentration de Ca en fonction du débit d'eau moyen et de la transmissivité moyenne montrent une variation de Ca avec une tendance à diminuer de 330 à 280 mg/l pour des gammes de débit et de transmissivité allant de 15 à 31 ml/h et de $9,35 \times 10^{-10}$ à $2,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ respectivement (figure 13.23). Pour une gamme de débit élevé, entre 31 et 810 ml/h, il existe une corrélation négative entre le Ca et le débit ($R=-0,93$). Dans le cas de SO_4 , il existe une corrélation négative entre cet ion et le débit ($R=-0,75$) pour des gammes de débit et de transmissivité allant de 15 à 31 ml/h et de $9,35 \times 10^{-10}$ à $2,2 \times 10^{-8} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ respectivement (figure 13.23). Lorsque les valeurs de débit sont plus élevées, entre 31 et 810 ml/h, cette corrélation est plus faible ($R=0,3$). Les conditions de libération de l'ion SO_4 seraient donc contrôlées par le débit d'eau à des valeurs inférieures à 31 ml/h.

Le graphique du taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , et du débit en fonction du temps montre dans un premier temps une faible augmentation de ce taux de 1,89 à $3 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ avec l'augmentation du débit moyen de 16 à 31 ml/h, entre 2 et 16 heures d'essais (figure 13.24a). Avec l'augmentation rapide du débit qui dépasse 810 ml/h, après cette période, le taux de dissolution de la calcite augmente aussi rapidement jusqu'à une valeur de $65 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ à la fin de l'essai, après 16 heures et demi.

Dans le graphique du taux de dissolution de la calcite par unité de surface en fonction du débit, on note une première évolution de corrélation positive élevée ($R=0,78$) entre le taux R' et le débit, pour des valeurs de débit entre 16 et 31 ml/h (figure 13.24b). La pente de la droite de régression décrivant cette tendance est de $0,075 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. La deuxième évolution du taux R' en fonction du débit forme une corrélation positive élevée aussi ($R=0,61$), pour une gamme de débits allant de 31 à 810 ml/h. La pente de la droite de régression décrivant cette tendance est de $0,055 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$; la diminution de la valeur de cette pente par rapport à la première évolution est probablement due au phénomène d'écoulement préférentiel qui se passe après la création de chenaux dans la fracture, aboutissant à une réduction de la surface de la fracture (couverte par la calcite) entrant en contact avec l'eau coulante.

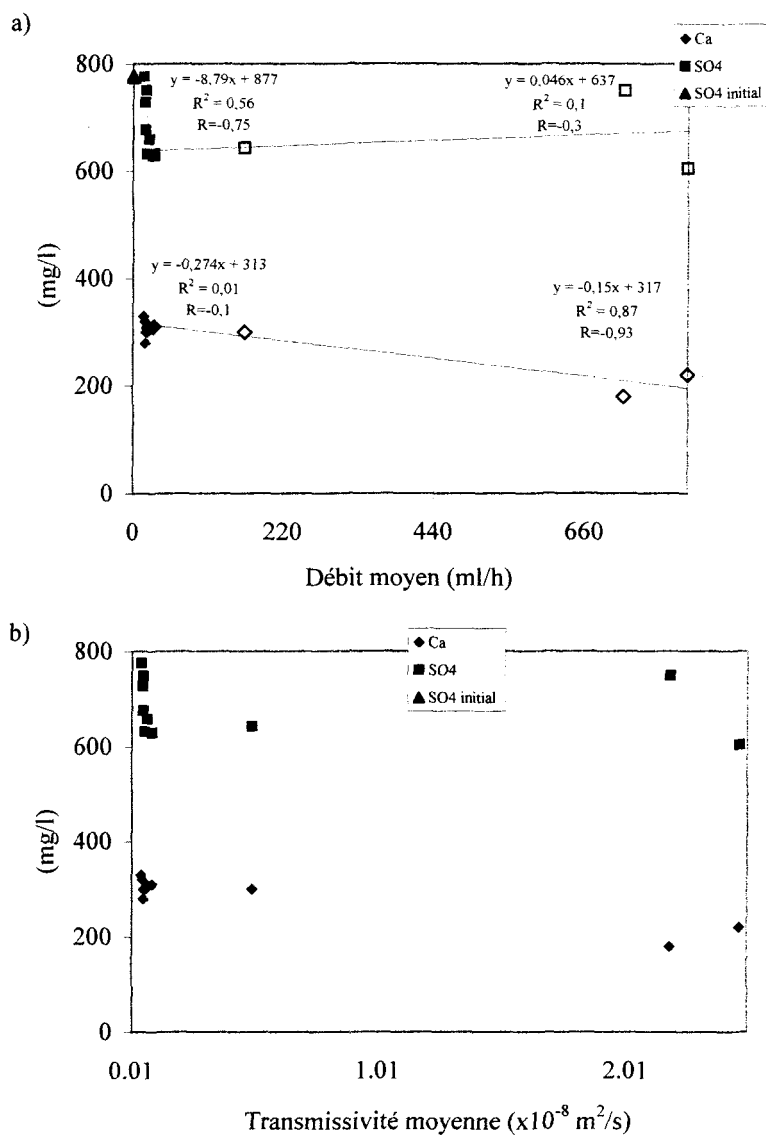


Figure 13.23: Ca et SO_4 en fonction du débit (a) et de la transmissivité (b) pour l'échantillon 6 à pH 2.

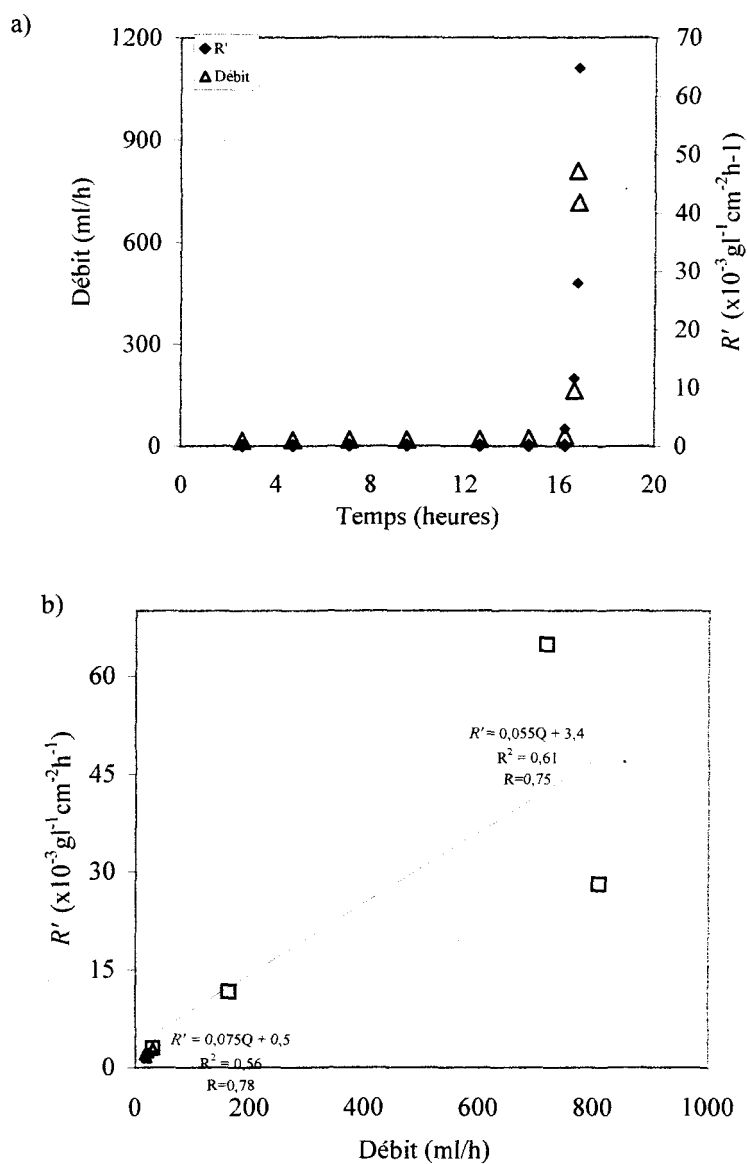


Figure 13.24: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit moyen (b) pour l'échantillon 6 à pH 2.

13.2.5 Échantillon 7

Dans le cas de l'échantillon 7 injecté à l'eau à pH 2, les concentrations en Ca générées entre 30 et 250 mg/l durant l'essai (figure 11.17) témoignent de la dissolution de la calcite présente dans la veine fracturée (annexe 5 – photos 7 et annexe 9 – photos 27 et 28). Les valeurs de I.S. de la calcite sont très faibles (inférieurs à -4) en faveur de la dissolution de la calcite dans la fracture (figure 13.25d). Le pH des eaux reste, cependant, légèrement acide autour de 5 durant l'essai suggérant une dissolution des minéraux plus loin de l'équilibre (loin de pH neutre).

L'augmentation de la concentration de SO_4 de la valeur au point d'injection (850 mg/l) jusqu'à environ 1000 mg/l en parallèle avec l'augmentation importante de la concentration de Fe (figure 11.18b et e) impliquent qu'il y a d'importantes réactions d'oxydation des minéraux sulfurés de la matrice. Une proportion de SO_4 pourrait précipiter sous forme de minéraux secondaires, tels que le gypse, puisque l'augmentation de la concentration en cet ion n'est pas aussi élevée que celle de Fe. L'indice de saturation en gypse et en anhydrite passe de la saturation à la sous-saturation après 113 heures d'essai, ce qui peut favoriser leur précipitation durant les premières 113 heures d'essai (figure 13.25a). Il y a une sursaturation en hématite et en goethite en faveur de la précipitation de Fe sous forme d'hydroxydes (figure 13.25b). Les photographies des deux surfaces de la fracture après l'essai témoignent de cette précipitation (annexe 5 – photos 7). Les ions mineurs dans l'eau tels que, Na, K et Cl proviendraient des feldspaths et le Mg des micas.

Les eaux récupérées restent toujours sous-saturées en dolomite, strontianite, célestite, sidérose et en rhodochrosite, et dont les indices de saturation diminuant avec le temps.

Les graphiques de la concentration de Ca en fonction du débit d'eau et de la transmissivité montrent une forte corrélation positive ($R=0,95$), indiquant une augmentation de la concentration de Ca avec l'augmentation du débit et de la transmissivité pour une gamme des valeurs allant de 0,2 à 2,2 ml/h et de $1,6 \times 10^{-12}$ à $1,7 \times 10^{-11}$ m²/s respectivement (figure 13.26). Le SO₄ présente, cependant, une corrélation négative avec le débit et la transmissivité ($R=-0,66$); ceci suggère que les réactions d'oxydation libérant l'ion SO₄ dans l'eau sont plus intenses à des valeurs de débit plus faibles.

Les très faibles débits d'eau générés durant l'essai (figure 11.17), qui ne dépassent pas 3 ml/h, seraient plus en faveur de réactions d'oxydation par rapport aux réactions de dissolution de la calcite; cette condition ne génère que de faibles valeurs de concentration en Ca (variant de 30 à 250 mg/l) comparativement aux autres essais à pH 2. La calcite est pourtant présente en grande quantité dans la fracture (annexe 5 – photos 7 et annexe 9 – photos 27-28). Une deuxième hypothèse quant à cette faible teneur des eaux en Ca serait sa précipitation importante avec le SO₄ sous forme de gypse. Les phénomènes de précipitation (des hydroxydes et du gypse) domineraient ceux de la dissolution de la calcite et par

conséquent contribueraient à la réduction du volume des vides dans la fracture et à la diminution de sa transmissivité.

Le graphique du taux de dissolution de la calcite et du débit en fonction du temps montre une diminution de ce taux de $0,44 \times 10^{-3}$ à $0,009 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ avec une diminution du débit d'eau passant de 2,15 à 0,21 ml/h, entre 11 et 113 heures d'essais (figure 13.27a). Le graphique du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit montre une corrélation positive (0,95) entre ces deux paramètres (figure 13.27b). La pente de la droite décrivant cette tendance est de $0,23 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ pour une gamme des valeurs de débit très faible allant de 0,21 à 2,15 ml/h.

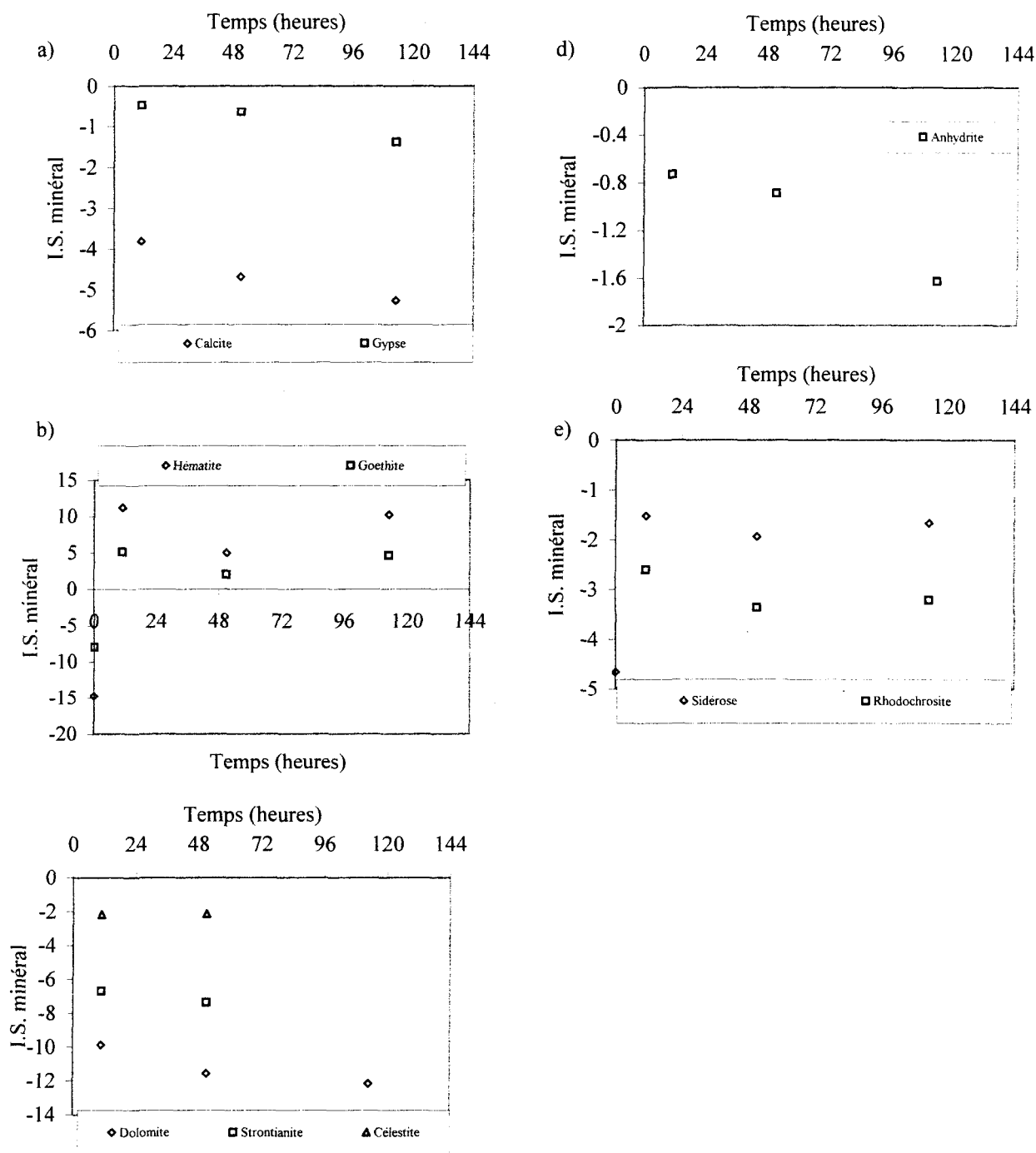


Figure 13.25: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 7 à pH 2.

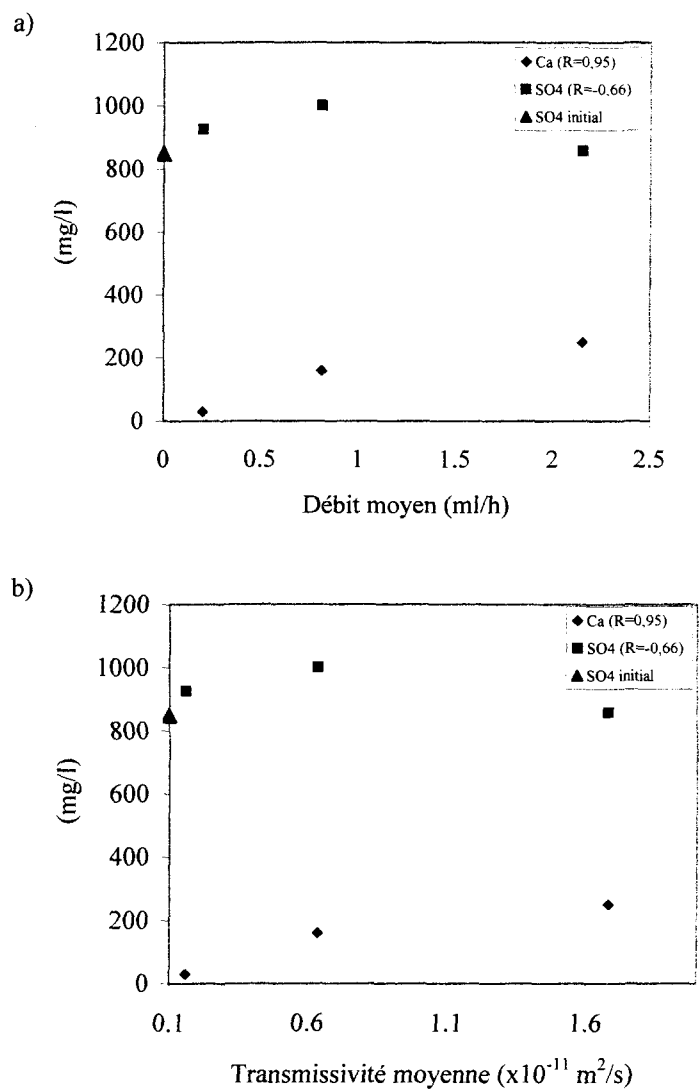


Figure 13.26: Ca et SO_4 en fonction du débit moyen (a) et de la transmissivité moyenne (b) pour l'échantillon 7 à pH 2.

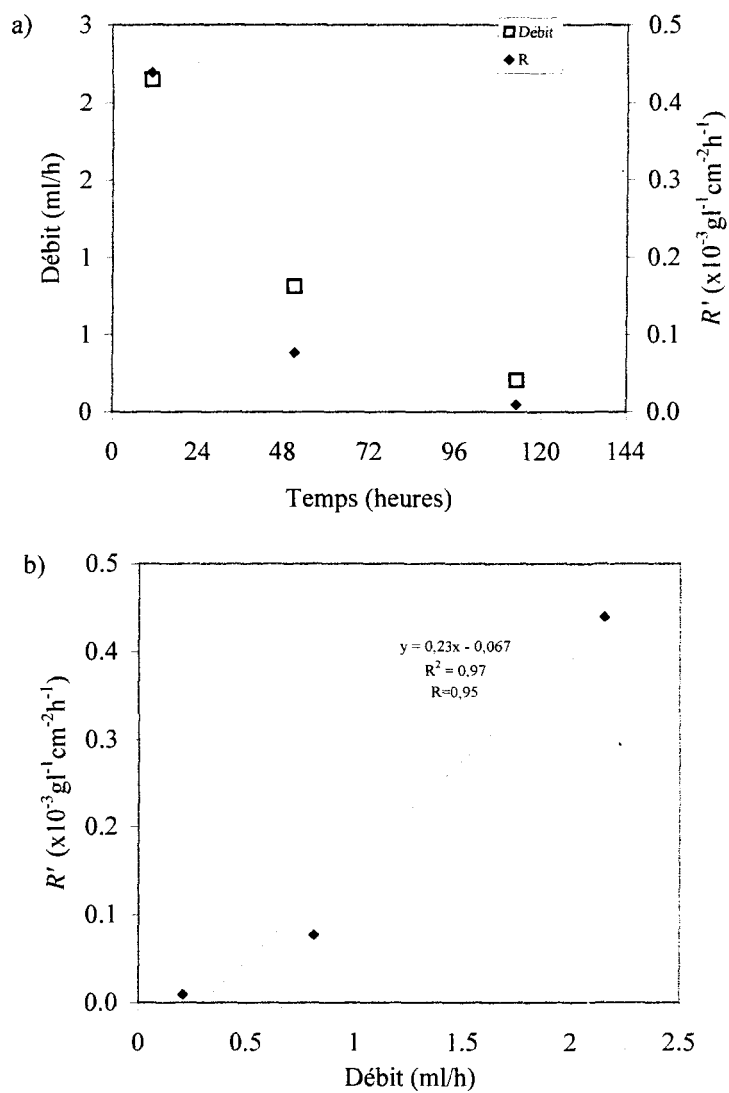


Figure 13.27: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 7 à pH 2.

13.2.6 *Interprétation générale des essais à pH 2*

Les résultats hydrauliques des essais d'injection d'eau à pH 2 ont permis de distinguer 4 types d'évolution du débit et de la transmissivité en fonction du temps (figure 12.1, tableau 12.1).

a) Échantillons à évolution de type A

Dans le cas de l'évolution de type A, incluant les échantillons 4 et 6, on observe 3 phases : une première phase correspond à une augmentation du débit d'eau au début (phase *a*) jusqu'à un plateau (phase *b*), lequel est suivi d'une augmentation spontanée et très rapide (phase *c*) entraînant généralement la fin de l'essai. Les valeurs de débit et de transmissivité avant l'augmentation rapide et spontanée pour ce type de comportement vont de 20 à 24 ml/h et de 2×10^{-10} à 6×10^{-10} m²/s respectivement. Du point de vue géochimique, il y a d'importantes réactions chimiques qui se produisent, telles que la dissolution de la calcite dans la veine fracturée. La dissolution de la calcite permet une augmentation de la concentration de Ca dans l'eau, dès le début de l'essai, jusqu'à des valeurs variant entre 310 et 330 mg/l, demeurant à peu près stable pendant une certaine période de l'essai (phase *b*). Il en résulte une évolution du pH proche de la neutralité (environ 6). Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , varie entre $4,5 \times 10^{-3}$ et 236×10^{-3} gl⁻¹cm⁻²h⁻¹ dans le cas de l'échantillon 4, alors qu'il varie entre $1,9 \times 10^{-3}$ et 69×10^{-3} gl⁻¹cm⁻²h⁻¹ dans le cas de l'échantillon 6 (tableau 13.2). La gamme du taux de dissolution de la calcite par unité de surface est plus large dans le cas de l'échantillon 4, ce qui explique la phase plus courte de

son plateau : 1 heure par rapport à 16 heures dans le cas de l'échantillon 6. Dans les cas des deux d'échantillons, le phénomène de dissolution par chenalisation est important.

Le débit semble avoir un effet plus important sur le taux de dissolution de la calcite par unité de surface dans le cas de l'échantillon 4 que dans l'échantillon 6 (tableau 13.2). Dans le cas de l'échantillon 4, pour une gamme de débit moyen allant de 24 à 522 ml/h, la variation de R' en fonction du débit est de $0,186 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ ($R=0,98$); tandis que dans le cas de l'échantillon 6, pour une gamme de débit moyen allant de 16 et 31 ml/h, la variation de R' en fonction du débit est plus faible et elle est de $0,075 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ ($R=0,78$).

La diminution de la concentration de SO_4 suggère une précipitation de ce dernier sous forme de gypse. Cette hypothèse est appuyée par le résultat de l'indice de saturation montrant des conditions de saturation en ce minéral durant la phase *b*. Les réactions d'oxydation des minéraux sulfurés ont lieu dans la fracture et permettent l'augmentation de la concentration de métaux dans l'eau, en particulier le Fe, jusqu'à la sursaturation (I.S. de la goethite et de l'hématite >1); la sursaturation en minéraux de fer aboutit à leur précipitation (sous forme d'hydroxydes) sur les surfaces des fractures comme en témoignent leurs photographies après essai (annexe 5 -photos 4 –6). Les autres ions mineurs présents dans l'eau proviendraient des feldspaths.

Tableau 13.2: Résumé des résultats du taux de dissolution de la calcite par unité de surface pour les essais à pH 2.

Type d'évolution	Échantillon no.	P_c (MPa) / P_i (MPa)	Rapport P_i/P_c	R' ($\times 10^{-3} \text{ g l}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$)	Q moyen (ml/h)	Équation de la droite de R' versus débit(Q)	Corrélation R R-Q	Corrélation R Ca-Q	Durée de l'essai
A	4	12,38 / 1,1	0,088	4,5 - 98,3	24 - 522	0,186xQ	0,98	-0,95	2 h 40 min
	6	16,51 / 0,28	0,017	98,3 - 236 1,89 - 3 3 - 65	522 - 3974 16 - 31 31 - 810	0,028xQ 0,075xQ 0,055xQ	0,72 0,78 0,75		16 h 40 min
B	2	8,26 / 0,28	0,033	2,46 - 4,36	34 - 45	0,113xQ	0,74	-0,99	6 h 40 min
	5	12,36 / 0,28	0,022	4,36 - 0? 3 - 3,25	45 - 800 29 - 211	ne peut être estimée 0,0014xQ	-1? 1?	-1?	3h 8 min
	1	8,26 / 0,34-0,55-1,1	0,041-0,067-0,133	3,25 - 0? 0,09 - 2,7	211 - 1158 2,5 - 38	ne peut être estimée 0,025xQ		0,43	96 h
C	3	8,26 / 0,28	0,033	28,5 - 65	438 - 1295 1295 - 1556	0,047xQ ne peut être estimée	0,98	- 0,97	45 min
D	7	16,51 / 1,1	0,067	0,009 - 0,44	0,21 - 2,15	0,23xQ	0,95	0,95	108 h

P_c : Pression de confinement

P_i : Pression d'injection

R' : Taux de dissolution de la calcite par unité de surface

Du point de vue minéralogique, les veines des échantillons 4 et 6 (annexe 9 - photos 21 et 22, et photos 25 et 26) contiennent les deux principaux minéraux : la calcite avec des cristaux de grande taille et de longueur moyenne d'environ 1 mm et allongés perpendiculairement aux parois de la veine, et le quartz de plus petite taille, ne dépassant pas 0,12 mm, et disposé le long des deux parois entre la calcite et la matrice rocheuse. Les deux veines possèdent la même épaisseur d'environ 2,6 mm.

b) Échantillons à évolution de type B

Dans le cas de l'évolution de type B, incluant les échantillons 2 et 5, on observe 4 phases incluant les phases de type A, avec une phase *a'*, intermédiaire entre les phases *a* et *b*, représentant une diminution rapide du débit (et de la transmissivité) avant d'atteindre le plateau.

Du point de vue géochimique, on assiste à une dissolution de la calcite près de l'équilibre (pH : 6) engendrant des concentrations de Ca dans l'eau entre 370 et 400 mg/l lorsque le plateau est atteint (phase *b*). La durée de cette phase de plateau est d'environ 2 heures dans le cas de l'échantillon 5 et de 6 heures dans le cas de l'échantillon 2. Le taux de dissolution de la calcite est presque constant, variant entre 3 et $3,25 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ dans le cas de l'échantillon 5 alors qu'il varie entre $2,46 \times 10^{-3}$ et $4,36 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ dans le cas de l'échantillon 2 (tableau 13.2). Les résultats du taux de variation de *R'* en fonction du débit montrent en effet un faible taux de variation de $0,001 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ pour l'échantillon 5

mais un taux de variation élevé de $0,113 \text{ g l}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ pour l'échantillon 2. La phase de plateau est plus longue dans le cas de l'échantillon 2 malgré les valeurs du taux de dissolution de la calcite un peu plus élevées. Les surfaces des fractures des veines 5 et 2 (annexe 5 – photos 5 et 2) montrent que le phénomène de dissolution par chenalisation est plus marqué dans le cas de l'échantillon 5, (par rapport à l'échantillon 2) où un large chenal est bien développé sur toute la longueur de la fracture. Dans le cas de l'échantillon 2, la dissolution semble être plutôt généralisée sur presque toute la surface de la fracture (dissolution superficielle dominante). Notons que ce dernier échantillon a précédemment subi des injections à des valeurs de pH 7 et 4. Ceci peut expliquer la phase de plateau plus longue dans son cas.

La concentration de SO_4 subit une diminution dans le cas de l'échantillon 2 tandis qu'elle subit des gains dans le cas de l'échantillon 5, par rapport à la concentration au point d'injection (figures 11.8b et 11.14b). La présence de Fe dans les eaux et sous forme d'hydroxydes sur les surfaces des fractures indique que les réactions d'oxydation des minéraux sulfurés de la matrice rocheuse sont aussi impliquées. Il y a probablement aussi des réactions de précipitation de SO_4 sous forme de gypse, étant donné que son indice I.S. est près du seuil de saturation durant la phase *b*. La présence de Fe dans les eaux et sous forme d'hydroxydes dans les fractures appuie l'hypothèse émise quant à la présence de réactions d'oxydation des sulfures.

Durant les phases *a*, *a'* et *b* de l'essai, la gamme de débit va de 35 à 150 ml/h et celle de la transmissivité de la fracture de 5×10^{-10} à 4×10^{-9} m²/s. Durant la dernière phase *c*, la concentration en ions subit une diminution rapide avec l'augmentation spontanée et rapide du débit (et de la transmissivité).

Les veines des échantillons 2 et 5 possèdent une épaisse couche de minéraux d'environ 3 mm. Le quartz et la calcite forment les deux principaux minéraux. Les cristaux de calcite sont de grande taille, de longueur moyenne d'environ 3,2 mm pour l'échantillon 2 et 1,3 mm pour l'échantillon 5, et allongés perpendiculairement aux parois de la veine. Les cristaux de quartz de plus petite taille, ne dépassent pas 0,5 mm dans le cas de l'échantillon 2 et 0,12 dans le cas de l'échantillon 5; ils sont disposés le long des deux murs entre la calcite et la matrice rocheuse.

L'échantillon 1, compté parmi les échantillons à évolution de type B, constitue une exception avec des valeurs de débit et de transmissivité plus faibles malgré les augmentations de la pression d'injection à plusieurs reprises durant l'essai (augmentation du rapport P_i/P_c). Les concentrations en Ca sont plus faibles que pour les échantillons 2 et 5, entre 90 et 168 mg/l. La veine de l'échantillon 1 possède par contre une épaisseur faible de moins de 1 mm avec des cristaux de calcite de taille très variable, entre 0,04 et 0,4 mm. La proportion des cristaux de calcite semble être beaucoup moindre que dans le cas des autres échantillons et ils sont répartis d'une façon très hétérogène à l'intérieur de la fracture.

Les cristaux de quartz sont de tailles variables aussi mais ne dépassant pas 0,1 mm; ils sont disposés le long des parois de la fracture; par endroits ces cristaux de quartz sont plus abondants que ceux la calcite (annexe 5 – photos 1, et annexe 9 – photos 15 et 16). Ce type de fracture ne serait pas favorable à une importante dissolution de la calcite. En effet, le taux de dissolution de la calcite dans le cas de l'échantillon 1 est plus faible et varie de $0,09 \times 10^{-3}$ à $2,7 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ (tableau 13.2). Les résultats du taux de variation de R' en fonction du débit montrent un taux de $0,025 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. Les réactions de dissolution de la calcite seraient superficielles, n'aboutissant pas à la formation de chenaux, et seraient limitées aux points de contact entre les deux parois de la fracture. Ce type de dissolution permet le rapprochement des deux surfaces de la fracture et par conséquent, une diminution de sa transmissivité. Les valeurs de la transmissivité de la fracture sont faibles et varient de 6×10^{-11} à $2,4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$.

c) Échantillon à évolution de type C

Dans le cas de l'évolution de type C, correspondant à celle de l'échantillon 3, il y a une augmentation continue du débit avec le temps sans passer par la phase de plateau (phase **b**). Les valeurs de la transmissivité sont très élevées, entre $7,8 \times 10^{-9}$ et $6 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$. La présence de gros cristaux de quartz, de taille moyenne d'environ 0,2 mm, et des minéraux sulfurés (pyrite) à l'intérieur de la veine, constituant une typologie particulière à cet échantillon, maintiendrait la fracture ouverte même après dissolution de toute la calcite qui y est présente. L'épaisseur de la veine fracturée ne dépasse tout de même pas les 0,9

mm. Le taux de dissolution de la calcite (avec des cristaux ne dépassant pas 0,9 mm de longueur) dans ce cas est, en effet, très élevé et varie entre $28,5 \times 10^{-3}$ et $65 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$. Le taux de variation de R' en fonction du débit est élevé par rapport à la majorité des cas de l'essai à pH 2, et il est de $0,047 \text{ gl}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ ($R=0,98$). La gamme des concentrations de Ca libéré dans l'eau va de 350 à 400 mg/l, soit des valeurs à peu près égales à celles observées dans les cas d'échantillons suivant une évolution des types A ou B.

d) Échantillon à évolution de type D

Le quatrième type d'évolution d'échantillons est celui de type D (cas de l'échantillon 7). Il comprend les trois phases *a*, *a'* et *b* du débit et de la transmissivité en fonction du temps, sans la phase d'augmentation (phase *c*) de ces deux paramètres vers la fin de l'essai (figure 12.1). Les valeurs de transmissivité très faibles varient entre $1,6 \times 10^{-12}$ et $1,7 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$. Les processus de précipitation de minéraux, essentiellement les hydroxydes de fer, dominent les processus de la dissolution de minéraux tels que la calcite. Il en résulte une diminution de l'ouverture de la fracture et par conséquent de sa transmissivité. Les ions SO_4 et Fe seraient issus de l'oxydation des minéraux sulfurés. Le Fe précipite sous forme d'hydroxydes de fer. Le SO_4 peut précipiter avec le Ca en gypse étant donné les conditions favorables. Les valeurs de concentration de Ca sont plus faibles que dans le cas des autres types d'évolution, variant de 30 à 250 mg/l; ces faibles valeurs peuvent être dues aux faibles débits générés dès le début de l'essai (0 - 3 ml/h), et ceci malgré le rapport P_i/P_c relativement élevé (0,067) dans son cas, en comparaison avec la

plupart des autres échantillons injectés à pH 2. Le taux de dissolution de la calcite dans le cas de l'échantillon 7 est le plus faible de tous les essais à pH 2, et varie entre $0,009 \times 10^{-3}$ et $0,44 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ (tableau 13.2). Le taux de variation de R' en fonction du débit est par contre le plus élevé de tous les essais à pH 2, et il est de $0,23 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ ($R=95$). La précipitation favorisée de certains minéraux, tels que de gypse, contribuerait à la diminution de l'ouverture de la fracture. L'évolution du pH vers des valeurs plus acides que dans le cas des autres essais à pH 2, soit vers un pH autour de 5, est la conséquence d'une faible cinétique de dissolution de la calcite. Du point de vue minéralogique, la fracture possède les mêmes types et le même arrangement de minéraux que dans la plupart des échantillons testés à pH 2, avec les cristaux de calcite de longueur moyenne d'environ 1,7 mm et ceux de quartz ne dépassant pas 0,18 mm. L'épaisseur de la veine de l'échantillon 7 varie entre 2,7 et 3,2 mm. La structure interne de la fracture joue donc un rôle important sur son comportement hydraulique et sur son comportement hydrochimique.

e) Comparaisons entre les types d'évolution des échantillons

Dans le cas de l'évolution de type A des échantillons 4 et 6, une diminution du rapport P_i/P_c n'implique pas une diminution du débit d'eau ou du moins pas très importante, 24 ml/h pour l'échantillon 4 sous un rapport $P_i/P_c=0,089$ comparé à 20 ml/h pour l'échantillon 6 sous un rapport $P_i/P_c=0,017$; cela n'implique pas non plus une diminution de la transmissivité de la fracture, $2 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'échantillon 4 comparé à $6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'échantillon 6 (tableau 12.1). De plus, la durée des deux essais ne semble

pas être influencée par la variation de ce rapport. Le même type de comportement est remarqué dans le cas des échantillons dont l'évolution est classée de type B. La structure interne très variable d'une fracture à une autre jouerait un rôle plus déterminant que celui du rapport P_i/P_c sur le comportement hydraulique et chimique de ces fractures. Dans le cas de l'échantillon 1, qui a subi plusieurs variations du rapport P_i/P_c durant l'essai, on note cependant une augmentation générale du débit et de la transmissivité avec l'augmentation de ce rapport.

Dans la plupart des résultats des essais à pH 2, l'augmentation de la transmissivité de la fracture se fait d'une façon spontanée et rapide indépendamment du rapport P_i/P_c . Cette augmentation de la transmissivité de la fracture est spontanée malgré que la dissolution de la calcite s'effectue dès le début de l'essai et de façon continue. Deux phénomènes peuvent être responsables de ce type de comportement hydraulique. Le premier phénomène représente une dissolution de la calcite superficielle (limitée à la surface) et aux points de contact des deux surfaces de la fracture, libérant le Ca et les ions carbonates d'une façon continue dans l'eau. En même temps, il y a rapprochement de ces deux surfaces de la fracture ne permettant pas d'augmentation de la transmissivité. En parallèle à ce premier phénomène, il y a une dissolution de la calcite plus profonde sur les surfaces de la fracture qui se propage dans le sens de l'écoulement de l'eau (deuxième phénomène) formant ainsi un chenal. Dépendamment de l'ampleur de cette dissolution

(largeur versus profondeur), ce n'est que lorsque le chenal atteint le côté de la sortie de la fracture qu'il y a cette augmentation spontanée et rapide de sa transmissivité.

Dans le cas de l'échantillon 7 de l'évolution de type D, le stade de formation d'un chenal nécessiterait plus de temps pour aboutir au même résultat hydraulique (phase c) que dans le cas des autres essais à pH 2.

On peut noter que, à l'exception de l'essai sur l'échantillon 7, la plupart des essais à pH 2, montrent une diminution de la concentration de Ca dans l'eau avec l'augmentation du débit d'eau moyen. Le taux de dissolution de la calcite montre plutôt une corrélation positive avec le débit dans un premier temps impliquant une augmentation de ce taux avec le débit jusqu'à un seuil de ce dernier (à l'exception de l'échantillon 7); puis dans un deuxième temps, il y a une corrélation négative due à l'écoulement préférentiel de l'eau qui prend place le long des chenaux créés dans les veines fracturées. Ce phénomène d'écoulement restreint la surface de la fracture qui entre en contact avec l'eau circulante; de plus, cette eau n'a pas le temps d'atteindre des concentrations élevées.

En général, les processus chimiques impliquant l'ion SO_4 , telles que l'oxydation des sulfures de la matrice permettant une augmentation de la concentration de cet ion, et de la précipitation permettant la diminution de sa concentration, ne semblent pas être beaucoup influencés par le débit d'eau et la transmissivité. La corrélation entre SO_4 et les paramètres

hydrauliques, qui est généralement négative, est faible à l'exception de l'échantillon 7 où elle est élevée ($R=-0,7$). L'échantillon 2, par contre, présente une forte corrélation positive entre le SO_4 et les paramètres hydrauliques étudiés; celui-ci appartient à la série d'essais multiples.

13.3 CAS DES ESSAIS À PH 2,5

13.3.1 Échantillon 8

Dans le cas de l'échantillon 8 injecté à l'eau à pH 2,5, l'augmentation de la concentration de Ca dans l'eau à des valeurs comprises entre 50 et 67 mg/l (figure 11.20b) témoigne de la dissolution de la calcite présente dans la fracture (annexe 5 – photos 8 et annexe 9 – photos 29 et 30). Les conditions de sous-saturation en calcite des eaux dans la majorité des cas sont en faveur de la dissolution continue de la calcite le long de l'essai (figure 13.28a). Il en résulte une évolution du pH proche de la neutralité, entre 6 et 7, au cours de l'essai.

La concentration de SO_4 subit des variations, tantôt avec une augmentation tantôt avec une diminution, par rapport à sa valeur au point d'injection (147 mg/l) (figure 11.20b; tableau 12.2). L'augmentation de la concentration en SO_4 , jusqu'à environ 185 mg/l, durant l'essai suggère qu'il y a une oxydation des minéraux sulfurés de la matrice. Cette

hypothèse est, en effet, appuyée par l'augmentation de la concentration de Fe à environ 25 mg/l (figure 11.20c). La diminution de la concentration de SO_4 , jusqu'à 117 mg/l, implique sa précipitation sous forme de minéraux secondaires, tel que le gypse. Les valeurs de I.S. du gypse et de l'anhydrite négatives et qui sont près de la saturation pendant tout l'essai (figure 13.28a) ne sont, cependant, pas en faveur de la précipitation de ces minéraux. La corrélation négative ($R=-0,61$) qui existe entre le Ca et le SO_4 implique que les processus de dissolution de la calcite se réalisent en même temps que celles de la précipitation de SO_4 .

La quantité réelle de Fe libéré dans l'eau est beaucoup plus élevée que ne l'indique la concentration mesurée de 25 mg/l dans les eaux recueillies, puisqu'un dépôt important d'hydroxydes est remarqué sur les deux surfaces de la fracture après l'essai (annexe 5 – photos 8). La sursaturation des eaux en goethite et en hématite avec des I.S., atteignant 5 et 15 respectivement, favorise leur précipitation (figure 13.28d).

L'évolution différente de l'alcalinité par rapport à celle de Ca suggère qu'il y a un apport d'ions bicarbonates provenant des minéraux autres que la calcite. Les erreurs expérimentales liées à la mesure des carbonates peuvent aussi être la cause de cette variation. Dans le cas des autres ions mineurs, le Na proviendrait des feldspaths; et le Mn se trouverait comme élément en trace dans la calcite.

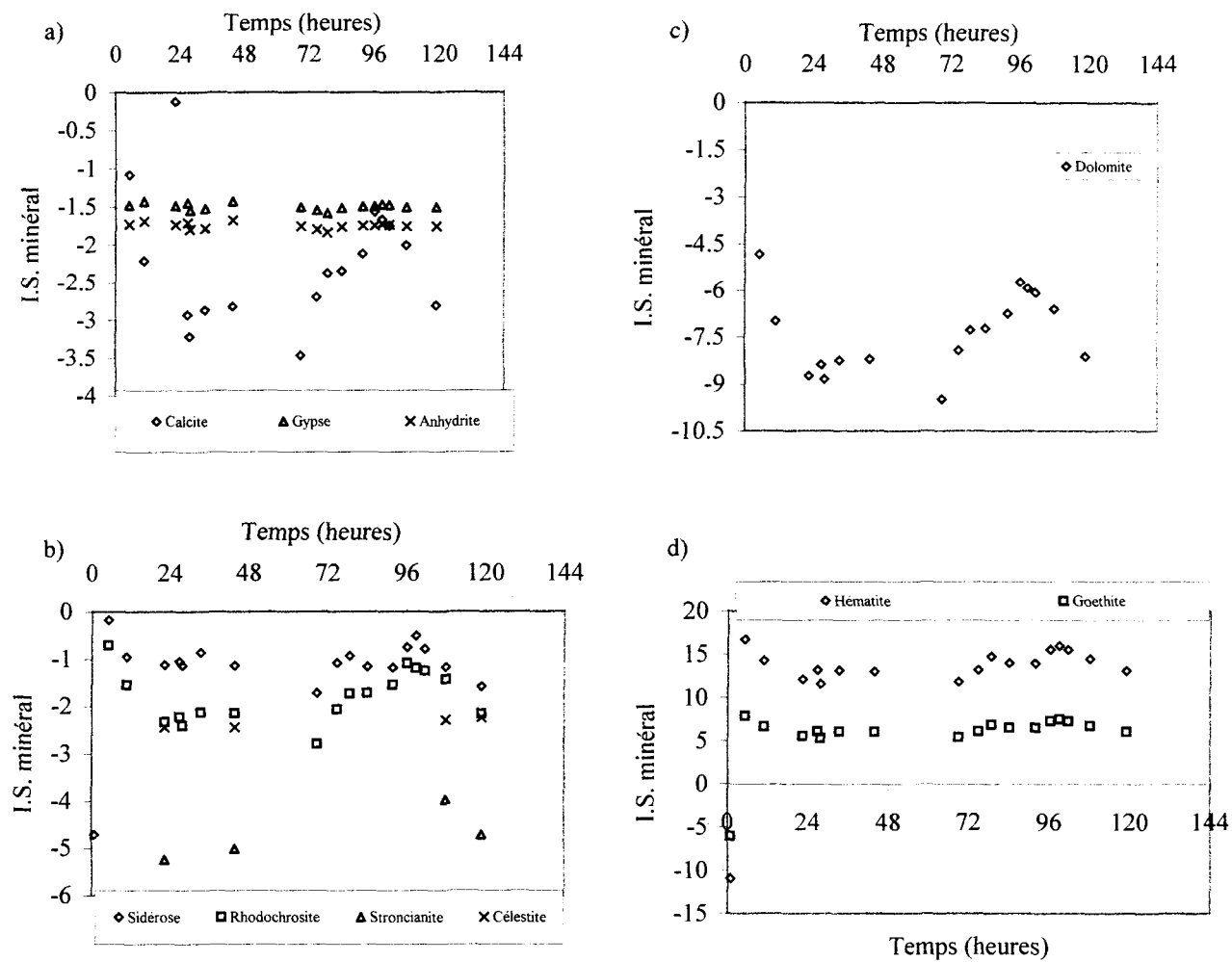


Figure 13.28 : Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 8 à pH 2,5.

La variation de la concentration en ions semble être influencée par le comportement hydraulique de la fracture. En effet, à des diminutions du débit et de la transmissivité, dont les gammes générales vont de 10 à 30 ml/h et de 5×10^{-11} à $1,6 \times 10^{-10}$ m²/s respectivement (figure 11.19), correspond une diminution de la concentration de Ca et une augmentation de celle de SO₄ (figure 11.20b). Cependant, les graphiques de Ca en fonction du débit moyen et de la transmissivité moyenne montrent une très faible corrélation positive ($R=0,28$), ce qui implique que les concentrations de Ca restent généralement constantes indépendamment du débit et de la transmissivité (figure 13.29). Cette variation de Ca, qui est faible durant l'essai, est probablement due à un faible taux de dissolution de la calcite dans la fracture. Le graphique du taux de dissolution de la calcite et du débit en fonction du temps montre, en effet, beaucoup de variation de ce taux, entre $0,06 \times 10^{-3}$ et $0,21 \times 10^{-3}$ gl⁻¹cm⁻²h⁻¹, indépendamment de l'évolution du débit d'eau durant l'essai (figure 13.30a). Le graphique du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit montre une faible corrélation positive (0,43) entre ces deux paramètres (figure 13.30b); la pente de la droite décrivant cette tendance est de $0,004$ gl⁻²cm⁻² pour une gamme des débits allant de 11 à 38 ml/h. La réaction de dissolution de la calcite serait gênée par l'importante précipitation des hydroxydes sur les surfaces de la fracture.

On remarque, cependant, une faible corrélation négative ($R=-0,49$) entre le SO₄ et le débit d'eau moyen et la transmissivité moyenne (figure 13.29). La concentration de Fe ne suit pas toujours celle de SO₄ étant donné son importante précipitation sous forme

d'hydroxydes; la corrélation positive entre ces deux éléments reste quand même significative ($R=0,66$) (figure 12.22b). Le dépôt d'hydroxydes de fer généralisé sur les surfaces de la fracture contribue, avec le phénomène de dissolution de la calcite superficielle et aux points de contact, à réduire le volume des vides de cette fracture, et par conséquent à la diminution de sa transmissivité vers la fin de l'essai. Une dissolution plus profonde sur les surfaces de la fracture a permis le développement d'un chenal du côté de l'entrée jusqu'à environ la moitié de la longueur de la fracture (annexe 5 - photos 8).

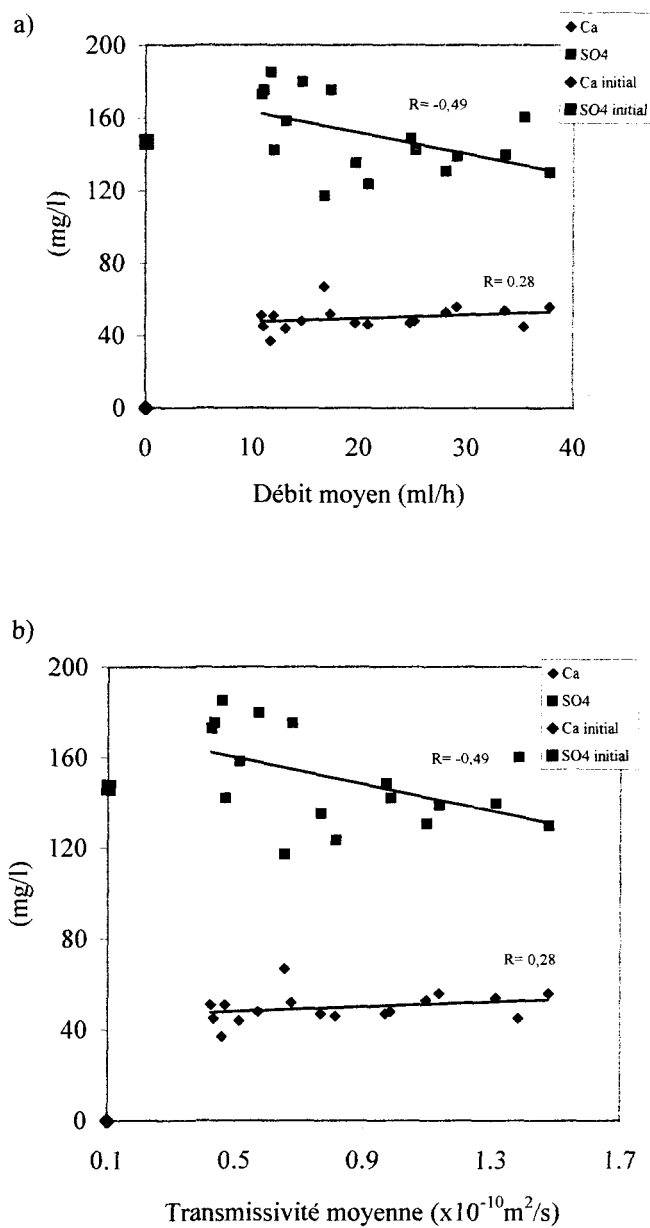


Figure 13.29: Ca et SO₄ en fonction du débit moyen (a) et de la transmissivité moyenne (b) pour l'échantillon 8 à pH 2,5.

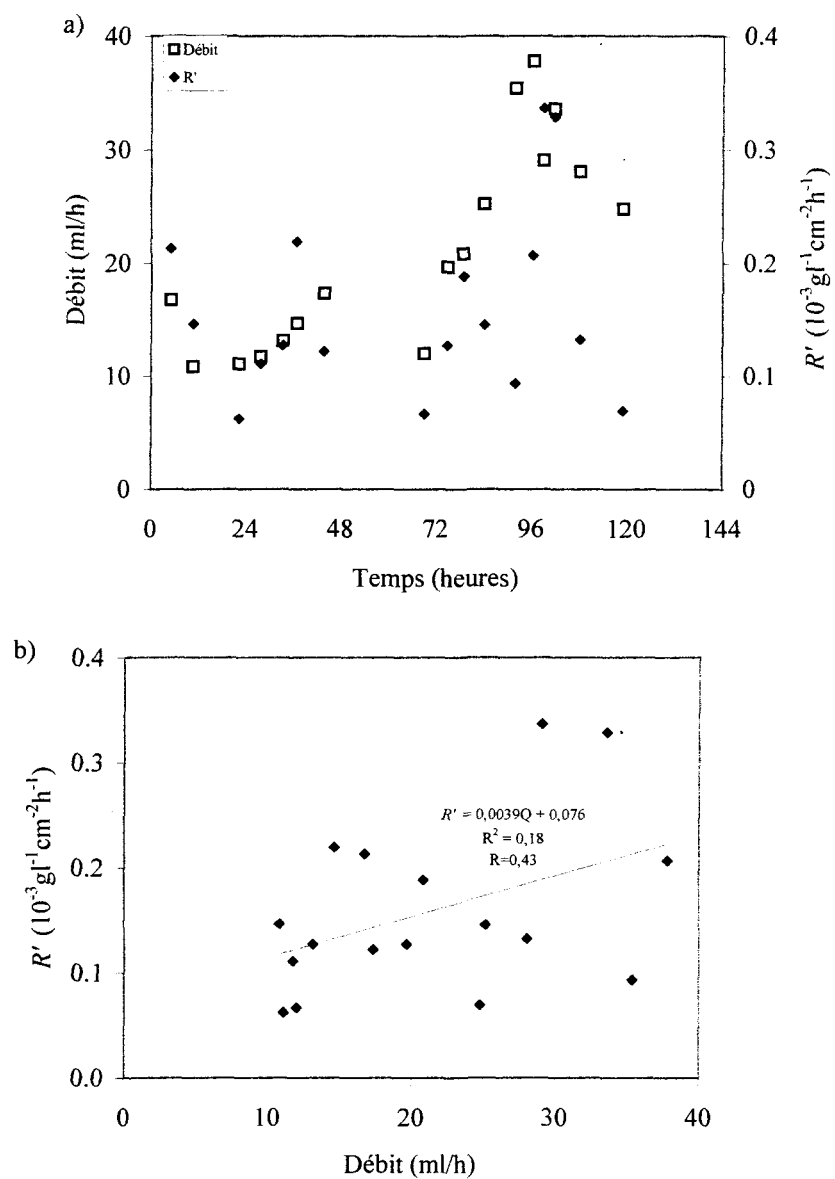


Figure 13.30: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 8 à pH 2,5.

13.3.2 Échantillon 9

Les résultats géochimiques de l'échantillon 9 injecté à l'eau à pH 2,5 montrent que dans le cas de Ca, les concentrations dans l'eau atteignant 50 à 60 mg/l (figure 11.22b) témoignent de la dissolution de la calcite présente dans la veine (annexe 5 – photos 9; annexe 9 – photos 31 et 32). Les eaux récupérées à la sortie de la fracture sont sous-saturées en calcite et en aragonite (I.S. entre -2 et -1), ce qui est en faveur de la dissolution continue de la calcite durant l'essai (figure 13.31). Il en résulte une évolution du pH proche de la neutralité, entre 6 et 7, au cours de l'essai.

La grande variation de la concentration de SO_4 avec généralement des gains par rapport à la valeur au point d'injection (170 mg/l), jusqu'à 200 mg/l durant l'essai (figure 11.22b), implique une oxydation des sulfures présents dans la matrice rocheuse. L'augmentation de la concentration en métaux, en particulier celle de Fe qui atteint des maxima de 22 mg/l (figure 11.22c), ainsi que l'important dépôt d'hydroxydes de fer sur les surfaces de la fracture observé après l'essai appuient l'hypothèse d'oxydation des sulfures. La sursaturation des eaux en goéthite et en hématite est en faveur de la précipitation des hydroxydes dans la fracture (figure 13.31b).

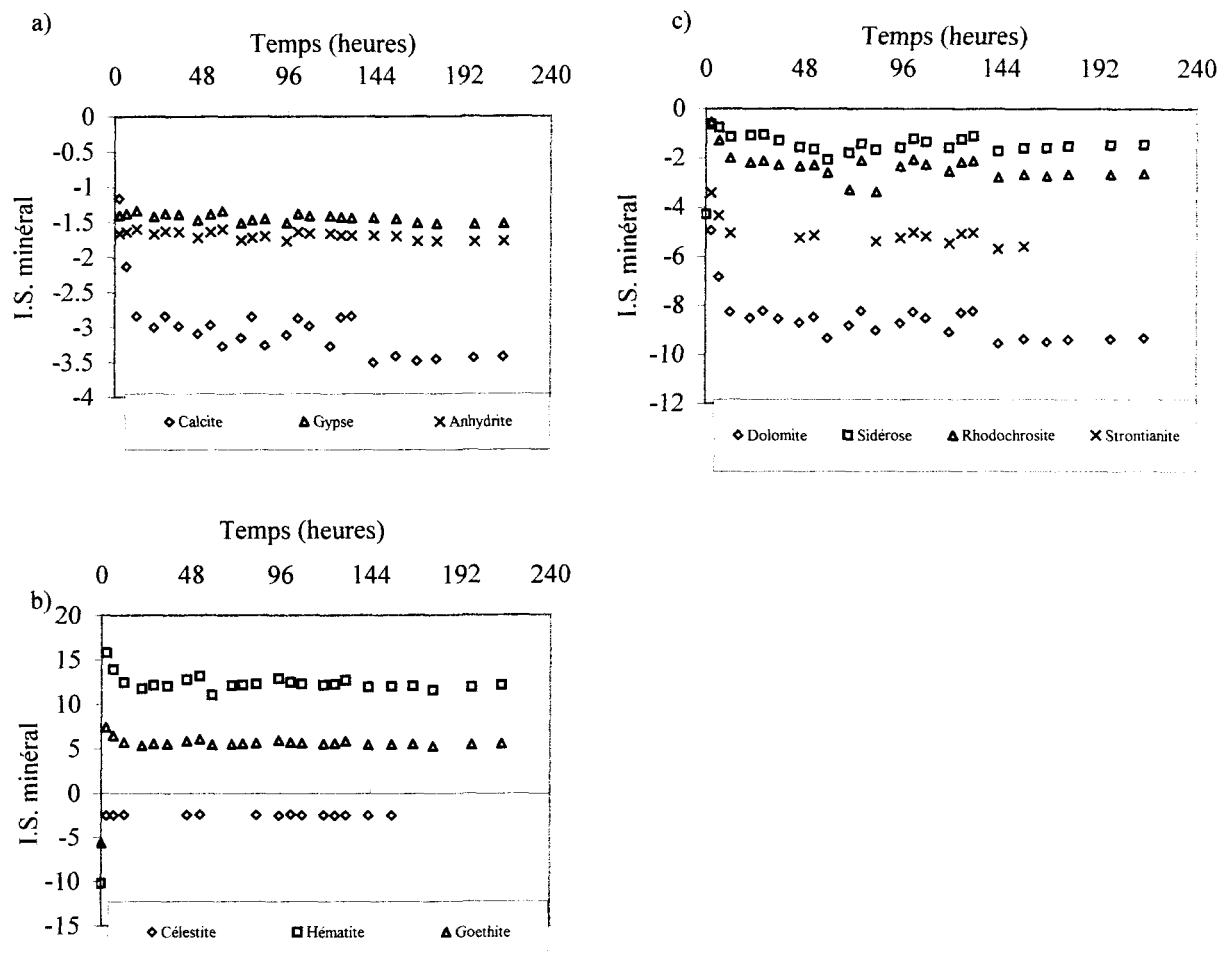


Figure 13.31: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 9 à pH 2,5.

La sous-saturation des eaux en gypse et en anhydrite ne favorise pas leur précipitation (figure 13.31a). Ce résultat est concordant avec celle de la concentration de SO_4 qui ne descend pas plus bas que la valeur au point d'injection. L'indice de saturation des autres minéraux, tels que la rhodochrosite, en-dessous de la saturation ne permet pas la précipitation de l'ion Mn. Le Mn existerait en trace dans la calcite alors que le Na proviendrait de la dissolution des feldspaths dans la matrice.

La grande variation du débit et de la transmissivité, entre 8 et 30 ml/h et entre $1,5 \times 10^{-10}$ et $4,9 \times 10^{-10}$ m²/s respectivement, semble causée la variation de la concentration en ions dans l'eau (figures 11.21 et 11.22; tableau 12.2), en particulier celle des ions SO_4 et Fe. Les graphiques de SO_4 en fonction du débit d'eau et de la transmissivité ne montrent, cependant, pas de tendance bien nette entre le SO_4 et les deux paramètres hydrauliques ($R=0,1$); on observe plutôt une dispersion des données (figure 11.32). La variation de la concentration de SO_4 serait due à un enrichissement (par les réactions d'oxydation) ou à l'appauvrissement (par les réactions de précipitation) spontanée en cet ion dans l'eau. La concentration de Ca, par contre, est stable quels que soient le débit et la transmissivité ($R=0,1$) (figure 13.32). Les gammes de débit et de transmissivité durant cet essai s'étalent de 12 à 24 ml/h et de $1,9 \times 10^{-10}$ à $3,8 \times 10^{-10}$ m²/s respectivement.

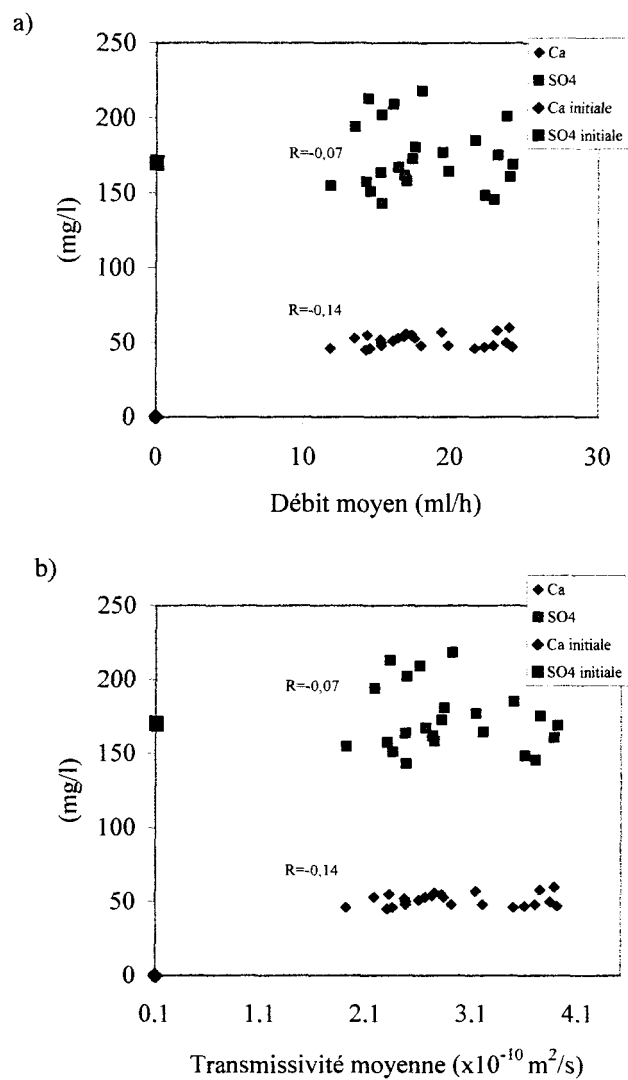


Figure 13.32: Ca et SO_4 en fonction du débit moyen (a) et de la transmissivité moyenne (b) pour l'échantillon 9 à pH 2,5.

Le graphique du taux de dissolution de la calcite et du débit en fonction du temps montre beaucoup de variation, entre $0,04 \times 10^{-3}$ et $0,39 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$, mais ce taux ne suit pas toujours l'évolution du débit d'eau durant l'essai (figure 13.33a). Le graphique du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit montre une faible corrélation positive (0,26) entre ces deux paramètres (figure 13.33b). La pente de droite décrivant cette tendance est de $0,005 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$ pour une gamme des débits allant de 12 à 24 ml/h. La grande variation du taux de dissolution de la calcite durant l'essai serait due aux réactions de précipitation intenses des hydroxydes sur les surfaces de la fracture.

La diminution générale de la transmissivité de la fracture durant l'essai serait due à la précipitation importante d'hydroxydes de fer sur les surfaces de la fracture et au faible taux de dissolution de la calcite. Ce phénomène de précipitation d'hydroxydes permet une diminution des espaces des vides et par conséquent une diminution de la transmissivité de la fracture vers la fin de l'essai. En parallèle à la dissolution de la calcite superficielle, un deuxième type de dissolution de la calcite plus profonde s'est produit sur les surfaces de la fracture; ce type de dissolution a créé un chenal qui s'est propagé à partir de l'entrée de la fracture jusqu'à environ la moitié de sa longueur (annexe 5 – photos 9).

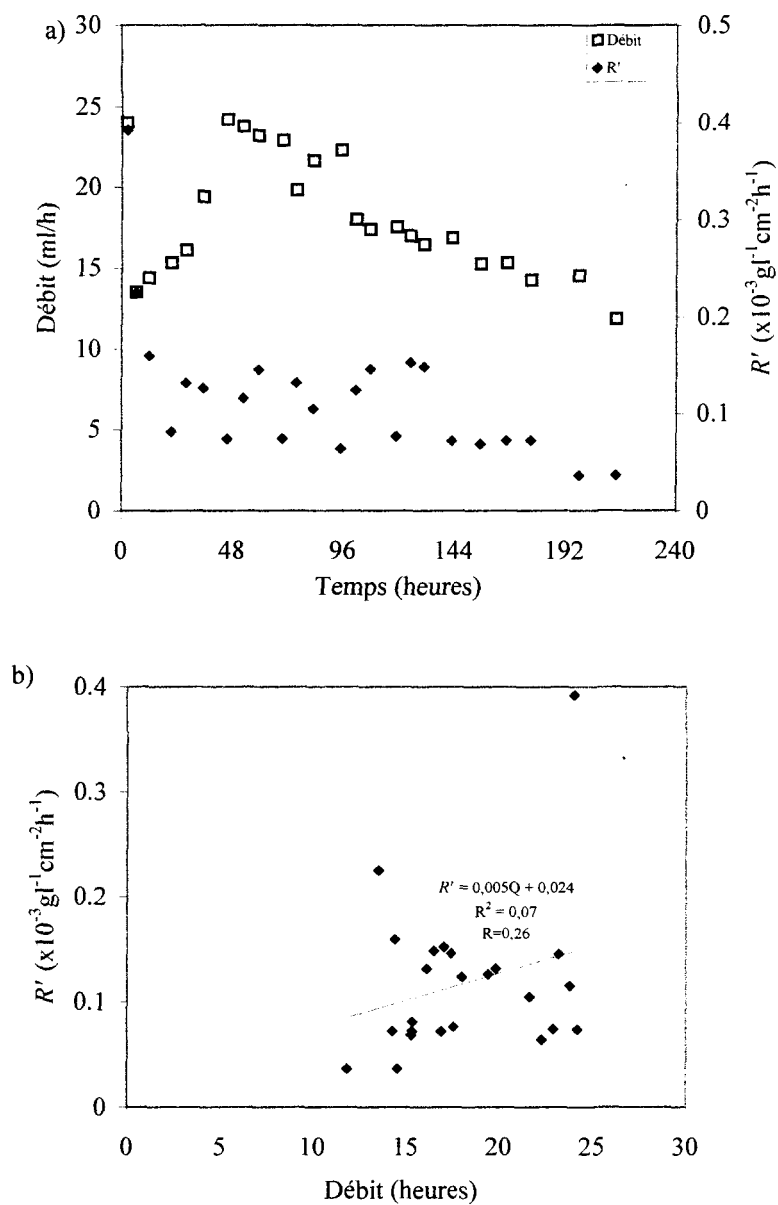


Figure 13.33: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 9 à pH 2,5.

13.3.3 Échantillon 10

Dans le cas de l'échantillon 10 injecté à l'eau à pH 2,5, la concentration élevée en Ca qui atteint un maximum de 200 mg/l (figure 11.24b) est une conséquence de la dissolution de la calcite abondamment présente dans la veine fracturée (annexe 5 – photos 10; annexe 9 - photos 33 et 34). Les graphiques de I.S. en fonction du temps (figure 13.34a) montrent que les eaux récupérées sont sous-saturées en calcite, condition en faveur de la dissolution de ce minéral. Malgré la dissolution plus importante et continue de la calcite durant l'essai, le pH y évolue proche des valeurs acides, en partant des valeurs neutres dans les premières eaux récupérées (entre 0 et 24 heures) à des valeurs proches de 5 vers la fin de l'essai (figure 11.24a). Le SO_4 subit une augmentation importante de sa concentration durant l'essai de 167 mg/l, valeur au point d'injection, à 585 mg/l (figure 11.24b). Cette augmentation de SO_4 serait due à une importante oxydation des minéraux sulfurés dans la matrice. L'augmentation de la concentration de Fe de 0 à 49 mg/l (figure 11.24c), en plus de l'important dépôt d'hydroxydes dans la fracture (annexe 5 – photos 10), appuie cette dernière hypothèse. Les ions SO_4 et Fe ont, en effet, une corrélation positive ($R=0,73$) (tableau 12.2). Les indices de saturation négatifs de gypse et de l'anhydrite évoluent très proches de la saturation ne permettant pas leur précipitation. Par contre, les indices de saturation de la goethite et de l'hématite sont au-dessus du seuil de saturation et donc en faveur de la précipitation de ces minéraux; ce résultat est concordant avec les

observations macroscopiques des surfaces de la fracture qui révèlent d'importants dépôts d'hydroxydes sur ces dernières.

La corrélation positive qui existe entre Ca et SO_4 ($R=0,8$) (figure 12.26), avec une proportion de SO_4 d'une fois et demi celle de Ca, indique que les réactions de dissolution de la calcite et de l'oxydation des minéraux sulfurés se produisent en même temps durant l'essai. L'évolution du pH vers des valeurs plus acides, surtout après 24 heures d'essai, serait due à un apport d'ions H^+ de plus en plus élevé issue des réactions d'oxydation des sulfures.

L'ion Na proviendrait des feldspaths dans la matrice; les ions Sr et Mg proviendraient des carbonates; l'ion Mg peut aussi provenir des micas; et l'ion Mn serait un élément trace dans la calcite. L'indice de saturation de la rhodochrosite, de la strontianite, de la dolomite et de la célestite sont en-dessous du seuil de saturation, en faveur de la libération de ces ions mineurs dans l'eau (figure 13.34).

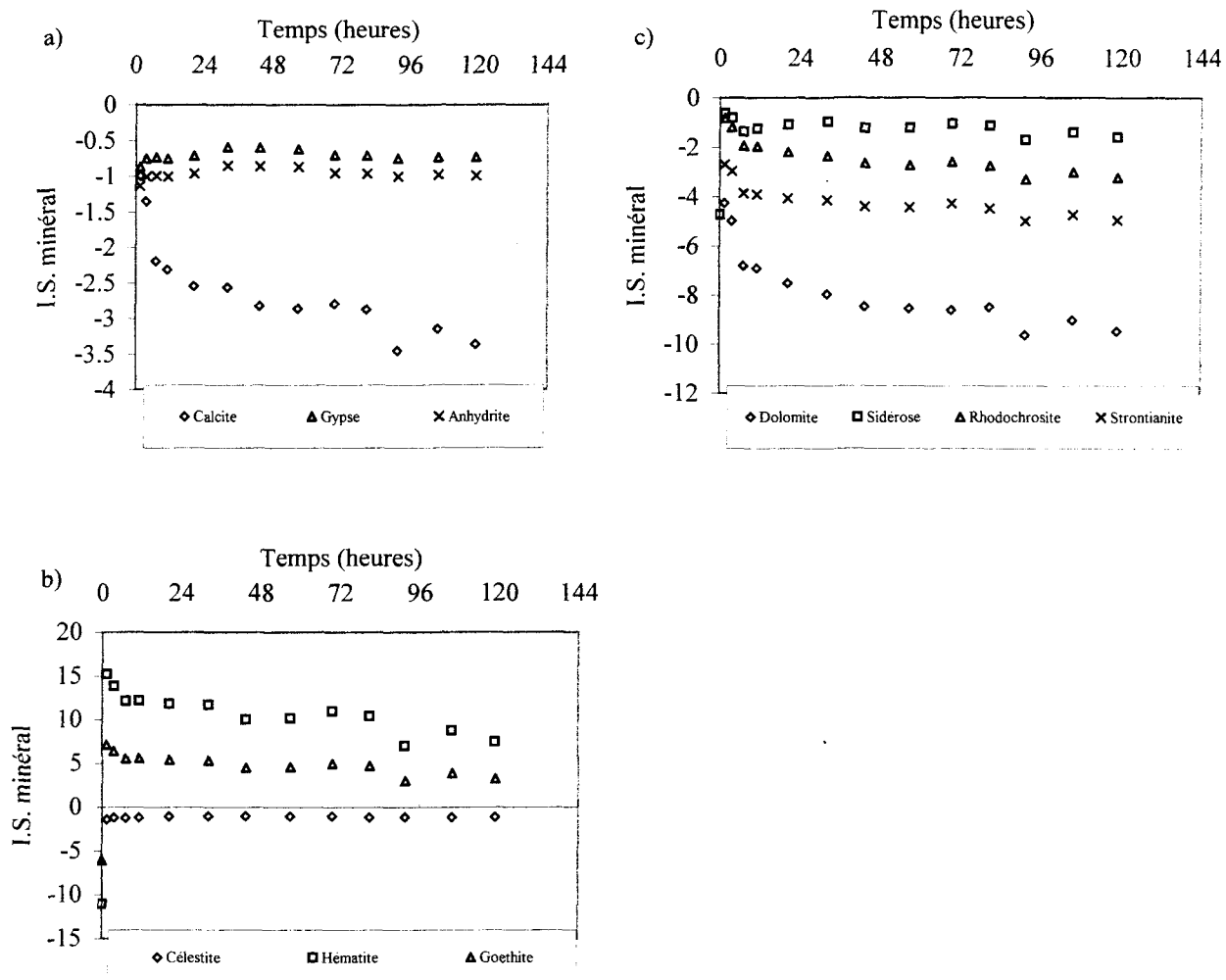


Figure 13.34: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 10 à pH 2,5.

Le comportement hydraulique de la fracture influe sur les réactions chimiques entre l'eau injectée et les minéraux de la veine fracturée. En effet, les réactions d'oxydation des sulfures sont plus prononcées lorsque le débit et la transmissivité sont faibles, après 24 heures d'essai. Les concentrations de SO_4 et de Fe atteignent des valeurs élevées, variant de 488 à 586 mg/l et de 42 à 49 mg/l respectivement. Les valeurs de débit et de transmissivité sont plus faibles, soit environ 6 ml/h et $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement. Évidemment, les quantités réelles de Fe dissout sont plus élevées que ne l'indiquent les concentrations mesurées, étant donné qu'une grande proportion du Fe a précipité. La dissolution de la calcite semble rester constante durant l'essai sans être affectée par la variation du débit et de la transmissivité. Les tracés de Ca et de SO_4 en fonction du débit et de la transmissivité confirment ces résultats avec une forte corrélation négative entre SO_4 et les paramètres hydrauliques ($R=-0,82$), et une plus faible corrélation négative entre le Ca et les paramètres hydrauliques ($R=-0,42$) (figure 13.35). La gamme des valeurs de ces paramètres hydrauliques va de 6 à 33 ml/h dans le cas du débit et de $8,1 \times 10^{-11}$ à $4,9 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le cas de la transmissivité.

Le graphique du taux de dissolution de la calcite et du débit en fonction du temps montre une diminution de ce taux dès le début de l'essai avec la diminution du débit, de $1,61 \times 10^{-3}$ à $0,19 \times 10^{-3} \text{ g l}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, valeur enregistrée vers la fin, après 120 heures d'essai (figure 13.36a). Le graphique du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit

montre une forte corrélation positive ($R=0,98$) entre ces deux paramètres (figure 13.36b). La pente de droite décrivant cette tendance est de $0,044 \text{ g l}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ pour une gamme des valeurs de débit allant de 6 à 33 ml/h. La dissolution de la calcite limitée à la surface (dissolution superficielle) et au point de contact permet de réduire l'espace des vides dans la fracture, et par conséquent elle cause une diminution de sa transmissivité vers la fin de l'essai. La précipitation importante des hydroxydes contribue aussi à cette diminution de la transmissivité.

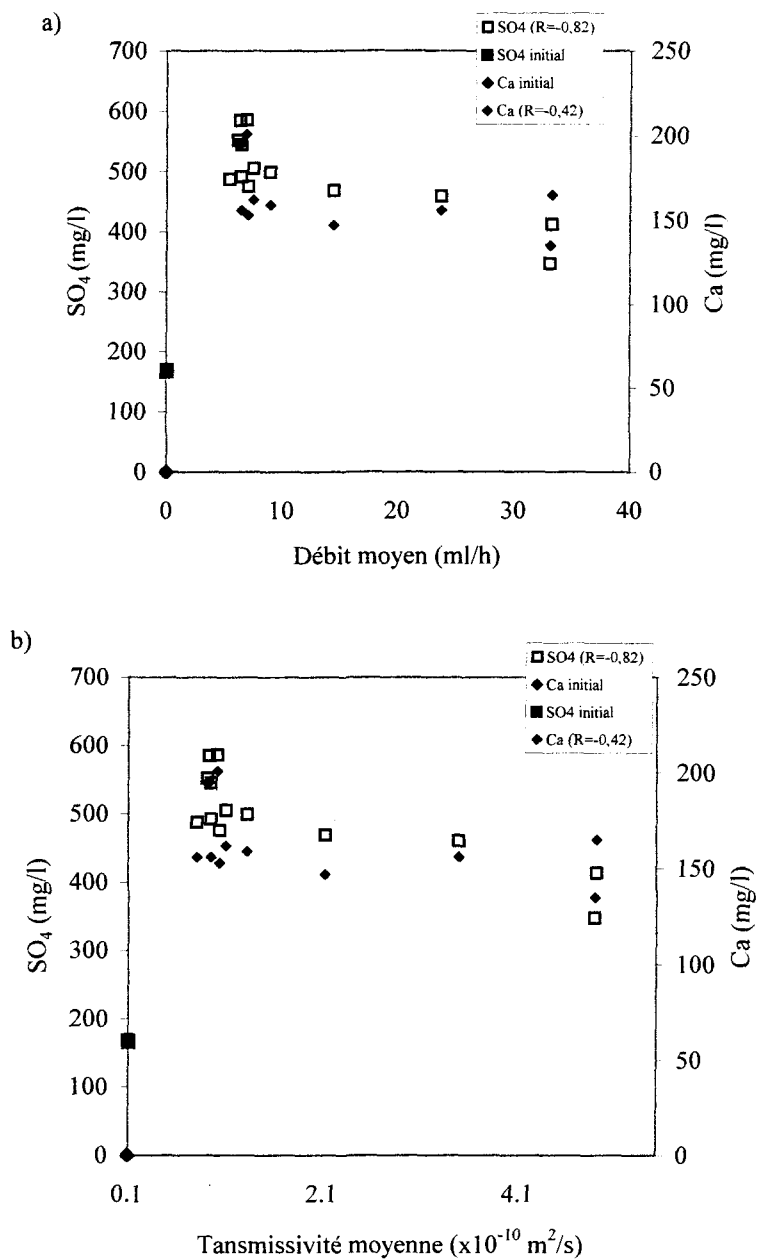


Figure 13.35: Ca et SO_4 en fonction du débit moyen (a) et de la transmissivité moyenne (b) pour l'échantillon 10 à pH 2,5.

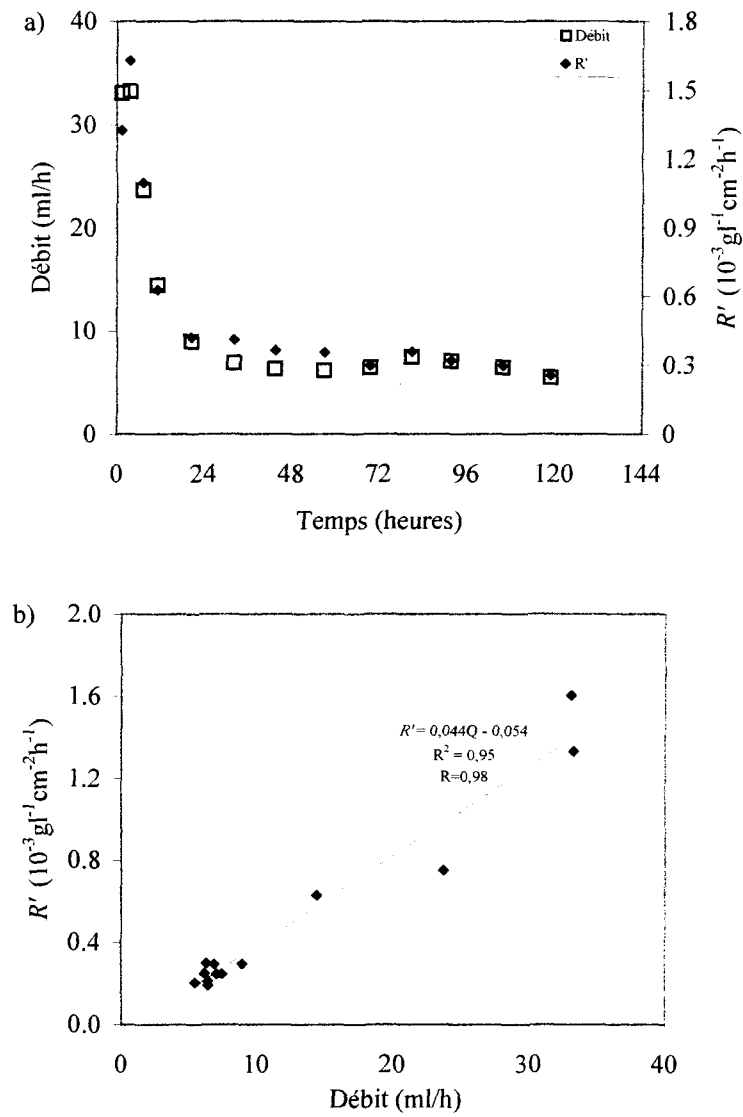


Figure 13.36: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a), et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 10 à pH 2,5.

13.3.4 Interprétation générale des essais à pH 2,5

Les échantillons 8 et 9 présentent une évolution de type E (figure 12.2) et ont un même comportement hydraulique et chimique. Le débit et la transmissivité subissent plusieurs fluctuations au cours de l'essai entre 8 et 30 ml/h et entre 4×10^{-11} à 5×10^{-10} m²/s respectivement (phases *a* et *a''*) (figure 12.2). On observe une corrélation positive, mais faible, entre la concentration de Ca et les paramètres hydrauliques. La gamme des valeurs de concentration de Ca va de 50 à 67 mg/l. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , est faible et très variable en fonction du temps; il varie entre $0,04 \times 10^{-3}$ et $0,4 \times 10^{-3}$ gl⁻¹cm⁻²h⁻¹ (tableau 13.3). Le débit ne semble par avoir une influence notable sur le taux de dissolution de la calcite, étant donné la faible corrélation entre ces deux paramètres. La variation du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit est presque constante; elle est de 0,004 gl⁻²cm⁻² dans le cas de l'échantillon 8, et de 0,005 gl⁻²cm⁻² dans le cas de l'échantillon 9.

La dissolution continue de la calcite génère un pH proche de l'équilibre, soit aux environs de 6. Durant ces processus de dissolution de la calcite, il y a aussi une oxydation des minéraux sulfurés présents dans la matrice rocheuse, libérant des ions SO₄ et Fe dans l'eau. Le SO₄ semble précipiter parfois sous forme de minéraux secondaires, tels que le gypse, alors que la précipitation de Fe en grande partie en hydroxydes de fer est évidente.

Les quantités réelles de Fe qui entrent dans l'eau par les réactions d'oxydation sont plus élevées que ne l'indiquent les concentrations mesurées, qui varient de 0 à 25 mg/l, car une importante quantité de Fe est précipitée sous forme d'hydroxydes sur les surfaces des fractures.

Les veines des deux échantillons ont à peu près la même minéralogie : la calcite comme minéral principal avec des cristaux de plus grande taille, de longueur moyenne d'environ 2,1 mm dans le cas de l'échantillon 8, et de 2,6 mm dans le cas de l'échantillon 9; et le quartz avec des cristaux de plus petite taille, ne dépassant pas 0,1 mm dans les deux échantillons, séparant la calcite et la matrice rocheuse (annexe 9 – photos 29, 30, 31 et 32). La variation de la transmissivité de la fracture serait due à la grande instabilité réactionnelle d'oxydation et de précipitation à l'intérieur de la fracture durant l'essai. La dissolution de la calcite est probablement ralentie par l'ampleur du phénomène de précipitation des hydroxydes. La dissolution profonde de la calcite à l'intérieur des surfaces de la fracture induit une chenalisation qui se propage dans le sens de l'écoulement sur presque la moitié de la longueur des fractures. En parallèle, il y a aussi une dissolution superficielle de la calcite et aux points de contact entre les parois de la fracture. Ce type de dissolution superficielle de la calcite avec la précipitation importante des hydroxydes permettrait une diminution de l'espace des vides de la fracture et par conséquent une diminution de sa transmissivité.

L'échantillon 10, à évolution de type D (figure 12.2), est le seul cas (parmi les échantillons injectés à l'eau de pH 2,5) où on observe une évolution régulière sans variation importante du débit et de la transmissivité avec le temps (phases *a*, *a'* et *b*) avec des gammes de valeurs allant de 6 à 37 ml/h et de 1×10^{-10} à $5,5 \times 10^{-10}$ m²/s respectivement. La concentration de Ca élevée, variant de 165 à 200 mg/l, indique des réactions de dissolution plus importantes; elle présente une corrélation négative mais faible avec les paramètres hydrauliques ($R=-0,4$). Le taux de dissolution de la calcite est plus élevé et stable, et il décrit une forte corrélation positive avec le débit ($R=0,98$); il varie entre $0,2 \times 10^{-3}$ et $1,6 \times 10^{-3}$ gl⁻¹cm⁻²h⁻¹ (tableau 13.3). La variation du taux de dissolution par unité de surface en fonction du débit est plus élevée et elle est de 0,044 gl⁻²cm⁻². Les réactions d'oxydation dans le cas de l'échantillon 10 sont aussi importantes. En effet, la concentration de SO₄ subit une augmentation durant l'essai de 167 mg/l, sa valeur au point d'injection, à environ 585 mg/l; celle-ci présente une forte corrélation négative avec les paramètres hydrauliques ($R=-0,82$). La concentration de Fe augmente aussi jusqu'à environ 49 mg/l, même si une quantité importante de Fe est déposée sous forme d'hydroxydes dans la fracture durant l'essai.

Tableau 13.3: Résumé des résultats du taux de dissolution de la calcite pour les essais à pH 2,5.

Type d'évolution	Échantillon no.	Pc (MPa) / Pi (MPa)	Rapport Pi/Pc	R' ($\times 10^{-3} \text{gl}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$)	Q moyen (ml/h)	Équation de la droite de R' versus Q	Corrélation R R' -Q	Durée totale de l'essai
E	8	8,26 / 2,2	0,267	0,06 - 0,21	11 - 38	0,004xQ	0,43	120h
E	9	12,38 / 0,55	0,044	0,04 - 0,39	12 - 24	0,005xQ	0,26	216h
D	10	16,51 / 0,55	0,033	0,19 - 1,61	6 - 33	0,044xQ	0,98	120h

P_c : Pression de confinement

P_i : Pression d'injection

R' : Taux de dissolution de la calcite

Du point de vue minéralogique, la veine de l'échantillon 10, d'épaisseur variant entre 5 et 8 mm, est formée de plusieurs générations de gros cristaux de calcite de taille pouvant aller jusqu'à 3 mm de longueur et de cristaux de quartz de taille variée, ne dépassant pas 1,4 mm. La présence des deux types de cristaux, la calcite et le quartz, tous les deux de grandes tailles sur les surfaces de la fracture empêcherait la formation d'un chenal ou du moins ralentirait son processus de formation. Les photographies des surfaces de la fracture de l'échantillon 10 après l'essai ne montrent, en effet, aucun chenal développé (annexe 5 – photos 10). La dissolution de la calcite superficielle aux points de contact entre les deux parois de la fracture, avec une précipitation moins importante et plus régulière de Fe sous forme d'hydroxydes, permettrait une diminution de la transmissivité de la fracture plus régulière durant l'essai. L'important phénomène de réaction d'oxydation des sulfures dans le cas de l'échantillon 10 résulte en un important apport d'ion H^+ dans l'eau; d'où la diminution du pH au cours de l'essai.

Dans le cas des trois essais à pH 2,5, un rapport P_i/P_c élevé ne correspond pas nécessairement à des valeurs de débit et de transmissivité élevées (tableau 13.4). La structure interne des surfaces des fractures semble jouer un rôle primordial sur leur comportement hydraulique.

13.4 CAS DES ESSAIS À PH 4

13.4.1 Échantillon 11

Dans le cas de l'échantillon 11 injecté à l'eau à pH 4, les faibles valeurs de concentration en Ca dans l'eau, entre 5,5 et 7,5 mg/l, impliquent un faible taux de dissolution de la calcite dans la fracture (figure 11.26b; tableau 12.3). La sous-saturation des eaux en calcite (I.S. environ -3) est en faveur de sa dissolution continue durant l'essai (figure 13.37a). Il en résulte une évolution du pH proche de la neutralité, (pH autour de 6). L'augmentation de la concentration en SO₄ jusqu'à des valeurs de 4 mg/l durant l'essai suggère qu'il y a aussi une faible oxydation des minéraux sulfurés de la matrice rocheuse (figure 11.26b; tableau 12.3). Le faible enrichissement des eaux en Fe, avec une concentration inférieure à 1 mg/l supporte cette hypothèse de la présence de faibles réactions d'oxydation, ce qui est corroboré par la faible précipitation d'hydroxydes dans la fracture (annexe 5 – photos 11), précipitation en réponse à la sursaturation en goethite et en hématite. La sous-saturation des eaux en gypse et en anhydrite (I.S. autour de - 4) ne permet pas leur précipitation (figure 13.37a). Les valeurs de I.S. des autres minéraux, tels que la sidérose et la rhodochrosite sont en-dessous du seuil de la saturation ne permettant pas la précipitation de ces minéraux (figure 13.37c). Les ions Mn et Mg proviendraient des carbonates; Mg peut aussi provenir des micas; Na, et K proviendraient des feldspaths présents dans la matrice rocheuse.

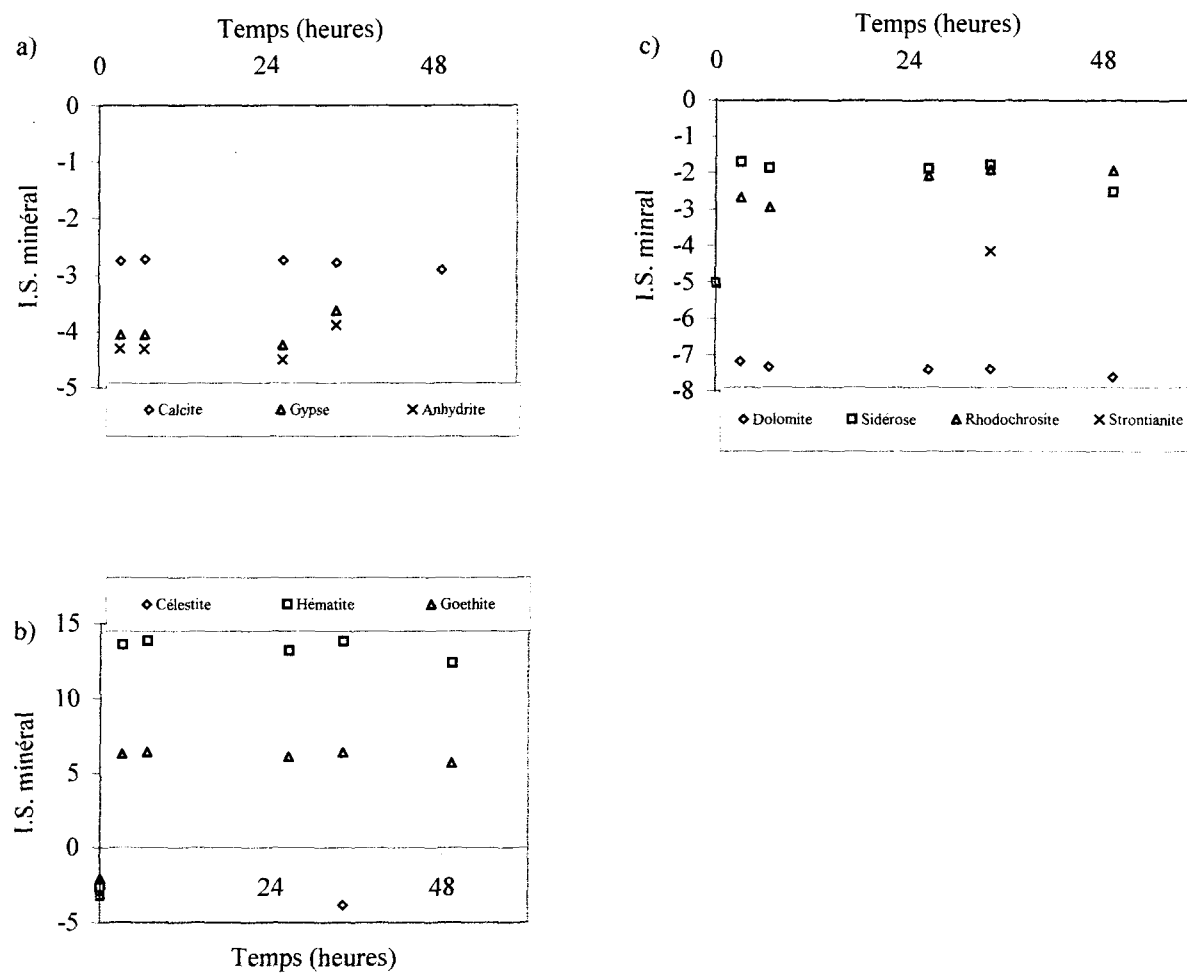


Figure 13.37: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 11 à pH 4.

Le débit d'eau et la transmissivité de la fracture subissent une évolution de type D avec une augmentation au début jusqu'à un maximum (phase *a*), puis une diminution (phase *a'*) pour se stabiliser vers la fin de l'essai (phase *b*). L'augmentation du rapport P_i/P_c de 0,067 à 0,267 durant la phase *b* de la première injection (après 26 heures d'essai), permet une augmentation du débit et de la transmissivité mais sans atteindre les valeurs maximales de la première partie de l'injection qui sont de 27 ml/h et $3,3 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ respectivement (figure 11.25; tableau 12.3). On remarque, cependant, une faible augmentation de la concentration en ions, observée en particulier dans le cas de Ca (figure 11.26b). Les graphiques de Ca en fonction du débit moyen et de la transmissivité moyenne montrent une forte corrélation négative entre Ca et les paramètres hydrauliques ($R=-0,96$) pour des valeurs entre 3 et 16 ml/h dans le cas du débit et entre $4,8 \times 10^{-11}$ et $2,6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ dans le cas de la transmissivité (figure 13.38).

Le graphique du taux de dissolution de la calcite et du débit en fonction du temps montre une variation du taux concordante à celle du débit. De façon générale, il y a une diminution de ce taux avec la diminution du débit, de $0,03 \times 10^{-3}$ à $0,006 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$, valeur enregistrée vers la fin (figure 13.39a). Ce taux de dissolution subit une très légère augmentation vers 34 heures suite à l'augmentation du rapport P_i/P_c . Le graphique du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit montre une forte corrélation positive ($R=0,96$) entre ces deux paramètres (figure 13.39b); la pente de droite décrivant cette tendance est de $0,002 \text{ gl}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ pour une gamme des valeurs de débit allant de 3 et 16 ml/h.

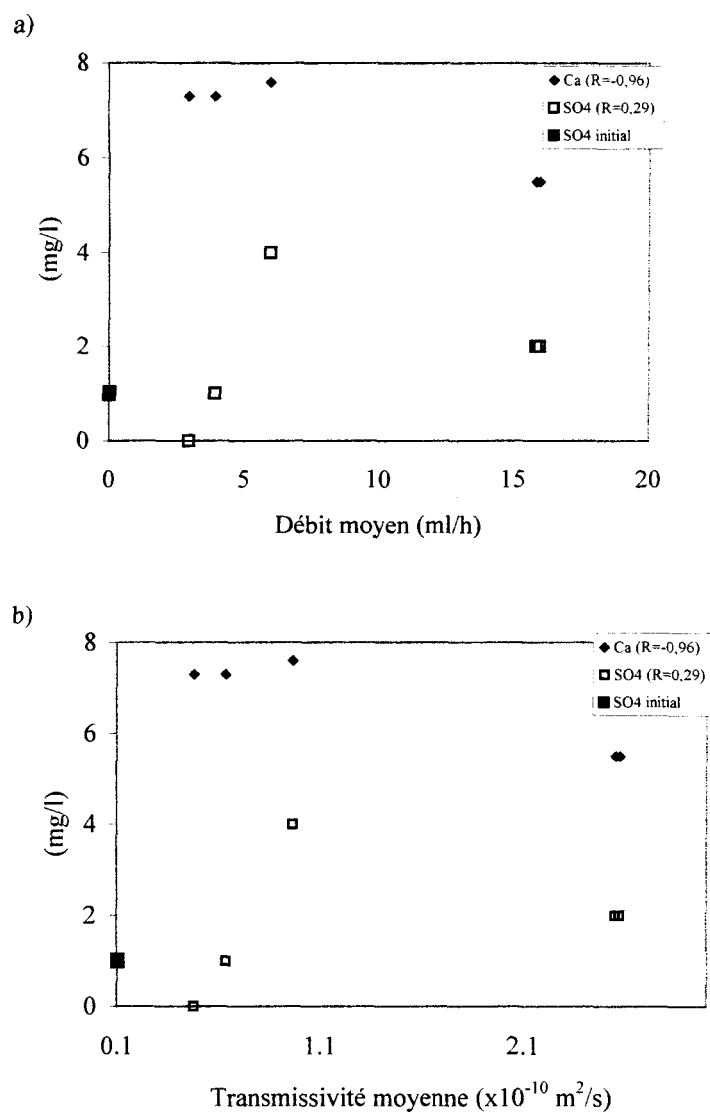


Figure 13.38: Ca et SO_4 en fonction du débit moyen (a) et de la transmissivité moyenne (b) pour l'échantillon 11 à pH 4.

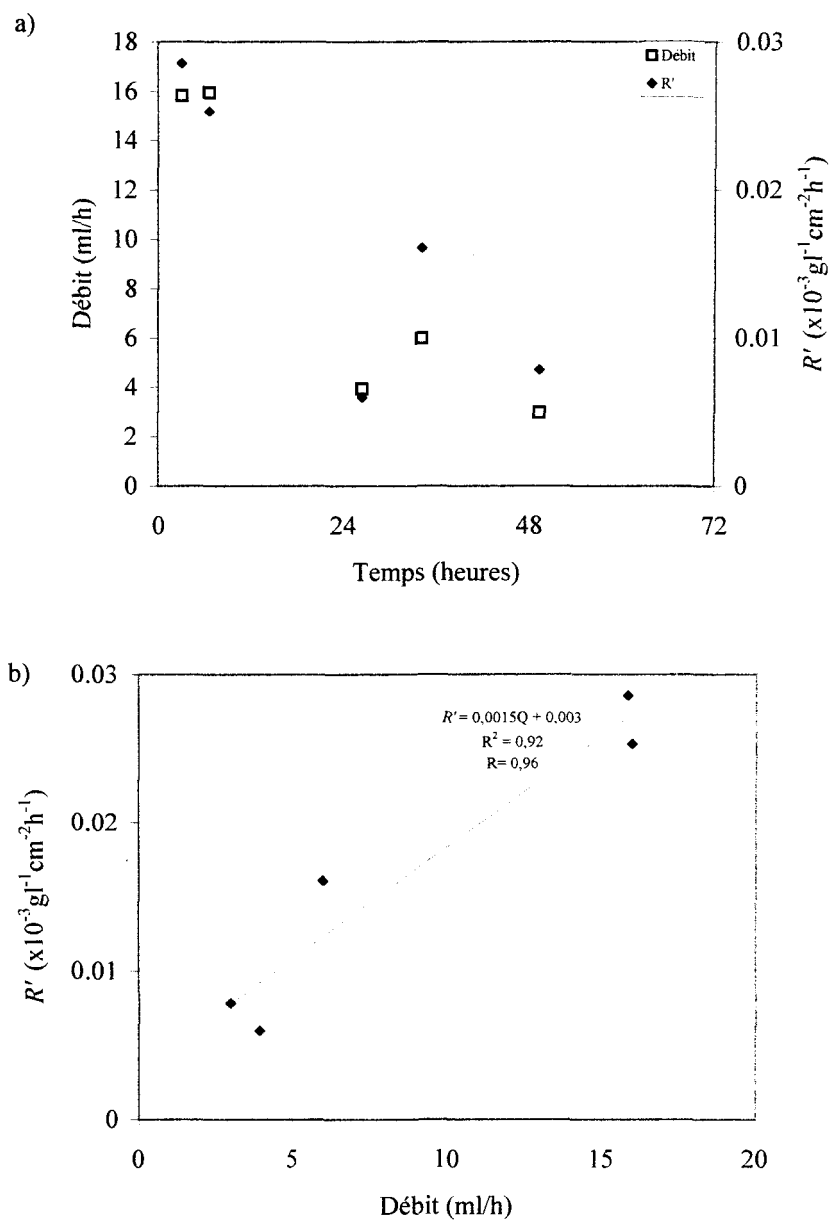


Figure 13.39: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 11 à pH 4.

La très faible cinétique de dissolution de la calcite serait limitée à la surface des cristaux de calcite (dissolution superficielle) et au point de contact entre les parois de la fracture aboutissant à une réduction des espaces des vides et, par conséquent, à la diminution de la transmissivité de la fracture vers la fin de l'essai. La précipitation des hydroxydes en particulier à l'entrée de la fracture contribuerait aussi à la diminution de la transmissivité de la fracture.

13.4.2 Échantillon 12

Dans le cas de l'échantillon 12 injecté à l'eau à pH 4, la concentration de Ca qui atteint des valeurs de 10 mg/l durant l'essai (figure 11.28b) est une conséquence de la dissolution de la calcite dans la fracture (annexe 5 – photos 12; tableau 12.3). Le résultat de l'indice de saturation en calcite montre une sous-saturation en faveur de sa dissolution continue durant l'essai (figure 13.40a). Cette dissolution continue permet de maintenir le pH autour de 6 durant toute la durée de l'essai (figure 11.28a).

La concentration en SO_4 atteint environ 17 mg/l durant l'essai, concentration plus élevée que celle de Ca (figure 11.28b), indiquant que les réactions d'oxydation des minéraux sulfurés de la matrice rocheuse dominant celles de la dissolution de la calcite. L'augmentation de la concentration en certains métaux, en particulier en Fe qui varie de 0 à

3 mg/l, avec le léger dépôt d'hydroxydes sur les surfaces de la fracture (annexe 5 – photos 12), confirment l'hypothèse d'une oxydation des minéraux sulfurés. L'évolution de la concentration en Fe ne suit pas celle de SO_4 (figure 11.28b et c), étant donné qu'une quantité de Fe a précipité. L'indice de saturation de la goethite et de l'hématite est au-dessus de la saturation, en faveur de leur précipitation durant l'essai (figure 13.40b). L'importante augmentation de la concentration en Cl à environ 17,5 mg/l suggère qu'il y a une dissolution des minéraux de plagioclase ou des micas dans la matrice (annexe 9 – photos 37 et 38). Les autres ions en trace présents dans l'eau, tels que Na et K, proviendraient des feldspaths de la matrice. L'indice de saturation pour la sidérose et la rhodochrosite est en-dessous de la saturation ne permettant pas leur précipitation.

Le débit d'eau et la transmissivité semblent influencer la concentration des ions dans l'eau surtout lors de la première partie de l'essai, entre 0 et 40 heures d'essai. En effet, lorsque le débit et la transmissivité sont plus élevés au début de l'essai (entre 0 et 12 heures), entre 4 et 18 ml/h et entre 5×10^{-11} et $2,5 \times 10^{-10}$ m²/s respectivement, la concentration des ions est faible, entre 0 et à 7 mg/l pour Ca et entre 0 et 10 mg/l pour Cl (figures 11.27 et 11.28). Par contre, après cette période, des valeurs de débit d'eau et de transmissivité plus faibles correspondent à des concentrations plus élevées en ces ions, environ 10 mg/l pour Ca et entre 15 et 24 mg/l pour le Cl. Les graphiques de Ca en fonction du débit moyen et de la transmissivité moyenne montrent une corrélation négative ($R=-0,85$) de Ca avec le débit et la transmissivité pour des gammes de valeurs allant 2 à 13

ml/h et de 3×10^{-11} à $1,7 \times 10^{-10}$ m²/s respectivement (figure 13.41a). Le SO₄ ne montre, cependant, pas une corrélation significative avec les paramètres hydrauliques (R=-0,3) (figure 13.41b). Les augmentations du rapport Pi/P_c de 0,033 à 0,067 après 45 heures et à 0,133 après 46 heures n'apportent qu'une légère augmentation du débit et de la transmissivité au début. Les résultats hydrochimiques ne semblent pas être affectés par ces augmentations du rapport Pi/P_c.

Le graphique du débit d'eau et du taux de dissolution de la calcite en fonction du temps montre une diminution de ce taux dès le début de l'essai, en suivant la diminution du débit. Ce taux diminue de $0,026 \times 10^{-3}$ à $0,008 \times 10^{-3}$ gl⁻¹cm⁻²h⁻¹, valeur enregistrée vers la fin (figure 13.42a). Le taux de dissolution ne subit pas de variation notable après 45 heures d'essai, suite à l'augmentation du rapport Pi/P_c. Le graphique du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit montre une forte corrélation positive (R=0,98) entre ces deux paramètres (figure 13.42b); la pente de la droite décrivant cette tendance est de 0,002 gl⁻²cm⁻² pour une gamme des valeurs de débit allant de 2 à 12 ml/h. Le faible taux de dissolution de la calcite serait dû au phénomène de dissolution limitée à la surface des cristaux de calcite (dissolution superficielle) et aux points de contact entre les parois de la fracture; ceci permet une diminution de l'ouverture de la fracture et, par conséquent, une diminution de sa transmissivité vers la fin de l'essai. La précipitation d'hydroxydes, en particulier à l'entrée de la fracture, contribuerait aussi à cette diminution de la transmissivité de la fracture.

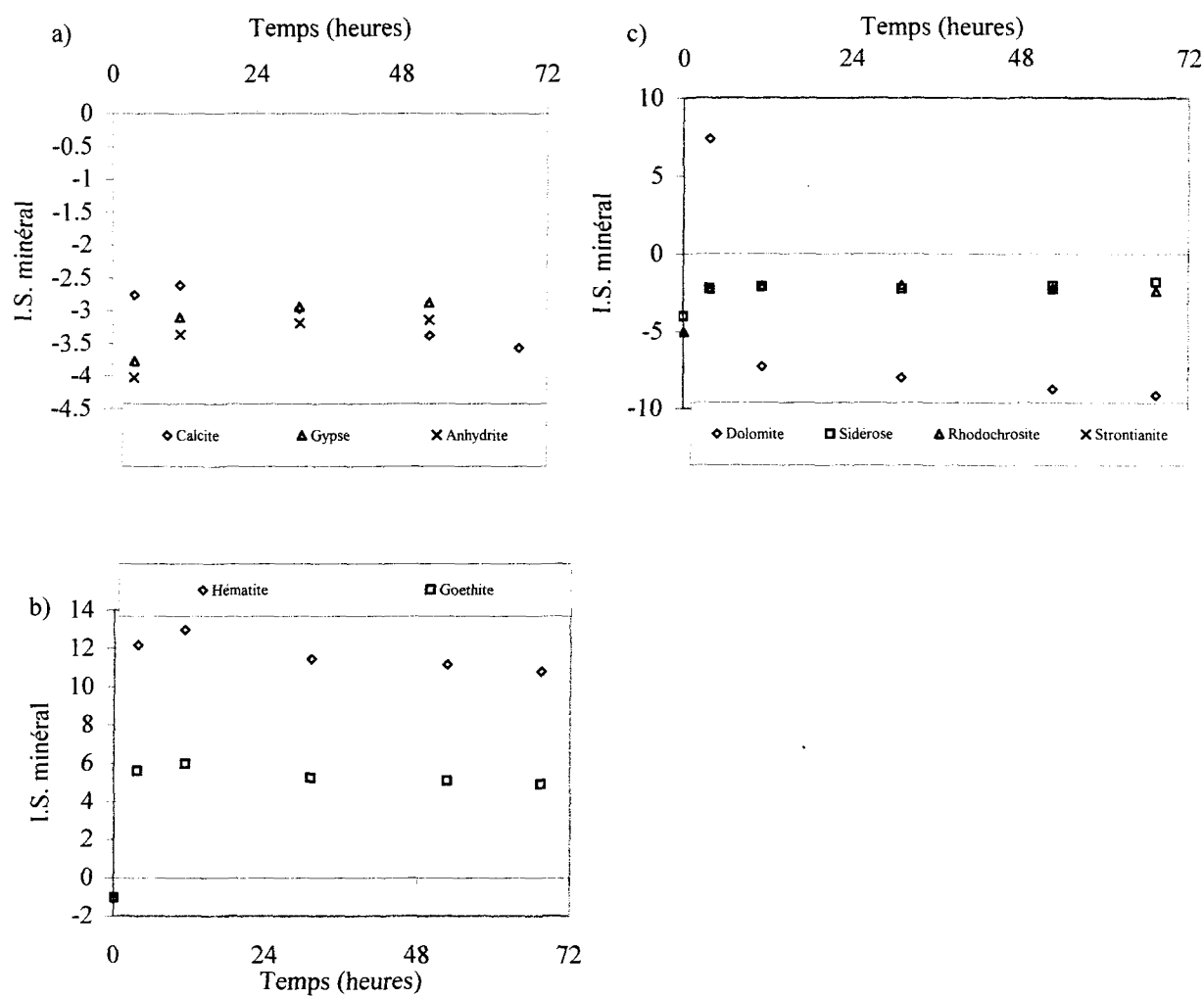


Figure 13.40: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 12 à pH 4.

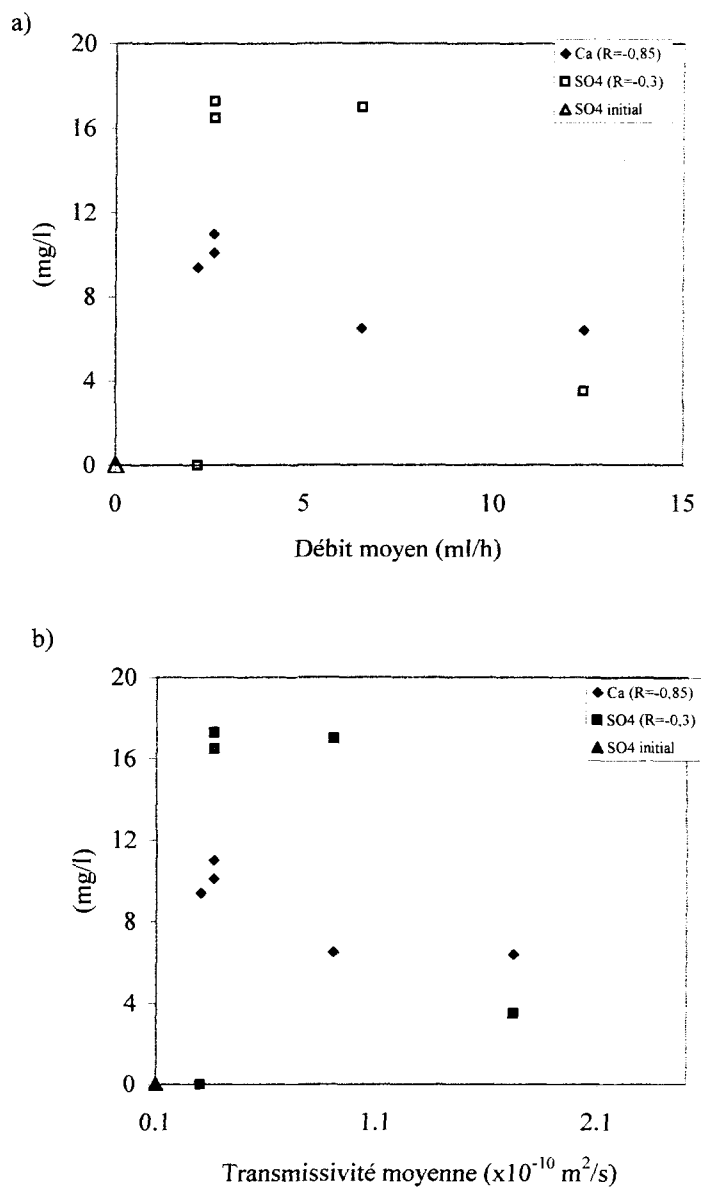


Figure 13.41: Ca et SO_4 en fonction du débit moyen (a) et de la transmissivité moyenne (b) pour l'échantillon 12 à pH 4.

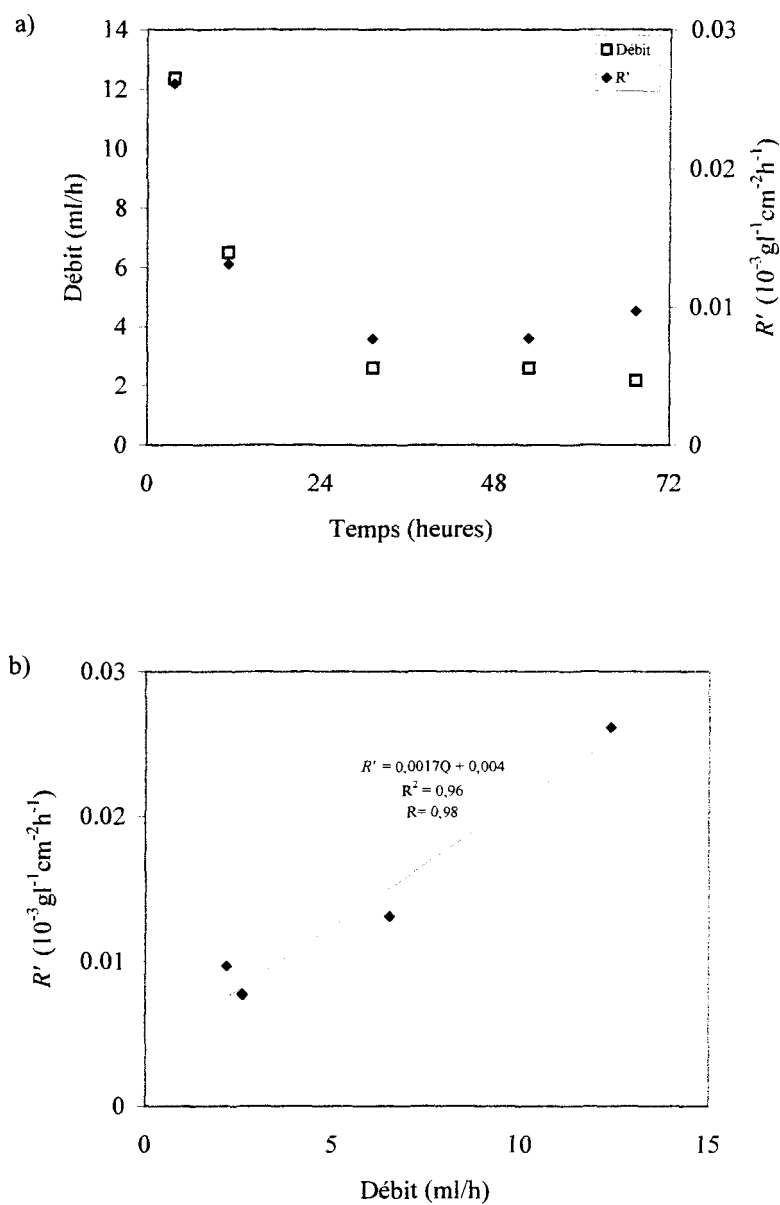


Figure 13.42: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a); et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 12 à pH 4.

13.4.3 Interprétation générale des essais à pH 4

Dans le cas de l'échantillon 2, appartenant à la série d'essais multiples, les valeurs des concentrations de SO_4 et de Ca sont plus élevées comparées aux échantillons 11 et 12, variant de 0 à 368 mg/l et de 0 à 120 mg/l respectivement (tableau 12.3). Dans les cas des échantillons 11 et 12, la gamme des valeurs des concentrations de SO_4 ne va que de 0 à 4 et de 0 à 17 mg/l respectivement; et pour le Ca, cette gamme ne va aussi que de 0 à 8 et de 0 à 10 mg/l respectivement. Ces résultats impliquent que les processus de dissolution de la calcite et de l'oxydation des sulfures dans le cas de l'échantillon 2 sont plus intenses que dans les cas des échantillons 11 et 12. Les résultats du taux de dissolution de la calcite par unité de surface montrent, en effet, des valeurs de ce taux élevées dans le cas de l'échantillon 2, variant entre $0,052 \times 10^{-3}$ et $0,144 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ (tableau 13.4), comparativement à la gamme des valeurs allant de $0,006 \times 10^{-3}$ à $0,03 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$ dans les cas des échantillons 11 et 12. La variation du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit est plus élevée dans le cas de l'échantillon 2, de $0,012 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$, par rapport aux échantillons 11 et 12 dont le taux de variation est constant à $0,002 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$.

Du point de vue minéralogique, la veine fracturée de l'échantillon 2 contient des cristaux de quartz de grande taille, entre 0,08 et 0,5 mm, à son centre avec les cristaux de calcite aussi de grande taille, environ 3,2 mm de longueur moyenne. La fracture de la veine

de l'échantillon 2 recoupe donc les deux minéraux et parfois elle recoupe aussi une portion de la matrice. Dans le cas de l'échantillon 11, la taille des cristaux de calcite est d'environ 2,1 mm et celle du quartz ne dépasse pas 0,2 mm. Alors que dans le cas de l'échantillon 12, la taille des cristaux de calcite est d'environ 0,7 mm et celle du quartz entre 0,1 et 2,5 mm. Il est donc difficile de justifier le taux élevé de dissolution de la calcite par le type et la taille des minéraux présents dans la veine de l'échantillon 2, par comparaison aux échantillons 11 et 12. Cependant, l'important phénomène d'oxydation dans le cas de l'échantillon 2 serait dû à l'exposition d'une plus grande surface de la matrice rocheuse à la circulation de l'eau d'injection. Ce phénomène d'oxydation est davantage favorisé à des valeurs de débit et de transmissivité faibles, entre 3 et 7 ml/h et entre 5×10^{-11} et 1×10^{-10} m²/s respectivement. Il faut noter aussi que l'échantillon 2 a subi une première injection d'eau à pH 7, cet échantillon appartenant à la série ayant subi des essais multiples.

Dans le cas de tous les essais à pH 4, les comportements hydrauliques sont similaires et suivent une évolution de type D, avec une augmentation du débit et de la transmissivité au début de l'essai (phase *a*), puis une diminution par la suite (phase *a'*) pour se stabiliser durant le reste de l'essai (phase *b*). Les concentrations en ions sont généralement plus élevées lorsque le débit et la transmissivité sont faibles (corrélation négative). La dissolution de la calcite ainsi que l'oxydation des minéraux sulfurés sont des processus actifs; ils sont en particulier plus intenses dans le cas de l'échantillon 2. Le pH évolue proche de la neutralité (pH autour de 6). Certains ions peuvent précipiter en

minéraux secondaires, tels que des hydroxydes, pour le cas du Fe, d'après les observations effectuées sur les surfaces des fractures après l'essai. Les augmentations du rapport P_i/P_c dans chaque essai n'apporte pas de changement notable quant à l'évolution hydraulique des fractures, surtout dans les cas des échantillons 11 et 12.

En l'absence de formation de chenaux dans le cas des essais à pH 4, les processus de dissolution de la calcite seraient limités à la surface des cristaux de calcite (dissolution superficielle) et localisés aux points de contact entre les deux parois de la fracture; ce type de dissolution permettrait le rapprochement des surfaces de la fracture et, par conséquent, la diminution de sa transmissivité en fonction du temps.

Tableau 13.4: Résumé des résultats du taux de dissolution de la calcite par unité de surface pour les essais à pH 4.

Échantillon no.	P_c (MPa) / P_i (MPa)	Augmentation de P_i (MPa) à t=	Rapport P_i/P_c	R' ($\times 10^{-3} \text{gl}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{h}^{-1}$)	Q moyen (ml/h)	Équation de la droite de R' versus Q	corrélation R R' -Q	Durée de l'essai
2	8,26 / 0,28		0,033	0,052 - 0,144	4,2 - 9	0,012xQ	0,4	132h
		0,41 à 31h	0,05					
		0,55 à 41h	0,067					
		1,24 à 81h	0,15					
11	8,26 / 0,55	2,2 à 24 h	0,067 0,267	0,006 - 0,029	3 - 16	0,002xQ	0,96	50h
12	16,51 / 0,55	1,1 à 45h 2,2 à 46h	0,033 0,067 0,133	0,008 - 0,026	2,2 - 12,4	0,002xQ	0,98	68h

P_c : Pression de confinement

P_i : Pression d'injection

R' : Taux de dissolution de la calcite par unité de surface

13.5 CAS DES ESSAIS À PH 7

13.5.1 Échantillon 13

Dans le cas de l'échantillon 13 injecté à l'eau à pH 7, la concentration totale des ions dans les eaux récupérées durant l'essai est très faible (figure 11.30). La concentration de Ca est la plus élevée et elle ne dépasse pas 0,6 mg/l. Le Ca provient de la dissolution de la calcite abondamment présente dans la fracture (annexe 5 – photos 13; annexe 9 – photos 39 et 40). La sous-saturation des eaux en calcite (figure 13.43a) favorise sa dissolution dans la fracture durant tout l'essai (I.S. environ -3). Les concentrations faibles de SO₄, d'environ 0,38 mg/l, et de Fe, de 0,2 mg/l, témoignent de très minimes réactions d'oxydation des minéraux sulfurés dans la fracture. La sous-saturation des eaux en gypse et en anhydrite (I.S. < -6) ne permet pas leur précipitation (figure 13.43a). L'indice de saturation en minéraux à base de fer, tels que l'hématite, la goethite et la sidérose, qui est aussi en-dessous du seuil de la saturation ne permet pas leur précipitation. En effet, il n'y a pas de dépôt d'hydroxydes sur les surfaces de la fracture après l'essai (annexe 5 – photos 13). L'ion Na avec des concentrations d'environ 0,2 mg/l proviendrait des feldspaths de la matrice rocheuse.

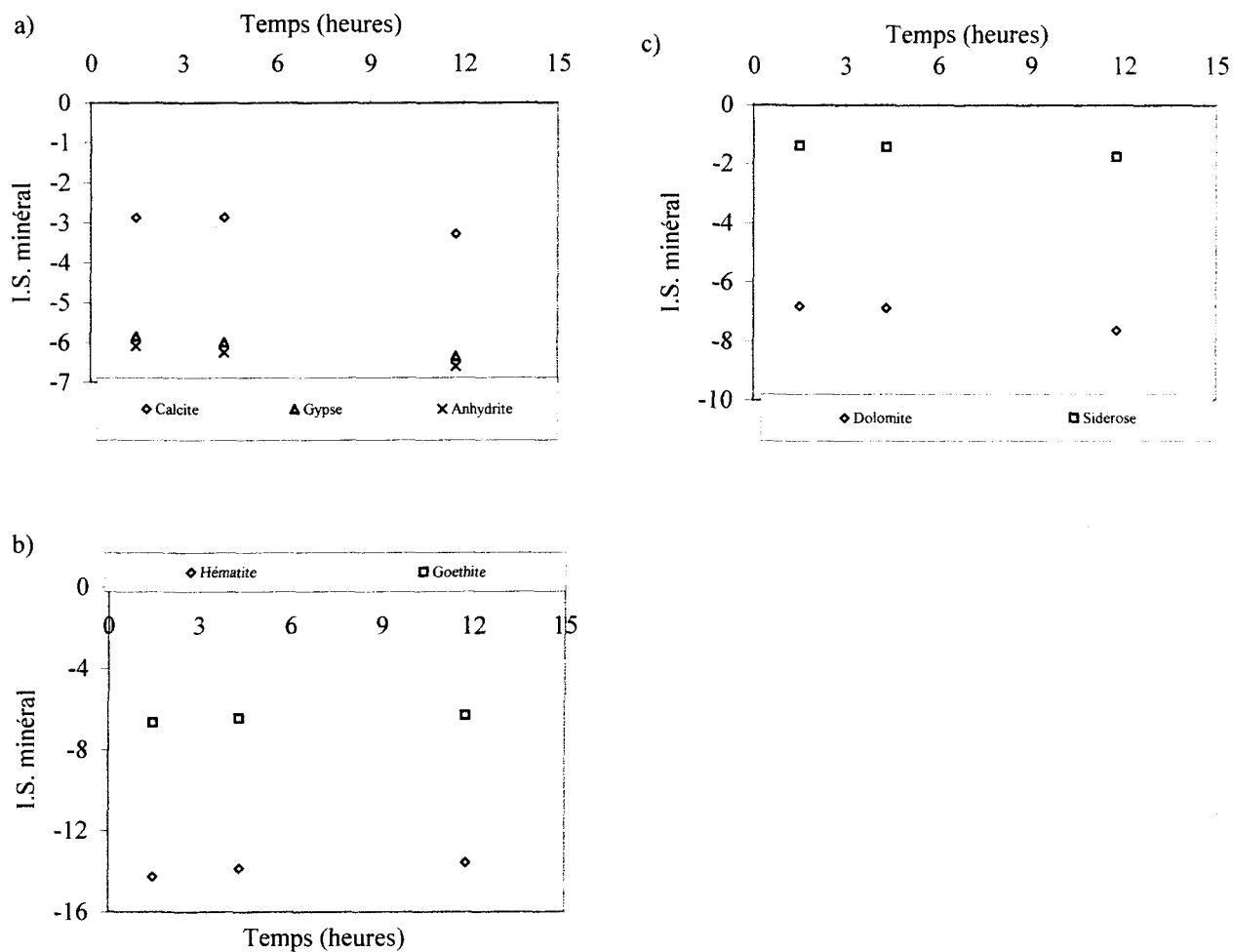


Figure 13.43: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 13 à pH 7.

Les gammes de débit et de transmissivité avec des valeurs élevées et qui sont générées dès le début de l'essai, vont de 100 à 500 ml/h et de 2×10^{-9} à $1,4 \times 10^{-8}$ m²/s respectivement (figure 11.29). Ces valeurs élevées de débit et de transmissivité seraient parmi les causes de la très faible concentration d'ions dans l'eau, étant donné le temps très court de résidence de l'eau injectée dans la fracture; le pH neutre de l'eau d'injection serait une autre cause possible puisqu'il influence le taux de dissolution de la calcite. Ce comportement hydraulique de la fracture peut être le résultat d'une mauvaise superposition de ses deux surfaces. On note, cependant une évolution générale du débit et de la transmissivité de type D (figure 12.1), en suivant une augmentation au début de l'essai (phase *a*) puis une diminution (phase *a'*) pour se stabiliser après une certaine période de temps (phase *b*).

Bien que les concentrations de Ca et de SO₄ soient très faibles, on peut noter des corrélations entre ces ions d'une part, et le débit et la transmissivité d'autre part. On note une corrélation faible et négative ($R=-0,37$) dans le cas de Ca et une corrélation positive dans le cas de SO₄ ($R=0,96$) (figure 13.44). Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface subit une diminution dès le début de l'essai, en suivant la diminution du débit; ce taux varie de $0,005 \times 10^{-3}$ à $0,001 \times 10^{-3}$ g l⁻¹ cm⁻² h⁻¹, valeur enregistrée vers la fin (figure 13.45a). Le graphique du taux de dissolution de la calcite par unité de surface en fonction du débit montre une forte corrélation positive ($R=0,99$) entre ces deux paramètres (figure

11.45b); la très faible pente de droite décrivant cette tendance est de $2 \times 10^{-5} \text{ g l}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ pour une gamme des valeurs de débit élevées allant de 144 à 379 ml/h.

13.5.2 Échantillon 14

Dans le cas de l'échantillon 14 injecté à l'eau à pH 7, le Ca enregistre la concentration la plus élevée des ions en atteignant 3,8 mg/l (figure 11.32b). Il provient de la dissolution de la calcite présente dans la fracture (annexe 5 – photos 14; annexe 9 photos 41 et 42). L'indice de saturation des eaux en calcite augmente au cours de l'essai tout en restant sous le seuil de la saturation (figure 13.46a). Cette condition favorise la dissolution continue de la calcite dans la fracture. Le pH évolue proche de la neutralité, non loin de la valeur au point d'injection. La concentration de SO_4 atteint des valeurs de 1,25 mg/l (figure 11.32b). L'hypothèse d'une oxydation des minéraux sulfurés qui serait à l'origine de cet ion n'est pas confirmée, ni par une augmentation de la concentration de Fe ni par la présence de dépôt d'hydroxydes de fer dans la fracture. Il s'agit là de concentrations non significatives comparées aux erreurs analytiques pouvant affecter les résultats. Les eaux sont, par conséquent, sous-saturées en minéraux de fer, tels que l'hématite et la goéthite (figure 13.46b). Les ions mineurs tels que Na et Cl qui atteignent des concentrations de l'ordre 0,5 mg/l proviendraient de la dissolution des feldspaths présents dans la matrice rocheuse.

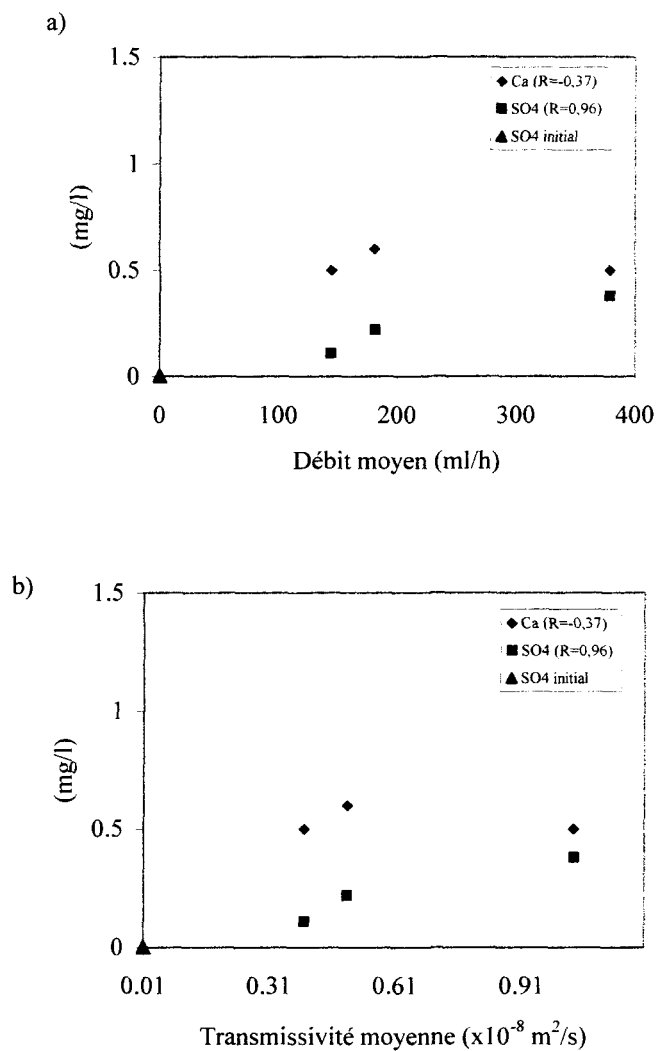


Figure 13.44: Ca et SO_4 en fonction du débit moyen (a) et de la transmissivité moyenne (b) pour l'échantillon 13 à pH 7.

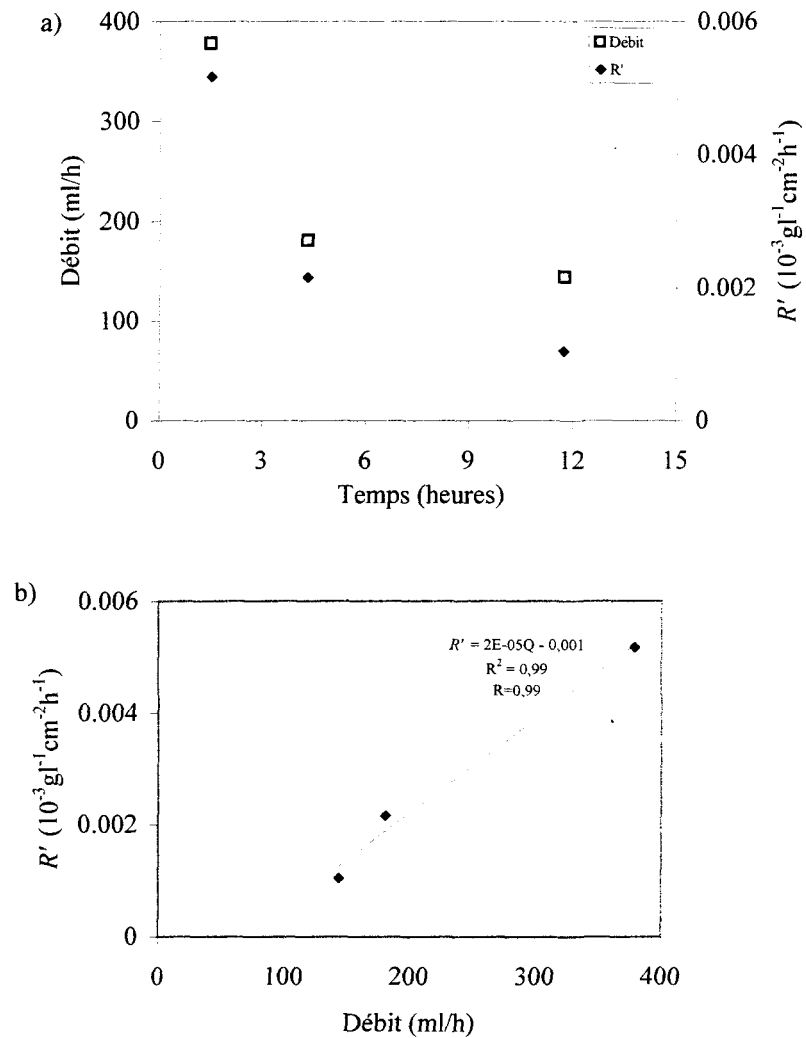


Figure 13.45: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 13 à pH 7.

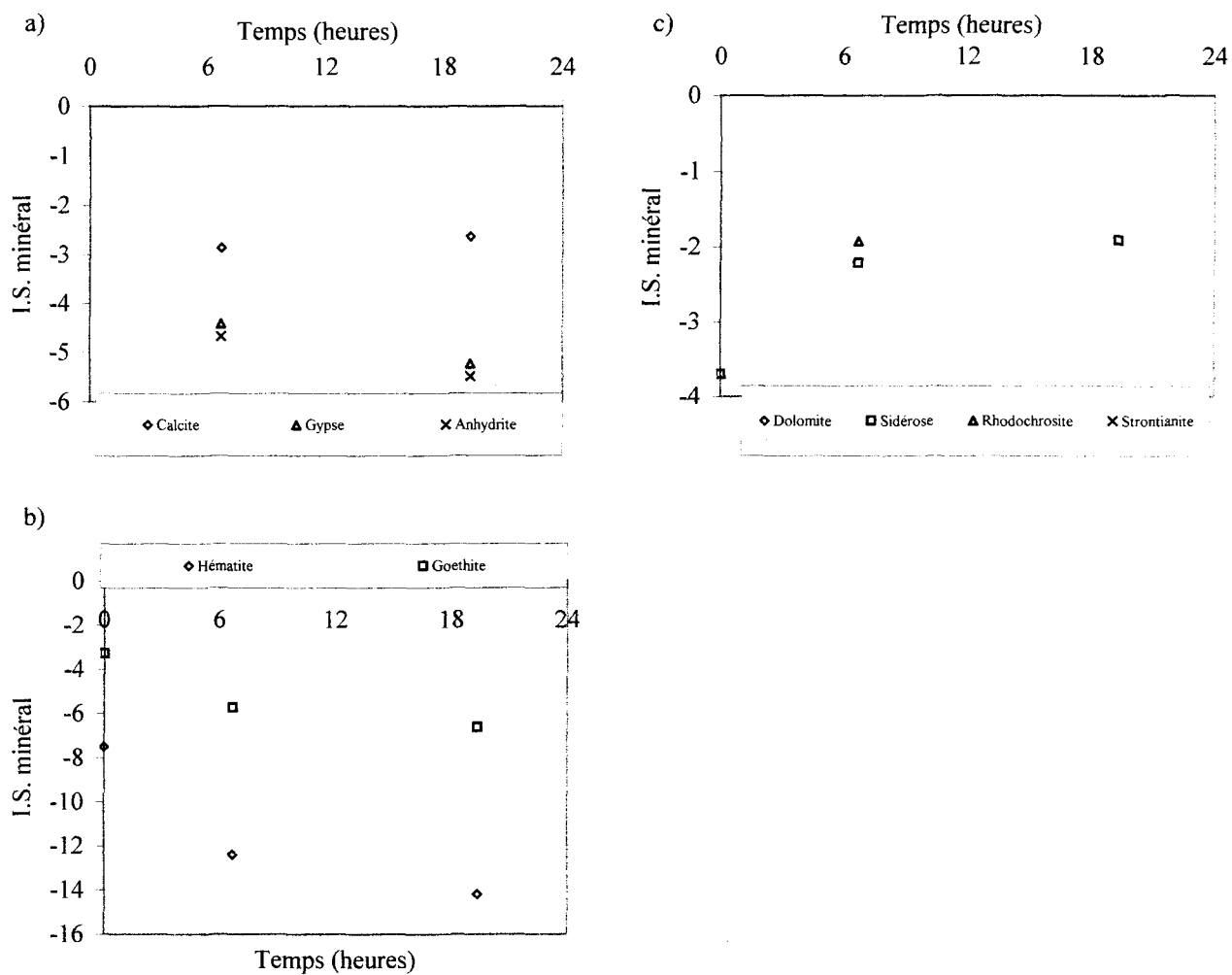


Figure 13.46: Indice de saturation des minéraux en fonction du temps pour l'échantillon 14 à pH 7.

L'évolution hydraulique de la fracture suit celle du type D, avec une augmentation rapide de la transmissivité (phase *a*), puis une diminution rapide (phase *a'*) pour se stabiliser vers la fin de l'essai (phase *b*) (figure 12.1). La gamme des valeurs de débit et de transmissivité pour l'échantillon 14 va de 3 à 28 ml/h et de 6×10^{-11} à 4×10^{-10} m²/s respectivement. Les graphiques de Ca et de SO₄ en fonction des paramètres hydrauliques (figure 13.47a) suggèrent une corrélation positive entre ces ions d'une part, et le débit moyen ainsi que la transmissivité moyenne d'autre part, pour des valeurs de ceux-ci entre 7,1 et 17 ml/h, et entre 1×10^{-10} et $2,4 \times 10^{-10}$ m²/s respectivement. Le graphique du taux de dissolution de la calcite en fonction du temps montre une diminution de ce taux durant l'essai, de $0,011 \times 10^{-3}$ à $0,005 \times 10^{-3}$ gl⁻¹cm⁻²h⁻¹, valeur enregistrée vers la fin (figure 13.48a); ce taux suit la même tendance que celle du débit en fonction le temps. Le graphique du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit montre une tendance positive entre ces deux paramètres (figure 13.48b); cette tendance suit une pente de droite faible de 0,0006 gl⁻²cm⁻² pour une gamme des valeurs de débit faibles entre 7 et 17 ml/h. Étant donné que cette droite de régression n'est formée qu'à partir de deux points, le résultat de la variation de *R'* en fonction du débit ne peut être significative. La diminution continue de la transmissivité de la fracture vers la fin serait due à une dissolution superficielle de la calcite et au niveau des points de contact entre les parois de la fracture permettant leur rapprochement.

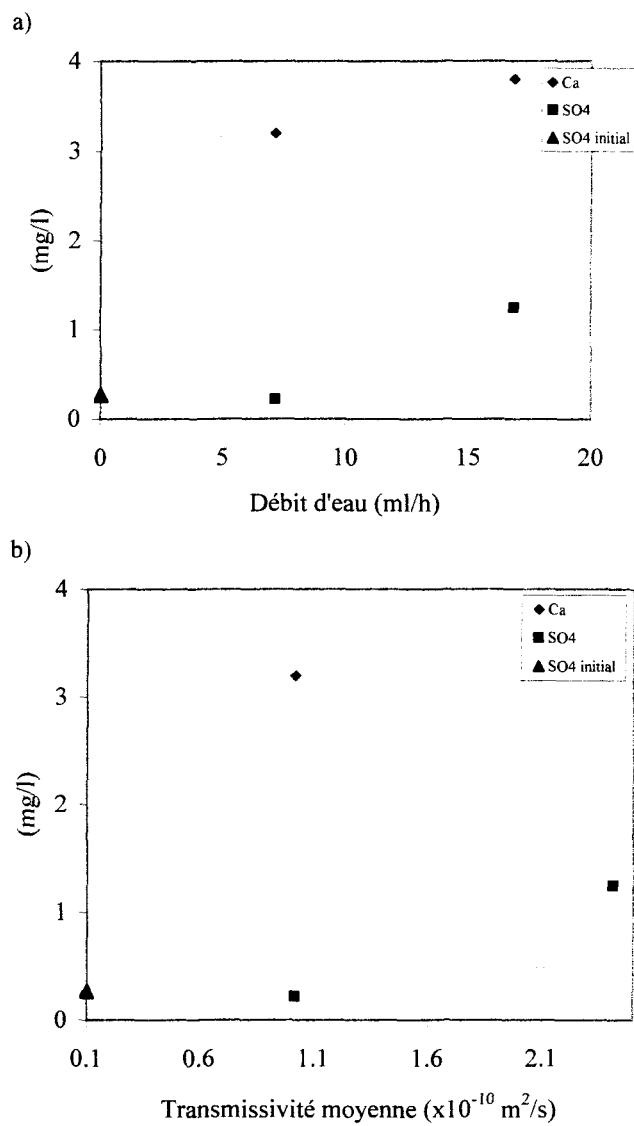


Figure 13.47: Ca et SO_4 en fonction du débit moyen (a) et de la transmissivité moyenne (b) pour l'échantillon 14 à pH 7.

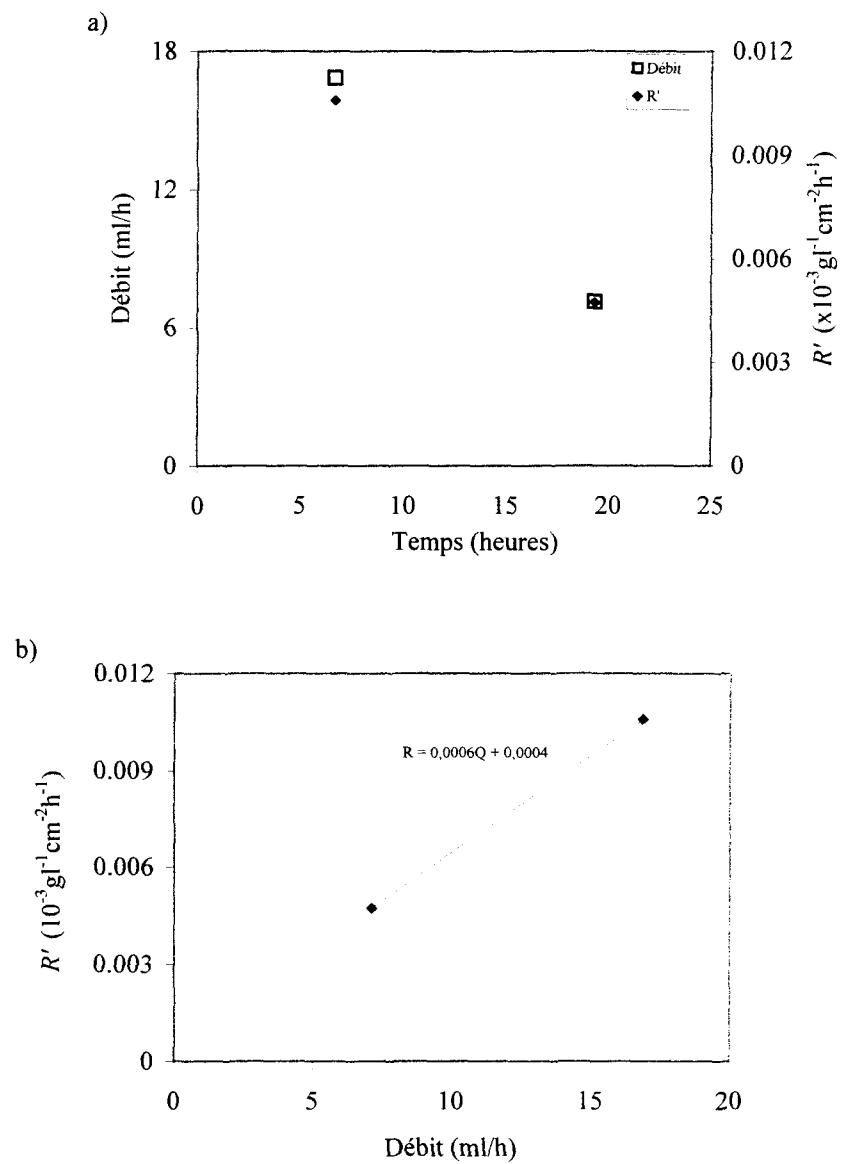


Figure 13.48: Débit d'eau et taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , en fonction du temps (a) et R' en fonction du débit (b) pour l'échantillon 14 à pH 7.

13.5.3 Interprétation générale des essais à pH 7

L'évolution hydraulique dans les trois essais à pH neutre suit l'évolution de type D, avec une augmentation rapide du débit et de la transmissivité au début de l'essai (phase *a*), puis une diminution rapide (phase *a'*) suivie d'une stabilisation vers la fin de l'essai (phase *b*) (figure 11.33); et ceci indépendamment du rapport P_i/P_c . Les valeurs de concentration des ions libérés dans l'eau sont faibles, à l'exception du cas de l'échantillon 2, un échantillon appartenant à la série d'essais multiples (tableau 12.4), témoignant des phénomènes peu actifs de dissolution et d'oxydation. Dans le cas des échantillons 13 et 14, les concentrations de Ca et de SO_4 générées ne dépassent pas 4 et 1,3 mg/l respectivement (figure 11.32). La gamme des valeurs de débit et de transmissivité pour l'échantillon 13 va de 100 à 500 ml/h et de 2×10^{-9} à $1,4 \times 10^{-8}$ m²/s respectivement; dans le cas de l'échantillon 14, les valeurs de débit et de transmissivité varient de 3 à 28 ml/h et de 6×10^{-11} à 4×10^{-10} m²/s respectivement. Dans le cas de l'échantillon 2, la concentration de Ca et de SO_4 atteint des valeurs maximales de 60 et 93 mg/l respectivement. La gamme des valeurs de débit et de transmissivité va de 8 à 150 ml/h et de 1×10^{-10} à 4×10^{-9} m²/s respectivement. La concentration des ions dans le cas de l'échantillon 2 est plus élevée pour des valeurs de débit et de transmissivité plus faibles variant de 8 à 40 ml/h et de 1×10^{-9} à 1×10^{-10} m²/s respectivement. Le taux de dissolution de la calcite dans le cas de l'échantillon 2 est plus élevé avec des valeurs entre $0,064 \times 10^{-3}$ et $0,16 \times 10^{-3}$ g l⁻¹ cm⁻² h⁻¹ (tableau 13.5); le taux de

dissolution de la calcite dans le cas des échantillons 13 et 14 varie entre 0,001 et $0,012 \times 10^{-3} \text{ gl}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$. La variation du taux de dissolution de la calcite en fonction du débit est plus élevée dans le cas de l'échantillon 2, de $0,003 \text{ gl}^{-2} \text{ cm}^{-2}$, par rapport aux échantillons 13 et 14 dont les valeurs sont de 2×10^{-5} et de $6 \times 10^{-4} \text{ gl}^{-2} \text{ cm}^{-2}$ respectivement.

La diminution de la transmissivité d'une fracture durant l'essai à pH 7 serait due aux phénomènes de dissolution limitée à la surface des cristaux de calcite (dissolution superficielle) et aux points de contact entre les deux parois de la fracture. La précipitation des minéraux d'hydroxydes de fer n'est pas observée surtout dans le cas des échantillons 13 et 14; les conditions de sous-saturation des eaux récupérées en ces minéraux ne favorisent pas leur précipitation. Du point de vue minéralogique (annexe 5 – photos 2, 13 et 14), la veine fracturée de l'échantillon 2 contient des cristaux de calcite de plus grande taille d'environ 3,2 mm de longueur, des cristaux de quartz de taille inférieure à 0,8 mm et situés entre la matrice rocheuse et la calcite, et d'autres cristaux de quartz de taille variée, ne dépassant pas 0,5 mm, situés au centre de la veine, entre les cristaux de calcite. La veine de l'échantillon 13 contient les mêmes types et le même arrangement de minéraux que la veine de l'échantillon 2, mais sans les cristaux de quartz au centre; la taille des cristaux de quartz à la périphérie ne dépasse pas 0,5 mm et celle des cristaux de calcite est d'environ 3,2 mm de longueur. Dans le cas de l'échantillon 14, il y a une hétérogénéité minéralogique sans arrangement bien défini des cristaux de calcite de petite taille, ne dépassant pas 0,14 mm, et des cristaux de quartz de taille variée, ne dépassant pas 0,4 mm. La seule différence entre

l'échantillon 2 et l'échantillon 14 porte sur la largeur des cristaux de calcite : dans le cas de l'échantillon 14, les cristaux de calcite semblent être plus minces que ceux de l'échantillon 2, probablement dû à un cisaillement plus intense. Ce type de structure des cristaux de calcite dans le cas de l'échantillon 2 pourrait être la cause du plus faible taux de dissolution de la calcite que dans le cas de l'échantillon 14.

L'oxydation des minéraux sulfurés est aussi importante dans le cas de l'échantillon 2 (la source de SO_4), et serait favorisée par une grande superficie de la surface de la fracture où l'eau est en contact direct avec la matrice rocheuse (annexe 5 – photos 2).

D'un échantillon à l'autre, un rapport P_i/P_c plus faible n'implique pas nécessairement des valeurs de débit et de transmissivité plus faibles; la topographie des surfaces jouerait un rôle plus déterminant sur le comportement hydraulique des fractures. Le comportement hydraulique affecte peu les processus chimiques à l'exception du cas de l'échantillon 2.

Tableau 13.5: Résumé des résultats du taux de dissolution de la calcite par unité de surface pour les essais à pH 7.

Échantillon no.	P_c (MPa) / P_i (MPa)	Rapport P_i/P_c	R' ($\times 10^{-3} \text{gl}^{-1}\text{cm}^{-2}\text{h}^{-1}$)	Q moyen (ml/h)	Équation de la droite de R' versus Q	Corrélation R $R'-Q$	Durée de l'essai
2	8,26 / 0,28	0,033	0,064 - 0,16	11 - 84	0,0028xQ (11<Q<44ml/h) -0,0012Q (44<Q<84ml/h)	0,98 0,64	31h
13	12,38 / 0,28	0,022	0,001 - 0,005	144 - 379	$2 \times 10^{-5} \times Q$	0,91	12h
14	16,51 / 0,55	0,033	0,005 - 0,011	7 - 17	$0,0006 \times Q$	1?	20h

P_c : Pression de confinement

P_i : Pression d'injection

R' : Taux de dissolution de la calcite par unité de surface

14 DISCUSSION SUR LES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Les causes d'erreur liées aux essais expérimentaux sont de deux types : les causes d'erreur liées à l'expérimentation et les causes d'erreur liées à la méthode d'analyse des données.

Parmi les causes d'erreur liées à l'expérimentation, on peut citer :

- Les erreurs liées à la contamination éventuelle des eaux récupérées durant un essai par les différentes composantes du montage expérimental qui entrent en contact avec l'eau injectée dans le système, telles que le réservoir d'injection d'eau, la cellule tri-axiale et les connexions métalliques entre les différentes composantes du système d'injection d'eau.
- Les erreurs liées à la manipulation, aux processus de dilution et de préparation des standards pour les analyses chimiques de l'eau.
- Les erreurs liées aux différentes méthodes d'analyse chimique des ions dans l'eau (titration, colorimétrie et absorption atomique).
- Les erreurs liées à la mesure du pH des eaux récupérées, car le pH-mètre utilisé nécessite un réétalonnage fréquent.
- Les erreurs liées à la méthode d'estimation de la surface de la fracture couverte par de la calcite pour le calcul du taux de dissolution de la calcite par unité de surface.
- Les erreurs liées à l'instabilité de la pression d'injection d'eau et de la pression de confinement lors d'un essai.

Dans le cas des causes d'erreur liées à la méthode d'analyse des données, on peut citer celles liées à la méthode d'estimation du taux de dissolution de la calcite dans les fractures. En effet, dans notre cas, l'équation utilisée est celle qui tient compte de la variation de la concentration de Ca divisée par le temps entre deux prélèvements d'eau et la surface de la fracture recouverte par la calcite ($R' = dC_{Ca}/A dt$). Le paramètre du volume d'eau (V) écoulé durant l'intervalle de temps dt est omis de l'équation, étant donné qu'il masque la tendance réelle de R' ; ce taux R' semble constamment proportionnel au volume d'eau, ce qui n'est pas toujours le cas en réalité.

Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface, R' , est étudié ici en fonction du débit d'eau. La pente de la droite de régression entre ces deux paramètres donne une valeur plus significative du taux de variation de R' que celle de la pente de la droite de régression entre R' et le volume d'eau. Chou et al. (1989) ont utilisé une formule équivalente ($R' = dC_{Ca} \times Q/A$) dans leur étude de la cinétique et du mécanisme de dissolution des minéraux carbonatés.

L'équation du taux de dissolution de la calcite qui tient compte des nombres de Péclet et de Damköhler nécessite des connaissances sur certains paramètres de la géométrie et la topographie des fractures dont la mesure n'a pas été possible dans le cadre de cette étude.

Étant donné que les échantillons de veines soumis aux essais expérimentaux sont des échantillons naturels, il est possible qu'il y a eu dissolution de certains minéraux autres que la calcite présents soit dans la matrice ou parmi les minéraux de remplissage des fractures, et contribuant à l'augmentation de la concentration en ion Ca dans l'eau. De même, la précipitation de l'ion Ca sous forme de minéraux secondaires causerait une diminution de la concentration réelle en cet ion. Dans les deux cas ci-mentionnés, le taux de dissolution de la calcite serait soit surestimé ou sous-estimé.

15 CONCLUSION SUR LES ESSAIS EXPÉRIMENTAUX

Les résultats des essais d'injection dans les fractures ont permis de définir plusieurs types d'évolution hydraulique et chimique. Indépendamment du type d'évolution, on observe un apport d'ion Ca dans l'eau qui provient de la dissolution de cristaux de calcite, présents en grande quantité parmi les minéraux de remplissage des veines fracturées. Cette dissolution s'accompagne d'une augmentation ou du maintien du pH proche de la neutralité (pH = 6). La stabilisation du pH autour de 6 durant l'essai est une indication que les réactions de dissolution de la calcite se font près de l'équilibre.

Les essais à pH 2 ont permis de distinguer 4 types d'évolution hydraulique et chimique des fractures. L'évolution de type A (échantillons 4 et 6) montre une augmentation de la transmissivité en fonction du temps jusqu'à atteindre un plateau dont la durée dépend du taux de dissolution de la calcite, et une augmentation d'une façon très rapide par après. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface est élevé et varie beaucoup. Sa variation en fonction du débit est entre 0,075 - 0,186 $\text{gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. La dissolution de la calcite se fait selon deux modes : le premier mode est celui de la dissolution limitée à la surface des cristaux de calcite (dissolution superficielle); le deuxième mode est celui de la dissolution par chenalisation. Ce dernier mode de dissolution est responsable de l'augmentation rapide et spontanée de la transmissivité de la fracture.

Dans le cas de l'évolution de type B (échantillons 2 et 5), la transmissivité de la fracture subit presque la même évolution que celle des échantillons de type A, avec une courte phase de diminution avant d'atteindre le plateau. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface est presque constant. Sa variation en fonction du débit est faible, de $0,001 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$, pour l'échantillon 5; mais elle est élevée, de $0,113 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$, pour l'échantillon 2.

L'échantillon 1, compté parmi le groupe B d'échantillons, ne présente pas une augmentation très importante de la transmissivité de la fracture vers la fin de l'essai. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface est plus faible. Sa variation en fonction du débit est de $0,025 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. Ce faible taux de dissolution serait dû à l'agencement des minéraux de remplissage de la veine; cette dernière est caractérisée par la présence d'une faible quantité des cristaux de calcite, de petite taille (0,04 - 0,4 mm) répartis d'une façon très irrégulière avec des cristaux de quartz de taille variable ($<0,1 \text{ mm}$). Les réactions de dissolution de la calcite seraient superficielles et limitées aux points de contact entre les parois de la fracture; ce qui permet le rapprochement des deux surfaces de la fracture et, par conséquent, une diminution de sa transmissivité.

Dans les deux types d'évolution A et B (cas des échantillons 4, 6, 2 et 5), les fractures contiennent les mêmes types et les mêmes arrangements de cristaux de calcite et de quartz. L'augmentation du rapport P_i/P_c fait augmenter le débit d'eau dans chacun des

types d'évolution A et B. Cependant, on ne peut comparer les rapports P_i/P_c entre les essais des différents échantillons injectés à l'eau à pH 2 à cause de la grande variation topographique d'une fracture à une autre.

L'évolution de type C (échantillon 3) présente une augmentation continue de la transmissivité avec le temps, sans la phase du plateau. La transmissivité de la fracture est très élevée. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface est élevé aussi. Sa variation en fonction du débit est élevée, soit $0,047 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. L'hétérogénéité minéralogique de la veine, par la présence de cristaux de calcite ($< 0,9 \text{ mm}$ de longueur), avec de gros cristaux du quartz ($0,2 \text{ mm}$) et des minéraux sulfurés (pyrite) de grandes tailles, semble favoriser une dissolution plus rapide de la calcite et maintenir la fracture ouverte; d'où des valeurs de débit d'eau très élevées dès le début de l'essai.

Dans le quatrième type d'évolution, le type D (échantillon 7), la transmissivité subit une diminution avec le temps sans phase d'augmentation vers la fin. Les valeurs de transmissivité générées sont faibles. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface est le plus faible des essais à pH 2. Sa variation en fonction du débit est par contre la plus élevée de tous les essais à pH 2, de $0,23 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. Le faible taux de dissolution de la calcite serait dû, d'une part, à la faible quantité des cristaux de calcite dans la veine et, d'autre part, à la précipitation rapide et importante des minéraux secondaires, tels que le gypse, et des

hydroxydes de fer dans la fracture. Il en résulte une réduction du volume des vides de la fracture et, par conséquent, une diminution de la transmissivité de la fracture.

Dans le cas des essais à pH 2,5, deux types d'évolution hydraulique et chimique des fractures sont remarqués. Le premier type d'évolution, le type E (échantillons 8 et 9), est caractérisé par des fluctuations de la transmissivité en fonction du temps. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface est faible et très variable en fonction du temps. Sa variation en fonction du débit est de $0,004 - 0,005 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. Caractérisés par une même minéralogie, les échantillons 8 et 9 possèdent la calcite comme minéral principal avec des cristaux de grande taille et le quartz avec des cristaux de petite taille séparant la calcite et la matrice rocheuse. Le deuxième type d'évolution, le type D (échantillon 10), présente une faible variation de la transmissivité en fonction du temps. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface est plus élevé. Sa variation en fonction du débit est plus élevée aussi, de $0,044 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. La présence de cristaux de calcite de plus grande taille (2,1 – 2,6 mm) et des cristaux de quartz de taille variable (<0,1 mm) à l'intérieur de la calcite semble favoriser une cinétique de dissolution plus rapide de la calcite dans le cas des échantillons 8 et 9, comme c'est le cas aussi de l'échantillon 2 dans les essais à pH 2.

De façon générale, la transmissivité de la fracture augmente avec l'augmentation du rapport P_i/P_c pour les essais à pH 2,5. Une transmissivité faible, correspondant à un rapport P_i/P_c plus faible, favorise une oxydation des minéraux sulfurés.

Les résultats des essais à pH 2,5 suggèrent une dissolution de la calcite généralisée sur toute la surface de la fracture. Ce type de dissolution de la calcite en combinaison avec le phénomène de précipitation importante d'hydroxydes de fer contribue à la réduction des vides dans la fracture et, par conséquent, une diminution de sa transmissivité. Un deuxième type de dissolution de la calcite, par chenalisation, est présent aussi à l'intérieur des veines, observé en particulier dans le cas des échantillons 8 et 9 (évolution de type E).

Les essais à pH 4 montrent une évolution de type D (échantillons 2, 11 et 12). Dans le cas des échantillons 11 et 12, le taux de dissolution de la calcite par unité de surface est plus faible que pour l'échantillon 2, appartenant à la série des essais multiples. La variation de ce taux en fonction du débit dans le cas des échantillons 11 et 12 est plus faible aussi et constante, de $0,002 \text{ g l}^{-2} \text{ cm}^{-2}$, comparée à celle de l'échantillon 2 qui est de $0,012 \text{ g l}^{-2} \text{ cm}^{-2}$. Les processus de dissolution et d'oxydation dans le cas de l'échantillon 2 sont plus importants que dans les cas des échantillons 11 et 12. Le type particulier de la veine de l'échantillon 2, par la présence des cristaux de calcite de plus grande taille et des cristaux de quartz de grande taille aussi au centre, favoriserait une cinétique plus rapide de la dissolution de la calcite. L'oxydation intense des minéraux sulfurés est due à une plus grande surface d'exposition de la matrice rocheuse à l'eau injectée dans la fracture.

Les processus de dissolution de la calcite seraient limités à la surface des cristaux de calcite (sans pénétrer en profondeur) et aux points de contact entre les parois de la fracture; ceci cause l'écrasement des aspérités et, par conséquent, une diminution de la transmissivité de la fracture. En général, l'augmentation du rapport P_i/P_c entraîne une augmentation de la transmissivité de la fracture.

Dans le cas des essais à pH 7, l'évolution hydraulique est de type D. Le taux de dissolution de la calcite par unité de surface dans le cas de l'échantillon 2 est plus élevé que dans les cas des échantillons 13 et 14. De même, la variation de ce taux en fonction du débit est plus élevée dans le cas de l'échantillon 2, de $0,003 \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$, par rapport aux échantillons 13 et 14 dont la variation du taux est de $0,6 - 2 \times 10^{-5} \text{ gl}^{-2}\text{cm}^{-2}$. Il semble donc que la cinétique rapide de dissolution de la calcite dans le cas de l'échantillon 2 ait été causée par la taille plus grande des cristaux de calcite et par la présence de cristaux de quartz de plus grande taille aussi au centre de la veine. Les processus d'oxydation des minéraux sulfurés sont aussi plus actifs dans le cas de l'échantillon 2, comme c'était le cas lors de son injection à pH 4 et à pH 2 comparé aux autres échantillons testés aux valeurs de pH correspondantes. La dissolution de la calcite serait superficielle et effective surtout aux points de contact entre les parois de la fracture; ce qui permet l'écrasement des aspérités et la diminution du volume des vides; et par conséquent la diminution de sa transmissivité en fonction du temps. L'augmentation du rapport P_i/P_c n'entraîne pas une augmentation de la transmissivité de la fracture.

En général, dans tous les différents types d'essais, il existe une forte corrélation entre le taux de dissolution de la calcite par unité de surface et la transmissivité de la fracture. Dans le cas des essais à pH 2, la corrélation qui est positive entre ces deux paramètres finit par devenir négative dans certain cas, conséquence de l'écoulement préférentiel le long des chenaux qui prennent place. En effet, ce mode d'écoulement réduit la surface de la calcite qui entre en contact avec l'eau; avec l'arrivée d'un grand volume d'eau, la quantité de Ca libérée se trouve davantage diluée.

Les résultats des essais sur les différents échantillons montrent aussi que les processus chimiques de dissolution de la calcite, d'oxydation des sulfures et de précipitation de gypse et d'hydroxydes sont actifs et agissent à différentes échelles de temps selon le type d'essai et le type de veines fracturées. De plus, ces processus chimiques sont bien couplés aux comportements hydrauliques d'une fracture.

**PARTIE IV : INTÉGRATION DES RÉSULTATS DE TERRAIN ET DE
LABORATOIRE**

16 INTÉGRATION DES RÉSULTATS DE TERRAIN ET DE LABORATOIRE

Une analyse complète des couplages des processus hydrauliques, chimiques et mécaniques dans un contexte géologique nécessite une approche qui intègre des travaux de terrain (observations, mesures et essais) et des essais en laboratoire. L'étude sur le terrain à la mine Bouchard-Hébert a permis de caractériser les conditions actuelles du massif rocheux situé entre les anciennes excavations et les exploitations récentes plus profondes. Parmi les travaux de terrain réalisés à la mine Bouchard-Hébert il y a la mesure de la fracturation dans le massif rocheux situé entre les anciennes et les nouvelles excavations (niveau 6A), la mesure de la perméabilité de ce massif rocheux et l'étude géochimique de l'eau à divers endroits de la mine. Nos travaux en laboratoire ont porté surtout sur l'étude de processus couplés faisant intervenir la géochimie des eaux et la transmissivité des fractures provenant du massif rocheux à la mine Bouchard-Hébert.

16.1 FRACTURES ET VEINES

Les réseaux de fractures dans le massif rocheux jouent un rôle important dans la circulation des eaux acides des anciennes excavations vers les nouvelles plus profondes. Les résultats de la cartographie de fractures ont permis d'identifier deux domaines de fracturation dans le massif rocheux séparant les anciennes excavations des nouvelles. Dans

la partie ouest de la galerie au niveau 6A (10600E-10900E), le massif rocheux est traversé par deux principales familles de fractures. La première famille de fractures est subhorizontale (pendage entre 0° et 30°) avec une longueur de trace généralement entre 1 et 1,5 m et constituée de veines ayant une épaisseur d'environ 2 mm. La deuxième famille de fractures est subverticale (pendage entre 75° et 90°). Cette famille de fractures est subdivisée en deux groupes selon la longueur de trace : un groupe entre 0,5 et 2 m et un autre entre 3 et 3,5 m. L'épaisseur des veines de cette famille de fractures est également d'environ 2 mm. La densité de fractures varie entre 1 et 6 m^{-1} . Dans la partie est de la galerie au niveau 6A (10900E-11200E), le massif rocheux présente une fracturation semblable à la partie ouest de la mine, mais avec la présence d'une troisième famille de fractures à pendage modéré (entre 15° et 45°) vers le nord-est. Cette famille de fractures est de plus faible effectif, d'une longueur de trace très variable entre 0,5 et 2,5 m et constituée de veines ayant une épaisseur d'environ 2 mm. La densité de fractures est d'environ 1 à 4 m^{-1} . Bien que la partie est du massif rocheux de la galerie 6A soit traversé par les trois familles de fractures, il semble que cette partie du massif rocheux soit moins perméable que dans la partie ouest, étant donné sa densité de fractures plus faible. Par conséquent, la circulation des eaux serait plus intense dans la partie ouest du massif de la galerie au niveau 6A de la mine.

16.2 COMPORTEMENT HYDRAULIQUE

Les résultats des essais hydrauliques en forage dans le massif rocheux du niveau 6A de la mine ont montré que, dans la partie est de ce niveau, la conductivité hydraulique du massif rocheux est plus faible que dans la partie centrale et est à peu près constante sur une profondeur de 48 m, variant entre 1×10^{-10} et $1 \times 10^{-11} \text{ ms}^{-1}$. Par contre, vers le milieu de la galerie du niveau 6A, soit en dessous des anciennes excavations, la conductivité hydraulique du massif rocheux est plus élevée et elle augmente avec la profondeur, passant de 1×10^{-11} à $1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ sur une distance de 48 m. Ce résultat suggère que la densité de fractures qui est plus élevée dans cette zone se prolonge également en profondeur. Les résultats des essais hydrauliques en forage fournissent dans ce cas de l'information sur la répartition de la fracturation en trois dimensions (en profondeur).

16.3 ASPECT GÉOCHIMIQUE

Du point de vue hydrogéochimique, les résultats montrent que les eaux échantillonnées dans les trous de forage à la mine ont un pH presque neutre et des concentrations élevées en ions Ca, SO_4 et en métaux. Les eaux souterraines dans ce massif circulent principalement dans les discontinuités qui le recoupent, soit les fractures et les

veines. Les eaux obtiennent ces caractéristiques géochimiques en partie lors de leur contact avec les minéraux de remplissage dans les fractures. L'ion Ca proviendrait de la dissolution de la calcite abondamment présente dans les veines. L'ion SO_4 et les métaux proviendraient de l'oxydation des minéraux sulfurés, lesquels sont présents dans la matrice rocheuse et font partie des minéraux de remplissage dans les veines. Les eaux des barricades au niveau 6A et du bassin de sédimentation en surface sont plus acides avec des valeurs extrêmes de pH de 2 et 2,5 respectivement, et des concentrations très élevées en ions, en particulier de SO_4 et des métaux (Fe, Zn, Cu et Mn). L'acidité des eaux provenant de l'ancienne mine reste très notable dans le bassin de sédimentation en surface malgré leur dilution avec les eaux à pH plus neutre, provenant des autres parties plus récentes de la mine.

16.4 ESSAIS AU LABORATOIRE

Les essais au laboratoire, exécutés sur des fractures issues de la mine, ont eu pour avantage de réduire l'échelle du temps des réactions qui se passent dans un environnement géologique. On peut supposer que les phénomènes observés à l'échelle d'une fracture et durant une courte période de temps, sous des conditions favorables, peuvent se produire à l'échelle du massif rocheux et sur une période de temps plus longue. Une des conditions qui serait favorable à la dissolution continue de la calcite dans les fractures dans ce cas est l'apport continu d'une eau acide et riche en métaux par les phénomènes d'oxydation des

sulfures, notamment ceux contenus dans les résidus enfouis dans les anciennes excavations. Le dénoyage continu des anciennes excavations et la présence de stérile à la surface de la mine (par exemple celui utilisé pour le remplissage de la mine à ciel-ouvert) contribuent à une production intense et continue d'eau acide par les phénomènes d'oxydation des sulfures qui y sont présents.

Les veines échantillonnées pour les essais expérimentaux au laboratoire ont, dans la plupart des cas, une épaisseur entre 0 et 3 mm, et elles contiennent de la calcite et du quartz comme principaux minéraux de remplissage. Ces caractéristiques sont les mêmes que pour les veines observées dans le massif rocheux du niveau 6A de la mine. Par conséquent, les résultats issus des essais d'injection d'eau dans ces veines fracturés au laboratoire peuvent être considérés représentatifs des phénomènes se produisant dans le massif rocheux entre les anciennes et les nouvelles excavations à la mine.

Les résultats des essais expérimentaux ont montré l'effet important d'une circulation d'eau acide sur la perméabilité des fractures. En effet, plus les eaux sont acides (pH de 2 et 2,5), plus sont intenses les réactions de dissolution de la calcite et d'oxydation des sulfures présents dans les fractures. Il en résulte une augmentation spontanée et rapide de la transmissivité de la fracture dans la majorité des cas (cas de fractures injectées à l'eau à pH 2) indépendamment du rapport de la pression d'injection sur la pression de confinement. Une augmentation rapide et instantanée de la transmissivité de la fracture est observée après

une courte période d'essai, ne dépassant pas une journée (cas des échantillons 2, 3, 4, 5 et 6).

Dans les cas des essais à pH 2,5, deux types d'évolution du comportement hydraulique des fractures sont observés. L'un semble se diriger vers une évolution semblable à celle des essais à pH 2 et l'autre se dirige vers une évolution semblable à celle des essais à pH 7. Le premier type d'évolution serait le résultat des phénomènes de dissolution de la calcite par chenalisation, comme c'est le cas dans la majorité des essais à pH 2. Le ralentissement de la cinétique de dissolution de la calcite dans ce cas serait principalement dû à l'importante précipitation d'hydroxydes de fer dans les fractures. Les essais à pH 4 et 7, montrent des réactions moins intenses de dissolution de la calcite et d'oxydation des sulfures. Il en résulte une diminution de la transmissivité de la fracture avec le temps avec des valeurs plus faibles que dans le cas des essais à pH 2,5. Le mécanisme de dissolution de la calcite dans ces deux derniers cas d'essais serait plutôt limité aux points de contact entre les surfaces des fractures permettant la diminution de l'espace des vides et, par conséquent, une diminution de leur transmissivité. Sur le terrain, la géochimie des eaux échantillonnées à la mine témoigne de la présence de ce type de réactions puisqu'elle montre des concentrations élevées en Ca, SO₄ et en métaux. De plus, la présence de dépôt d'hydroxydes de fer dans des fractures a été observée sur le terrain à plusieurs endroits de la galerie du niveau 6A (annexe 10). Les résultats des travaux expérimentaux ont montré que les réactions géochimiques entre l'eau et les minéraux de

remplissage dans une veine se produisent près de l'équilibre avec des valeurs de pH presque neutres. On en déduit que la présence d'une eau à pH neutre dans un tel contexte n'implique pas nécessairement des conditions géochimiques et hydrauliques stables.

L'eau à pH neutre à la mine peut être le résultat de réactions géochimiques très intenses surtout en présence d'eau initialement acide, comme c'est le cas dans le massif rocheux environnant les anciennes excavations de la mine; ce qui peut donc aboutir à un changement du comportement hydraulique d'une façon brusque, notamment par une augmentation de la perméabilité du massif rocheux fracturé et la venue de grande quantité d'eau dans des excavations plus profondes.

Les travaux de terrain et les essais au laboratoire montrent donc tous les deux que les processus chimiques de dissolution, d'oxydation et de précipitation sont très actifs et agissent à différentes échelles. Comme l'ont montré les essais au laboratoire, les processus chimiques peuvent aussi être couplés aux processus hydrauliques; ceci devrait se produire à plus grande échelle, soit à l'échelle du massif rocheux, comme à l'échelle plus petite des essais en laboratoire.

Pour des veines de fracture, d'une longueur de 10 cm, la durée d'un essai d'injection d'eau à pH 2 (cas des échantillons 2, 3, 4, 5 et 6), avant d'atteindre l'augmentation rapide et spontanée de la transmissivité des fractures, varie entre moins d'une heure et 17 heures. En

extrapolant ce résultat au cas d'une veine de fracture, de 50 m de longueur, l'écoulement d'une eau à pH 2 causerait une augmentation rapide et spontanée de sa transmissivité après un temps écoulé allant de 2 à 25 jours.

16.5 RECOMMANDATIONS PRATIQUES

La calcite et le quartz sont des minéraux très communs dans un environnement géologique, en particulier dans les fractures; par conséquent, les conditions retrouvées dans plusieurs contextes peuvent ressembler à celles retrouvées à la mine Bouchard-Hébert. Les recommandations pratiques pour le cas du contexte de la mine Bouchard-Hébert peuvent être extrapolées à d'autres environnements semblables.

Les résultats de cette étude ont des implications pratiques dans l'exploitation de mines. Par exemple, pour prévenir les risques d'inondations dans une mine et l'instabilité de ses infrastructures, il est tout indiqué dans une première étape, de procéder à une caractérisation géochimique des eaux souterraines, afin d'identifier les eaux à pH acide et à concentration élevée en métaux. Il est préférable que ces eaux soient pompées à la surface séparément des autres eaux et traitées indépendamment, étant donné que l'effet des eaux acides sur le volume total des eaux pompées dans le bassin de sédimentation en surface reste notable même après la dilution de ces eaux acides. Ceci réduirait donc le volume total d'eau à traiter, étant donné que les eaux à pH presque neutre issues des différentes parties de la mine n'ont pas à être traitées dans la majorité des cas, ou du moins elles nécessitent

moins de traitement, car elles ont un pH autour de la neutralité et des concentrations faibles en métaux. Aussi, puisque le plus souvent les arrivées d'eau dans les excavations sont inattendues, un échantillonnage régulier de l'eau à différents endroits de la mine permettrait de suivre l'évolution géochimique de ces eaux et d'estimer le taux des réactions chimiques de dissolution et d'oxydation des minéraux présents essentiellement dans les veines, en particulier dans le massif rocheux situé juste en-dessous d'anciennes excavations et à conductivité hydraulique plus élevée.

Des travaux de surveillance de l'état des veines sur les murs des différentes galeries en-dessous des anciennes excavations et de leur échantillonnage s'avèrent aussi utiles pour vérifier le type de mécanisme de dissolution qui domine dans un tel contexte, e.g. dissolution à la surface des cristaux de calcite versus dissolution par chenalisation.

17 CONCLUSION SUR LES LIENS TERRAIN-LABORATOIRE

Les travaux de terrain et de laboratoire sur les processus chimiques, mécaniques et hydrauliques et leur couplage dans le massif rocheux fracturé de la mine Bouchard-Hébert se complètent les uns les autres. Leur intégration permet une compréhension plus réaliste de l'état du massif rocheux séparant les anciennes et les nouvelles excavations d'une part, et d'autre part d'identifier les zones les plus vulnérables du point de vue hydraulique à la suite des perturbations des processus chimiques et mécaniques.

Les difficultés reliées à l'extrapolation du laboratoire au terrain sont dues à la différence d'échelle dans le temps et dans l'espace et à l'hétérogénéité structurale, minéralogique des veines et lithologique du massif rocheux.

18 CONCLUSION GENERALE

L'étude réalisée sur les processus chimiques, mécaniques et hydrauliques et leur couplage dans le massif rocheux fracturé de la mine Bouchard-Hébert, démontre bien, d'une part, l'importance de considérer ces processus ensemble; elle démontre aussi qu'un site minier en exploitation constitue un exemple de contexte approprié pour l'étude de ces processus.

Les travaux de terrain à la mine, incluant la cartographie de fractures, les essais hydrauliques en forage et l'étude géochimique de l'eau, ont permis de caractériser le massif rocheux fracturé et de déterminer que la partie ouest de la galerie 6A est la zone la plus perméable et pouvant jouer un rôle important dans la circulation des eaux acides des anciennes excavations vers les nouvelles plus profondes.

Les résultats des essais en laboratoire montrent qu'une variation relativement faible de la composition chimique de l'eau et de son pH cause des réactions géochimiques différentes à l'intérieur des plans des fractures et avec des effets considérablement différents sur leur transmissivité. En effet, l'eau à pH 2 et à concentration élevée en ion sulfate tend à faire augmenter d'une façon rapide la transmissivité des fractures en dissolvant la calcite, principal minéral de remplissage. Le taux de dissolution de la calcite

est relativement élevé et la chenalisation est le phénomène important qui se produit dans ce type d'essais. Pour des eaux avec une teneur moins élevée en sulfate et à pH 2,5, la transmissivité des fractures diminue indépendamment de la pression d'injection d'eau et de la pression de confinement. Cette diminution de la transmissivité est due à un faible taux de dissolution la calcite et à un important dépôt d'hydroxydes sur les surfaces des fractures, résultant en une fermeture partielle de ces dernières. Dans le cas des essais à pH 2,5, les chenaux sont peu développés dans les fractures. Les eaux à pH 4 et à pH 7 ont sur la transmissivité des fractures un effet similaire à celui de l'eau à pH 2,5 mais avec peu de dépôt d'hydroxydes en particulier dans le cas de l'eau à pH 4.

Les phénomènes observés à l'échelle d'une fracture et durant une courte période de temps, sous des conditions favorables, peuvent se produire à l'échelle du massif rocheux et sur une période de temps plus longue. La présence des eaux acides, surtout à pH 2, dans les anciennes excavations à la mine peut donc aboutir à un changement du comportement hydraulique du massif rocheux environnant, par une augmentation de sa perméabilité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARJANG, B., 1996. In situ ground stresses in the Abitibi Mining District. CIM Bulletin, **89**, no. 996, 65-71.
- BARAGAR, W. R. A. 1968. Major-element geochemistry of the Noranda volcanic belt, Quebec-Ontario. Canadian Journal of Earth Sciences, **5**, pp. 773-790.
- BARRET, T. J., CATTALANI, S. HOY, L. RIOPEL, J. et LAFLEUR, P-J., 1992. Massive sulfide deposits of the Noranda area, Québec. IV. The Mobrún mine. Canadian Journal of Earth Sciences, **29**, pp. 1349-1374.
- BATHURST, R. G. C., 1958. Diagenetic fabrics in some British Dinantian limestones. Liverpool Manchester Geol. J., no. 2, 11-36.
- BARTON, N., BANDIS, S. et BAKHTAR, K., 1985. Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, **22**, no. 3, 121-140.
- BEKRI, S., THOVERT, J.-F. et ADLER, P. M., 1997. Dissolution and deposition in fractures. Engineering Geology, **48**, 283-308.
- CHAPMAN, B. M., JONES, D. R. et JUNG, R. F., 1983. Processes controlling metal ion attenuation in acid mine drainage streams. Geochimica et Cosmochimica Acta, **47**, 1957-1973.

- CHOU, L., GARRELS, R. M. et WOLLAST, R., 1989. Comparative study of the kinetics and mechanisms of dissolution of carbonate minerals. *Chemical Geology*, **78**, 269-282.
- COOK, N.G.W., 1992. Natural joints in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under stress. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci.*, **29**, no. 3, 198-223.
- DERSHOWITZ, W. S. et HERDA, H. H., 1992. Interpretation of fracture spacing and intensity. Dans *Rock Mechanics*, Tollerson & Wawersik (éditeurs). Balkema, Rotterdam, 757-766.
- DIJK, P. et BERKOWITZ, B., 1998. Precipitation and dissolution of reactive solutes in fractures. *Water Resour. Res.*, **34**, no. 3, 457-470.
- DION, C. et GUHA, J., 1994. Minéralisation aurifère du secteur oriental de la bande Caopatina-Desmaraisville. Rapport pour le Ministère de l'énergie et des ressources, Édition Val-d'Or. 146p.
- DREYBRODT, W., LAUCKNER, J, ZAIHUA, L, SVENSSON, U. et BUHMANN, D., 1996. The kinetics of reaction $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ as one of the reaction steps for the dissolution of calcite in the system $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CaCO}_3$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **60**, no. 18, 3375-3381.
- DURHAM, W. B. et BOURCIER W. L., 2001. Direct observation of reactive flow in a single fracture. *Water Resour. Res.*, **37**, no. 1, 1-12.

- DYKE, C. 1995. How sensitive is natural permeability at depth to variation in effective stress? Dans *Fractured and Jointed Rock Masses*, Myer, Cook, Goodman et Tsang (Editeurs), Balkema, Rotterdam, 81-88.
- FERNANDEZ-RUBIO, R., FERNANDEZ-LORCA, S. et ESTEBAN, A. 1987. Preventive Techniques for controlling acide water in underground Mines by Flooding. *International Journal of Mine Water*, **6**: no. 3, 39-52.
- GALE, J. E. 1982. The effects of fracture type (induced versus natural) on the stress, fracture-closure, fracture-permeability relationships. *Proceedings 23rd U.S. Rock Mechanics Symposium*, Berkeley, California, 290-298.
- GALE, J. E. et REARDON, E. J. 1984. Effects of groundwater geochemistry on the permeability of grouted fractures. *Can. Geotech. J.*, **21**: 8-20.
- GALE, J. E., MACLEOD, R. et LE MESSURIER, P. 1990. Site characterization and validation. Measurement of flowrate, solute velocities and aperture-variation in natural fractures as function of normal and shear stress, stage 3. Technical Report Stripa project 90-11, SKB, Stockholm.
- GÉLINAS, L., BROOKS, C. et PERRAULT, G. 1977. Chemostratigraphic divisions within the Abitibi volcanic belt, Rouyn-Noranda, Québec. *Volcanic regimes in Canada*, éditeurs : BARAGAR, W. R. A., COLEMAN, L. C. et HALL J. H. Geological Association of Canada, Special Paper, **16**, 265-295.
- GÉLINAS, L., TRUDEL, P. et HUBERT, C. 1984. Chemostratigraphic division of the Blake River Group, Rouyn-Noranda area, Abitibi, Québec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **21**, 220-229.

- GENTIER, S. 1986. Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture dans le granite sous contrainte normale. Étude expérimentale et théorique. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans. Document du BRGM, no. 134, 597p.
- GENTIER, S., 1995. Expérience d'écoulement dans une fracture pour la validation des modèles couplés chimie-hydro-thermo-mécanique en milieu fracturé. Rapport interne R 38493, BRGM, France, 171p.
- GOLUBEV, V. S. et GARIBYANTS, A. A. 1971. Heterogeneous processes of geochemical migration. Traduit du Russe par FITZSIMMONS J. P. A Special Research Report. "Bureau de consultant", 150p.
- HAKAMI, E., EKSTAV, A. et QVARFORT, U. 1991. Sealing of rock joints by induced calcite precipitation: A case study from Bergeforsen hydro power plant. SKB Technical Report, 91-10, 13p.
- INDRARATNA, B. et SINGH, R. N. 1994. Distinct element analysis of water inflow to underground excavations. *Mine Water and the Environment*, **13**, 11-24.
- IWAI, K. 1976. Fundamental studies of fluid flow through a single fracture. Thèse de Ph.D. Université de California, Berkeley, 208p.
- KELSALL, P. C., CASE, J. B. et CHARANNES, C. R., 1984. Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **21**, no. 3, 123-135.
- LADWING, J. 1985. Hydrologic aspects of acide mine drainage control. U.S. Bureau of Mines Inform. Circ., no. IC-9027, 12-18.

- LAMONTAGNE, E., 2001. Étude hydromécanique d'une fracture en cisaillement sous contrainte normale constante. Thèse de doctorat. Université du Québec à Chicoutimi, Québec. 484p.
- LAPCEVIC, A., 1988. Results of borehole packer tests at the Ville Mercier Groundwater treatment site. NWRI Contribution # 88, RRB-88-92, National Water Research Institute Canada Center for Inland Waters, Burlington, Ontario, 30p.
- LEMOS, J. V. et LORIG L. J. 1990. Hydromechanical modelling of jointed rock masses using the Distinct Element Method. Dans *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, Rossmanith (édition), Balkema, Rotterdam, 605-611.
- LEWIS, T. 1990. Fluids and Heat Flow. Mineralogical association of Canada, Short course on 'Crustal Fluids', B. E. NESBITT (editeur), **18**, 49-74.
- LOUIS, C. 1967. Étude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leur influence sur la stabilité des massifs rocheux. Thèse Doctorale de l'Université de Karlsruhe, 128p.
- MAKURAT, A., BARTON, N. et RAD, N. S. 1990. Joint conductivity variation due to normal and shear deformation. *Rock Joints*, Barton & Stephanson (éditeurs). Balkema, Rotterdam, 535-540.
- MARONE, C. et RUBENSTONE, J., 1988. An experimental study of permeability and fluid chemistry in an artificially jointed marble. *Journal of Geophysical Research*, **93**, no. B11, 13763-13775.
- MILLARD, A., DURIN, M. STIETEL, A. et al. 1995. Discrete and continuum approaches to simulate the thermo-hydro-mechanical couplings in large, fractured rock mass. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **32**: 409-434.

- MONTAZER, P., CHITOMBO, G., KING, R. et UBBES, W. F. 1982. Spacial distribution of permeability around CSM/ONWI room, Edgar Mine, Idaho Springs, Colorado. Proceeding 23 rd symposium on Rock Mechanics, Berkeley, 47-56.
- MORSE, J., W. 1974. Dissolution kinetics of calcium carbonate in sea water. III: A new method for the study of carbonate reaction kinetics. *American Journal of Science*, **274**: 97-107.
- NELSON, P. et WILSON, C. 1980. Thermomechanical and macropermeability experiments in the Stripa granite-Status report. Proceeding of Workshop on thermomechanical-Hydrochemical Modeling for a Hardrock Waste Repository, LBL-11204, Lawrence Berkeley Laboratory.
- NOORISHAD, J., AYATOLLAHI, M. S. et WITHERSPOON, P. A. 1982. A finite-element method for coupled stress and fluid flow analysis in fractured rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, **19**, 185-93.
- NOORISHAD, J., TSANG, C. F. et WITHERSPOON, P. A. 1992. Theoretical and field studies of coupled hydromechanical behaviour of fractured rocks-1. Development and verification of a numerical simulator. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, **29**, no. 4, 401-409.
- OLSSON, W. A. 1992. The effect of slip on the flow of fluid through a fracture. *Geophysical Research Letters*, **19**, no. 6, 541-543.
- PARKHURST D.L., THORSTENSON D. C. & PLUMMER L.N., 1993. PHREEQE: A computer program for geochemical calculations. Water-Ressources Investigations Report 80-96. USGS, 195p.

- PLUMMER, L. N. et WIGLEY, T. M. L. 1976. The dissolution of calcite in CO₂ saturated solutions at 25°C and 1 atmosphere total pressure. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **44**, 191-202.
- RAVEN, K. G. et GALE, J. E. 1985. Water flow in a natural rock fracture as a function of stress and sample size. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **22**, 251-261.
- ROULEAU, A., 1984. Statistical characterization and numerical simulation of a fracture system: application to groundwater flow in the Stripa Granite; thèse de Ph.D., Dept. of Earth Sciences, University of Waterloo, Ont. 416p.
- RUEL, M. 1995. Geology of the Moberun Mine. In *Metallogeny and Tectonic Evolution of the Rouyn-Noranda Region*. Couture J-F. & Goutier J.(Editeurs). ICM, Section Rouyn-Noranda, 33-37.
- RUTQVIST, J., NOORISHAD, J., STEPHANSSON, O. et TSANG, C. F. 1992. Theoretical and field studies of coupled hydromechanical behaviour of fractured rocks-2. Field Experiment and modelling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **29**, no. 4, 411-419.
- SJOBERG, E. L., 1976. A fundamental equation for calcite dissolution kinetics. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 40, pp. 441-447.
- SJOBERG, E. L. et RICHARD, D. T., 1984. Temperature dependence of calcite dissolution kinetics between 1 and 62°C at pH 2.7 and 8.4 in aqueous solutions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. **48**, pp.485-493.
- TALOBRE, J. A., 1967. *La mécanique des roches*. Dumont (deuxième édition), Paris , 29-48.

- THIEM, G., 1906. Hydrologische methoden. Leipzig, 56p.
- TRUDEL, P. 1979. Le volcanisme Archéen et la géologie structurale de la région de Cléricy, Abitibi, Québec. Thèse de Ph.D., École polytechnique, Montréal, Québec.
- TSANG, Y. W. et WITHERSPOON, P. A. 1981. Hydromechanical behavior of a deformable rock fracture subject to normal stress. *J. Geophys. Res.*, **86**, 9287-9298.
- VARGAS, E., FELIPE, S., VAZ, L. et DUARTE, I. 1995. A continuum analysis of the hydromechanical coupling in fractured rock masses. Dans *Fractured and Jointed Rock Masses*. Balkema (édition) , 587-594.
- WEYL, P. K., 1959. Pressure solution and force of cristallization- A phenomenological theory. *J. Geophys. Res.*, no. 64, pp. 2001-2025.
- WILSON, C. R., WITHERSPOON, P. A., LONG, J. C. S., GALBRAITH, R. M., DuBOIS, A. O. et McPHERON, M. J. 1983. Large-scale hydraulic conductivity measurements in fractured granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **20**, no. 6, 269-276.
- WITHERSPOON, P. A., WANG, J. S. Y., IWAI, K. et GALE, J. E. 1980. Validation of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resources Research*, **16**, 1016-1024.
- YEO, I. W., DE FREITAS M. H. et ZIMMERMAN, R. W., 1998. Effect of shear displacement on the aperture and permeability of a rock fracture. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **35**, no. 8, 1051-1070.

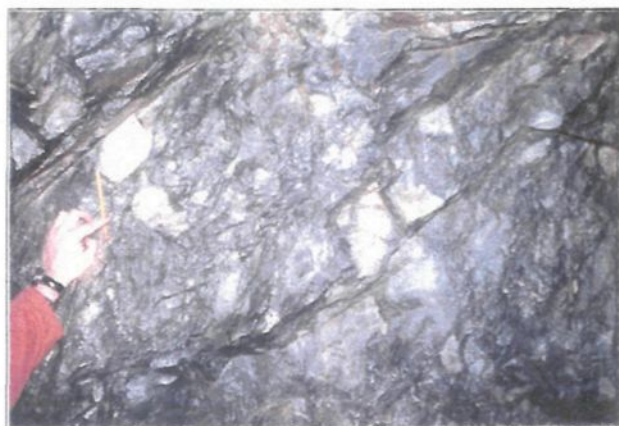
ANNEXES



Roche rhyolitique



Roche rhyolitique



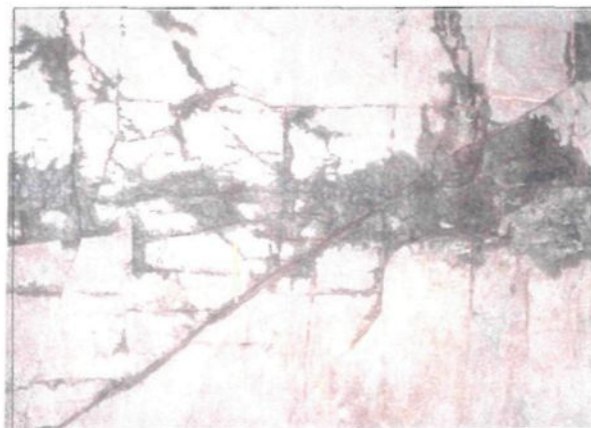
Roche pyroclastique



Roche rhyolitique



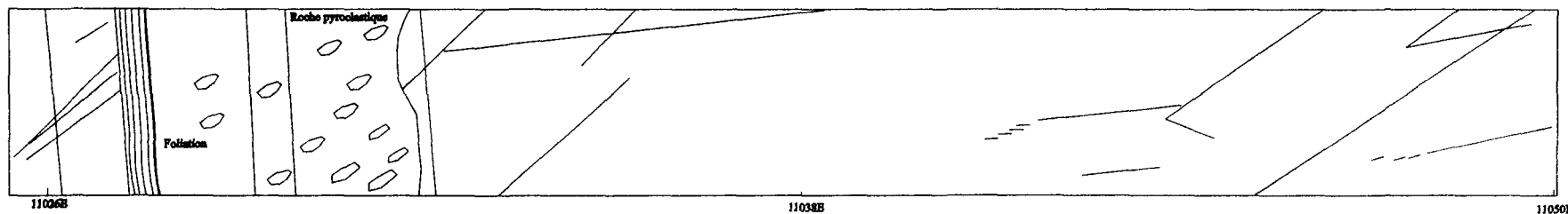
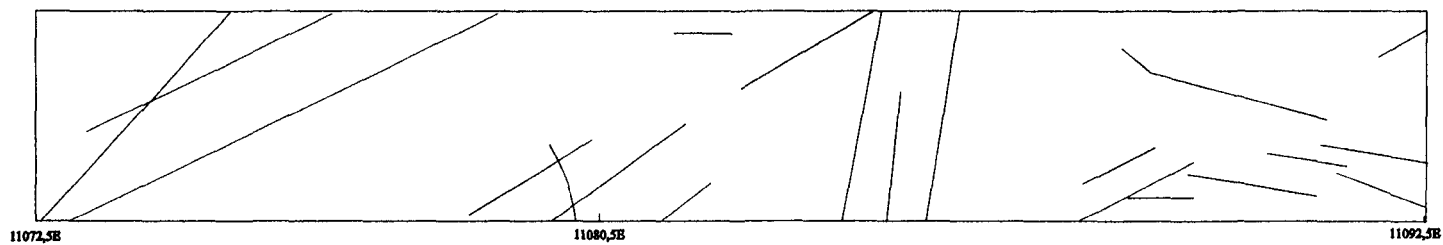
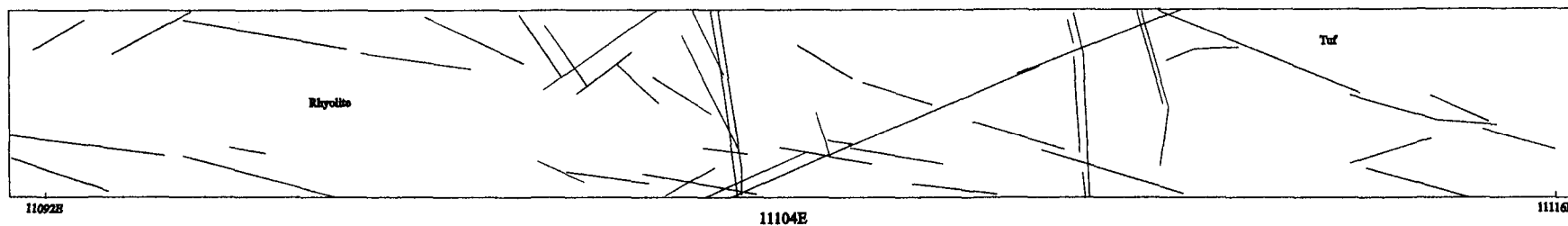
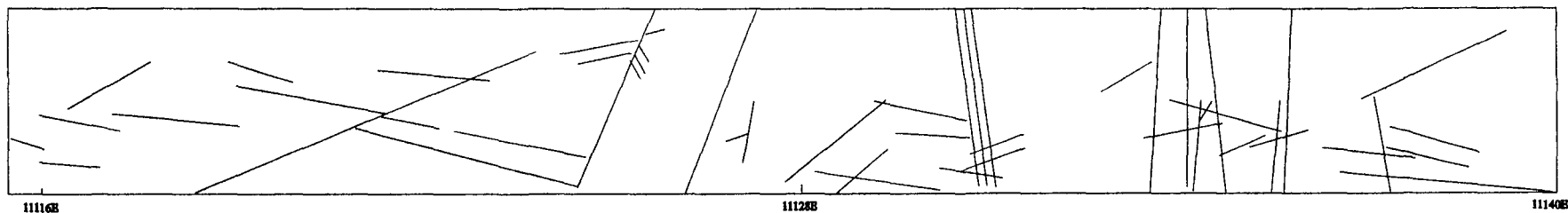
Roche rhyolitique



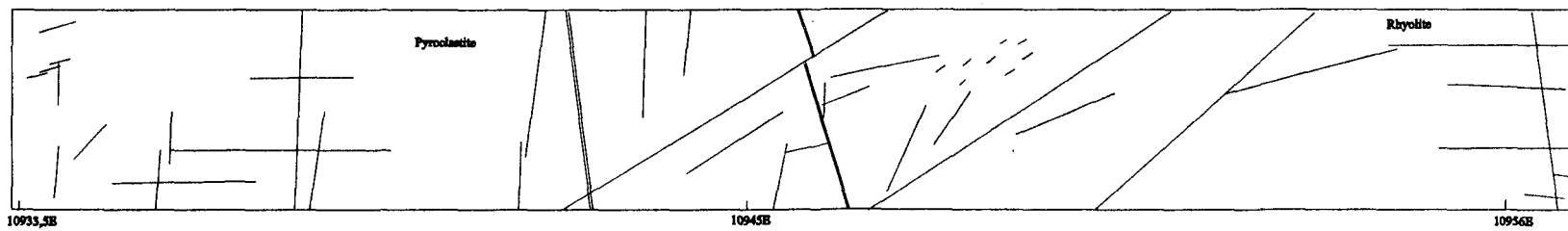
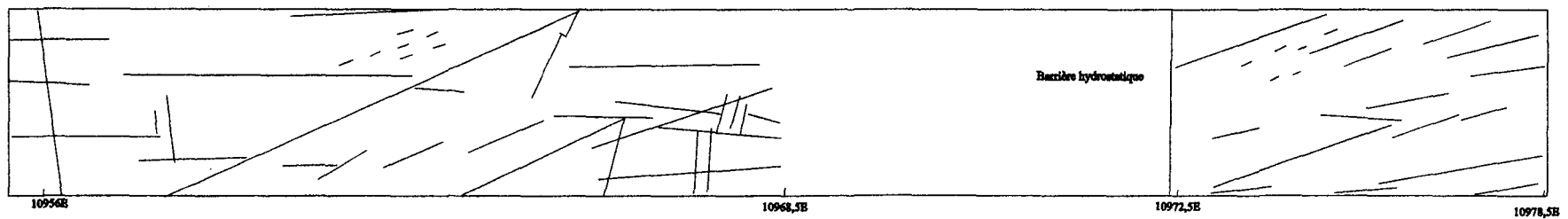
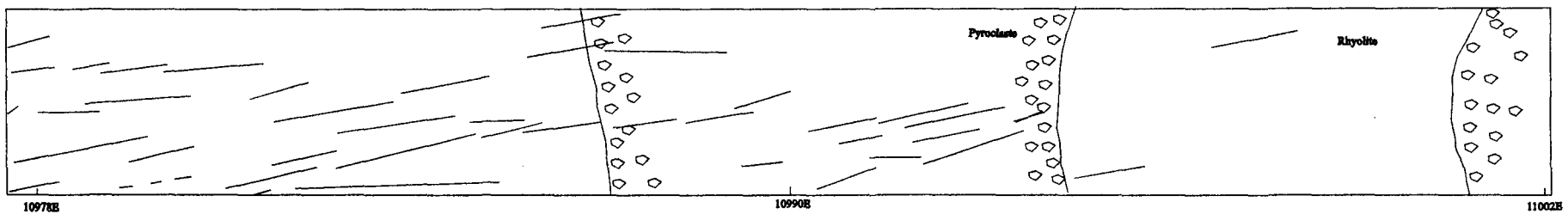
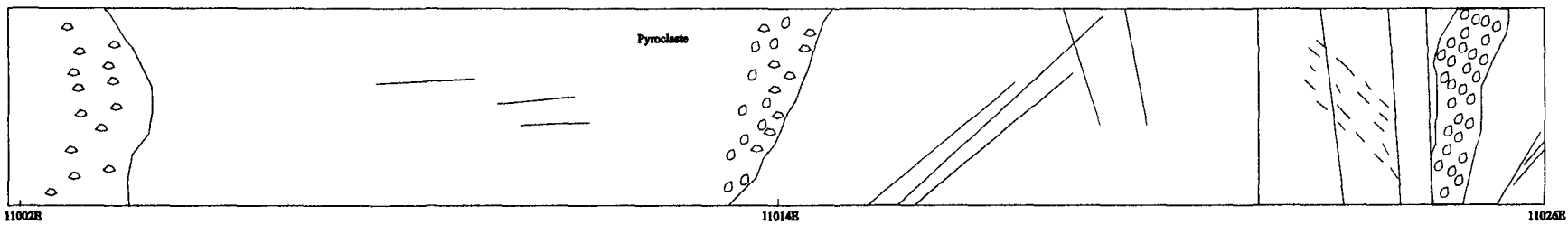
Roche rhyolitique

Annexe 1: Quelques photographies du mur cartographié de la galerie 6A à la mine Bouchard-Hébert.

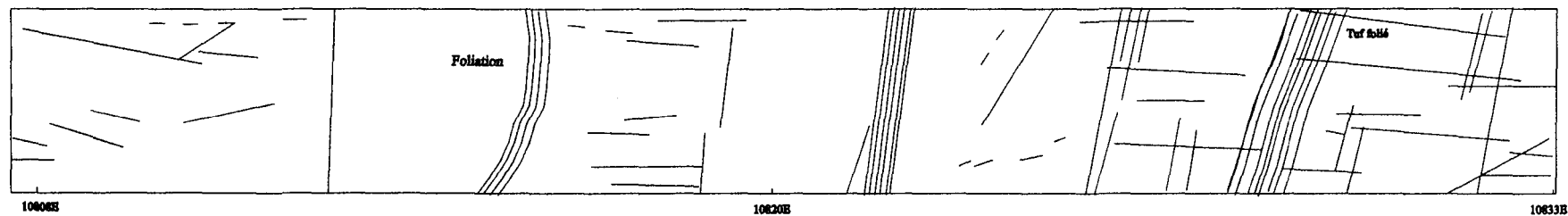
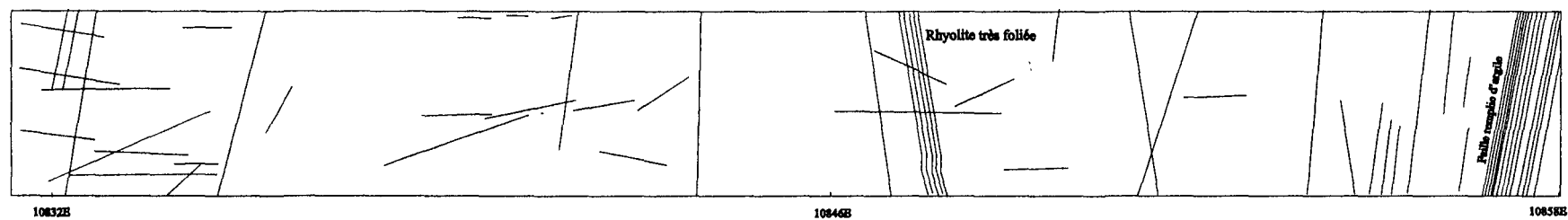
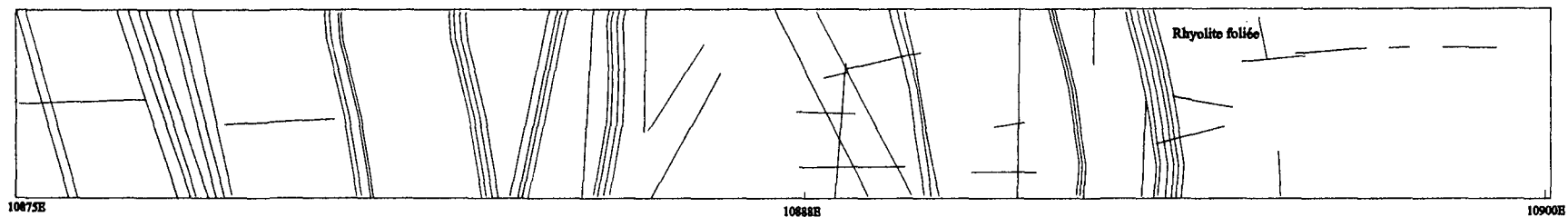
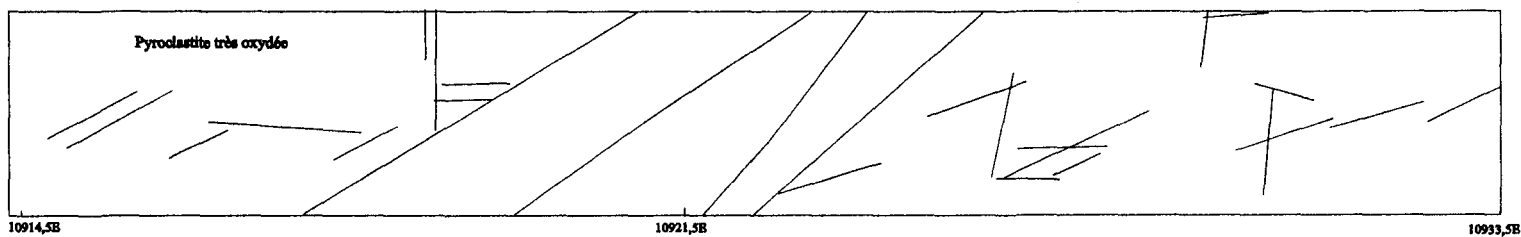
**Annexe 2 : Relevé de fractures sur le mur nord du niveau 6A de la mine
Bouchard-Hébert**



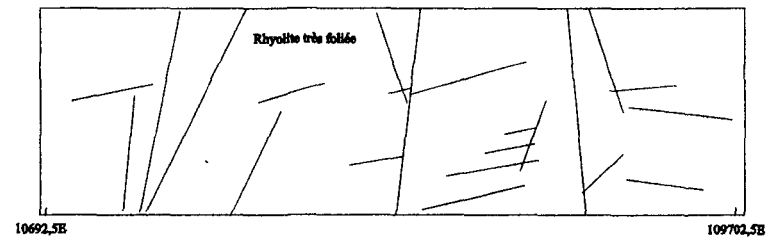
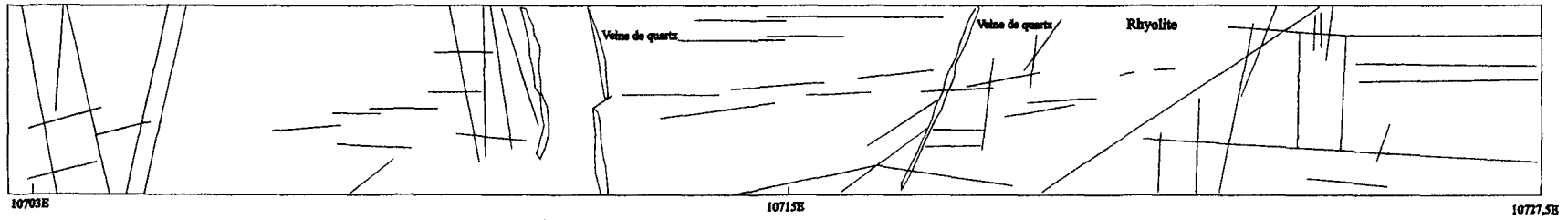
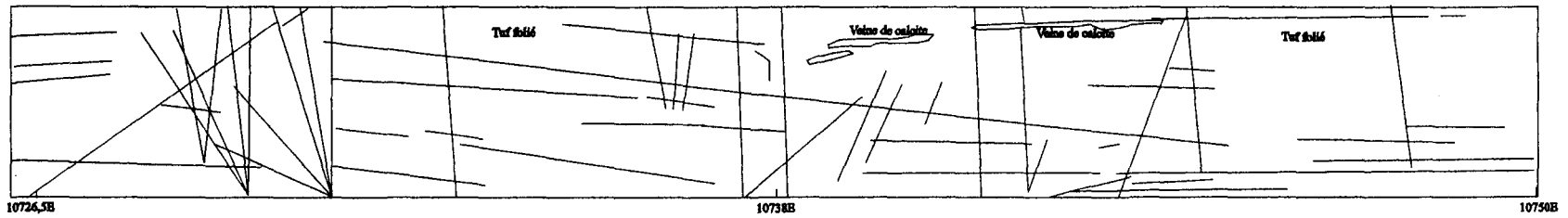
Annexe 2a: Relevé de fractures sur le mur nord du Niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.



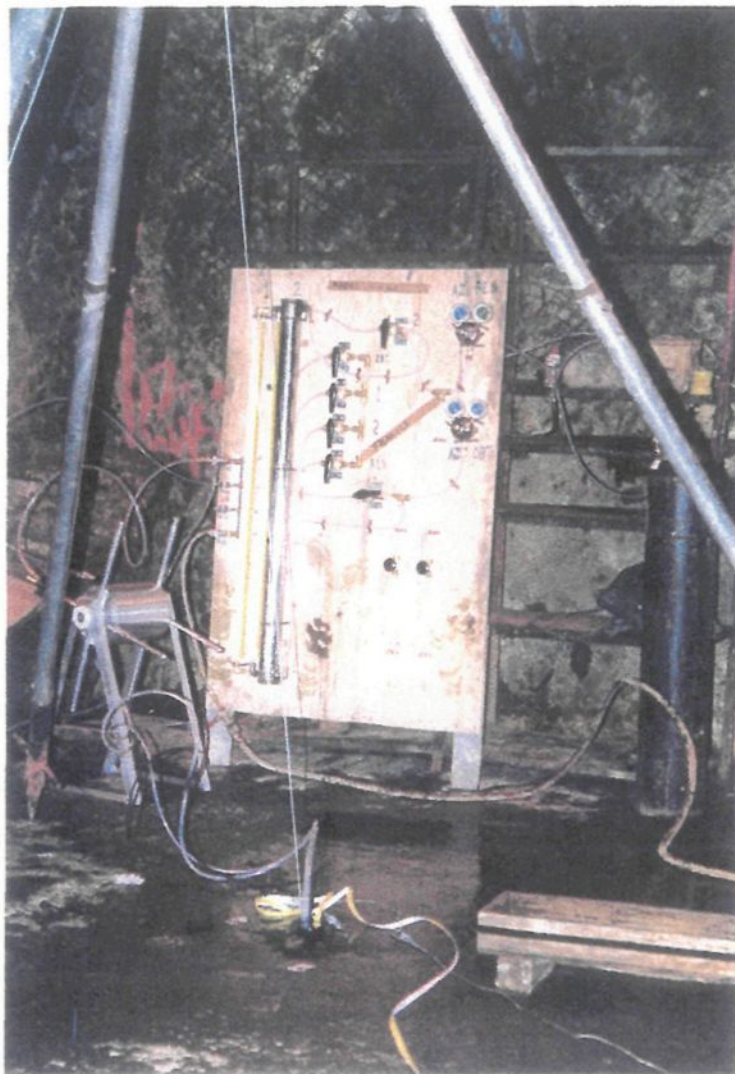
Annexe 2b: Relevé de fractures sur le mur nord du Niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert (suite).



Annexe 2c: Relevé de fractures sur le mur nord du Niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert (suite).



Annexe 2d: Relevé de fractures sur le mur nord du Niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert (suite).



Annexe 3: Photo du montage utilisé pour les essais hydrauliques en forage à la mine Bouchard-Hébert.

Annexe 4a: Résultats des essais hydrauliques dans le forage 6A-03.

Intervalle no.	Profondeur de à (m)	Hp (mV)	Hp (mV/0,0287) (KPa)	Hp (mV*3,557) (m)	H ₀ (mV)	H ₀ (KPa)	H ₀ (m)	H ₁ (mV)	H ₁ (KPa)	H ₁ (m)	H ₀ -H ₁ (ΔH) (m)	V résér. d'inj. (m ³ /cm)	P obtur. (Psi)	P d'inj. (Psi)	Écoulement (cm/s)	Debit (m ³ /sec)	K (m/s)
1	48.85 à 50.35	13.4	466.9	47.7	12.9	449.5	45.9	22.0	766.6	78.3	32.4	7.13E-07	220	50	4.48E-02	3.19E-08	6.08E-10
2	47.45 à 48.95	13.0	453.0	46.2	12.5	435.5	44.5	24.9	867.6	88.6	44.1	3.83E-05	220	75	3.74E-01	1.43E-05	2.00E-07
3	46.05 à 47.55	12.6	439.0	44.8	14.0	487.8	49.8	22.2	773.5	79.0	29.2	3.83E-05	200	75	8.09E-01	3.10E-05	6.55E-07
4	44.65 à 46.15	12.2	425.1	43.4	12.4	432.1	44.1	22.0	766.6	78.3	34.1	3.83E-05	200	75	7.91E-01	3.03E-05	5.47E-07
5	43.25 à 44.75	11.8	411.1	42.0	11.9	414.6	42.3	21.6	752.6	76.8	34.5	3.83E-05	200	75	7.83E-01	3.00E-05	5.36E-07
6	41.85 à 43.35	11.5	400.7	40.9	12.0	418.1	42.7	21.9	763.1	77.9	35.2	3.83E-05	200	75	6.01E-01	2.30E-05	4.03E-07
7	40.45 à 41.95	11.1	386.8	39.5	11.7	407.7	41.6	21.6	752.6	76.8	35.2	3.83E-05	200	75	7.28E-01	2.79E-05	4.88E-07
8	39.05 à 40.55	10.7	372.8	38.1	12.4	432.1	44.1	20.7	721.3	73.6	29.5	3.83E-05	180	75	7.59E-01	2.91E-05	6.07E-07
9	37.65 à 39.15	10.3	358.9	36.6	12.5	435.5	44.5	21.1	735.2	75.1	30.6	3.83E-05	180	75	6.45E-01	2.47E-05	4.98E-07
10	36.25 à 37.75	9.9	344.9	35.2	13.6	473.9	48.4	21.1	735.2	75.1	26.7	3.83E-05	180	75	4.35E-01	1.67E-05	3.85E-07
11	34.85 à 36.35	9.5	331.0	33.8	13.2	459.9	47.0	19.7	686.4	70.1	23.1	3.83E-05	180	75	7.36E-01	2.82E-05	7.51E-07
12	33.45 à 34.95	9.1	317.1	32.4	11.5	400.7	40.9	18.5	644.6	65.8	24.9	3.83E-05	200	75	7.23E-01	2.77E-05	6.85E-07
13	32.05 à 33.55	8.8	306.6	31.3	9.6	334.5	34.1	18.4	641.1	65.4	31.3	3.83E-05	200	75	8.56E-01	3.28E-05	6.46E-07
14	30.65 à 32.15	8.4	292.7	29.9	9.4	327.5	33.4	20.5	714.3	72.9	39.5	3.83E-05	200	75	2.38E-01	9.12E-06	1.42E-07
15	29.25 à 30.75	8.0	278.7	28.5	8.6	299.7	30.6	19.7	686.4	70.1	39.5	3.83E-05	200	75	3.26E-01	1.25E-05	1.95E-07
16	27.85 à 29.35	7.6	264.8	27.0	9.0	313.6	32.0	20.2	703.8	71.9	39.8	3.83E-05	200	75	4.35E-02	1.67E-06	2.58E-08
17	26.45 à 27.95	7.3	254.4	26.0	9.3	324.0	33.1	20.1	700.3	71.5	38.4	3.83E-05	200	75	1.46E-01	5.59E-06	8.97E-08
18	25.05 à 26.55	6.9	240.4	24.5	9.1	317.1	32.4	20.0	696.9	71.1	38.8	7.13E-07	200	75	3.45E-02	2.46E-08	3.91E-10
19	23.65 à 25.15	6.5	226.5	23.1	9.8	341.5	34.9	19.1	665.5	67.9	33.1	3.83E-05	200	75	1.80E-01	6.89E-06	1.28E-07
20	22.25 à 23.75	6.1	212.5	21.7	12.3	428.6	43.8	18.6	648.1	66.2	22.4	7.13E-07	200	75	3.46E-01	2.47E-07	6.79E-09
21	20.85 à 22.35	5.7	198.6	20.3	6.6	230.0	23.5	17.5	609.8	62.2	38.8	3.83E-05	180	75	4.83E-01	1.85E-05	2.94E-07
22	19.45 à 20.95	5.3	184.7	18.9	9.0	313.6	32.0	16.0	557.5	56.9	24.9	3.83E-05	180	75	3.84E-01	1.47E-05	3.64E-07
23	18.05 à 19.55	5.0	174.2	17.8	8.1	282.2	28.8	17.4	606.3	61.9	33.1	3.83E-05	180	75	1.57E-01	6.01E-06	1.12E-07
24	16.65 à 18.15	4.6	160.3	16.4	8.1	282.2	28.8	16.8	585.4	59.8	30.9	3.83E-05	180	75	1.32E-01	5.06E-06	1.01E-07
25	15.25 à 16.75	4.2	146.3	14.9	8.1	282.2	28.8	18.0	627.2	64.0	35.2	7.13E-07	180	75	1.84E+00	1.31E-06	2.30E-08
26	13.85 à 15.35	3.8	132.4	13.5	8.0	278.7	28.5	17.1	595.8	60.8	32.4	7.13E-07	180	75	1.17E-01	8.34E-08	1.59E-09
27	12.45 à 13.95	3.4	118.5	12.1	8.0	278.7	28.5	16.8	585.4	59.8	31.3	7.13E-07	180	75	6.50E-02	4.63E-08	9.13E-10
28	11.05 à 12.55	3.1	108.0	11.0	6.8	236.9	24.2	16.5	574.9	58.7	34.5	7.13E-07	180	75	9.20E-02	6.56E-08	1.17E-09
29	9.65 à 11.15	2.7	94.1	9.6	6.5	226.5	23.1	15.3	533.1	54.4	31.3	7.13E-07	180	75	1.79E-02	1.28E-08	2.51E-10
30	8.25 à 9.75	2.3	80.1	8.2	8.0	278.7	28.5	15.1	526.1	53.7	25.3	7.13E-07	180	75	1.60E-02	1.14E-08	2.78E-10
31	6.85 à 8.35	1.9	66.2	6.8	4.9	170.7	17.4	15.2	529.6	54.1	36.6	7.13E-07	180	75	1.45E-02	1.03E-08	1.74E-10
32	5.45 à 6.95	1.6	55.7	5.7	8.0	278.7	28.5	18.1	630.7	64.4	35.9	3.83E-05	200	100	4.43E-01	1.70E-05	2.91E-07
33	4.05 à 5.55	1.2	41.8	4.3	7.8	271.8	27.7	19.3	672.5	68.7	40.9	7.13E-07	200	100	1.56E-02	1.11E-08	1.68E-10
34	2.65 à 4.15	0.8	27.9	2.8	2.3	80.1	8.2	18.5	644.6	65.8	57.6	7.13E-07	200	100	8.40E-03	5.99E-09	6.41E-11

Légende

H_p : pression dans l'intervalle d'essai avant gonflement des obturateurs

H_0 : pression dans l'intervalle d'essai après gonflement des obturateurs

H_1 : pression dans l'intervalle d'essai lors de l'injection d'eau

V du résér. d'inj.: volume du réservoir d'injection

P obtr.: Pression du gonflement des obturateurs

P d'inj.: Pression d'injection d'eau

K : conductivité hydraulique

Annexe 4b: Résultats des essais hydrauliques dans le forage 6A-01.

Intervalle no.	Profondeur de à (m)	Hp (mV)	Hp (mV/0,0287) (KPa)	Hp (mV*3,557) (m)	H ₀ (mV)	H ₀ (KPa)	H ₀ (m)	H ₁ (mV)	H ₁ (KPa)	H ₁ (m)	H ₀ -H ₁ (ΔH) (m)	V réser. d'inj. (m ³ /cm)	P obtur. (Psi)	P d'inj. (Psi)	Écoulement (cm/s)	Debit (m ³ /sec)	K (m/s)
1	48.72 à 50.22	12.2	425.1	43.4	16.4	571.4	58.3	29.4	1024.4	104.6	46.2	7.13E-07	250	100	1.14E-02	8.13E-09	1.08E-10
2	47.32 à 48.82	11.8	411.1	42.0	25.2	878.0	89.6	29.1	1013.9	103.5	13.9	7.13E-07	250	100	4.72E-03	3.37E-09	1.50E-10
3	45.92 à 47.42	11.4	397.2	40.5	24.0	836.2	85.4	28.3	986.1	100.7	15.3	7.13E-07	250	100	1.86E-03	1.33E-09	5.34E-11
4	44.52 à 46.02	11.0	383.3	39.1	22.2	773.5	79.0	28.8	1003.5	102.4	23.5	7.13E-07	250	100	1.08E-02	7.70E-09	2.02E-10
5	43.12 à 44.62	10.7	372.8	38.1	26.8	933.8	95.3	27.7	965.2	98.5	3.2	7.13E-07	250	100	2.80E-03	2.00E-09	3.84E-10
6	41.72 à 43.22	10.4	362.4	37.0	15.0	522.6	53.4	27.1	944.3	96.4	43.0	7.13E-07	250	100	4.60E-03	3.28E-09	4.70E-11
7	40.32 à 41.82	10.2	355.4	36.3	11.8	411.1	42.0	26.6	926.8	94.6	52.6	7.13E-07	250	100	1.75E-03	1.25E-09	1.46E-11
8	38.92 à 40.42	9.8	341.5	34.9	18.0	627.2	64.0	25.8	899.0	91.8	27.7	7.13E-07	250	100	3.96E-02	2.82E-08	6.27E-10
9	37.52 à 39.02	9.4	327.5	33.4	20.0	696.9	71.1	25.9	902.4	92.1	21.0	7.13E-07	220	100	3.25E-02	2.32E-08	6.81E-10
10	36.12 à 37.62	9.0	313.6	32.0	17.3	602.8	61.5	25.9	902.4	92.1	30.6	7.13E-07	220	100	4.50E-02	3.21E-08	6.46E-10
11	34.72 à 36.22	8.7	303.1	30.9	22.4	780.5	79.7	25.7	895.5	91.4	11.7	7.13E-07	220	100	2.80E-02	1.99E-08	1.05E-09
12	33.32 à 34.82	8.4	292.7	29.9	21.3	742.2	75.8	25.3	881.5	90.0	14.2	7.13E-07	220	100	1.95E-02	1.39E-08	6.02E-10
13	31.92 à 33.42	8.0	278.7	28.5	20.6	717.8	73.3	25.1	874.6	89.3	16.0	7.13E-07	220	100	3.83E-02	2.73E-08	1.05E-09
14	30.52 à 32.02	7.7	268.3	27.4	16.6	578.4	59.0	24.9	867.6	88.6	29.5	7.13E-07	220	100	3.55E-02	2.53E-08	5.28E-10
15	29.12 à 30.62	7.4	257.8	26.3	18.3	637.6	65.1	24.2	843.2	86.1	21.0	7.13E-07	220	100	6.40E-03	4.56E-09	1.34E-10
16	27.72 à 29.22	7.0	243.9	24.9	17.7	616.7	63.0	24.6	857.1	87.5	24.5	7.13E-07	220	100	2.68E-02	1.91E-08	4.80E-10
17	26.62 à 28.02	6.7	233.4	23.8	14.3	498.3	50.9	24.6	857.1	87.5	36.6	7.13E-07	220	100	1.99E-02	1.42E-08	2.39E-10
18	25.12 à 26.62	6.4	223.0	22.8	19.1	665.5	67.9	24.0	836.2	85.4	17.4	7.13E-07	220	100	3.42E-03	2.44E-09	8.62E-11
19	23.72 à 25.22	6.0	209.1	21.3	20.0	696.9	71.1	22.9	797.9	81.5	10.3	7.13E-07	220	100	1.17E-02	8.34E-09	4.98E-10
20	22.32 à 23.82	5.7	198.6	20.3	17.0	592.3	60.5	22.9	797.9	81.5	21.0	7.13E-07	220	100	1.63E-02	1.16E-08	3.41E-10
21	20.92 à 22.42	5.4	188.2	19.2	17.0	592.3	60.5	22.1	770.0	78.6	18.1	7.13E-07	200	100	4.86E-02	3.47E-08	1.18E-09
22	19.52 à 21.02	5.0	174.2	17.8	13.4	466.9	47.7	22.3	777.0	79.3	31.7	7.13E-07	200	100	9.70E-02	6.91E-08	1.35E-09
23	18.12 à 19.62	4.7	163.8	16.7	17.8	620.2	63.3	21.5	749.1	76.5	13.2	7.13E-07	200	100	1.10E-01	7.86E-08	3.68E-09
24	16.72 à 18.22	4.3	149.8	15.3	17.0	592.3	60.5	21.5	749.1	76.5	16.0	7.13E-07	200	100	1.11E-01	7.89E-08	3.04E-09
25	15.32 à 16.82	3.9	135.9	13.9	18.5	644.6	65.8	21.4	745.6	76.1	10.3	7.13E-07	200	100	3.71E-02	2.65E-08	1.58E-09
26	13.92 à 15.42	3.6	125.4	12.8	16.0	557.5	56.9	21.2	738.7	75.4	18.5	7.13E-07	200	100	5.04E-02	3.59E-08	1.20E-09
27	12.52 à 14.02	3.3	115.0	11.7	18.1	630.7	64.4	20.3	707.3	72.2	7.8	7.13E-07	200	100	3.24E-02	2.31E-08	1.82E-09
28	11.12 à 12.62	3.0	104.5	10.7	18.4	641.1	65.4	20.1	700.3	71.5	6.0	7.13E-07	200	100	4.99E-02	3.56E-08	3.63E-09
29	9.72 à 11.22	2.6	90.6	9.2	18.6	648.1	66.2	19.6	682.9	69.7	3.6	7.13E-07	200	100	1.51E-02	1.08E-08	1.87E-09
30	8.22 à 9.82	2.3	80.1	8.2	16.6	578.4	59.0	19.9	693.4	70.8	11.7	7.13E-07	200	100	3.41E-02	2.43E-08	1.28E-09
31	6.92 à 8.42	2.0	69.7	7.1	11.8	411.1	42.0	18.9	658.5	67.2	25.3	7.13E-07	200	100	1.50E-02	1.07E-08	2.60E-10
32	5.52 à 7.02	1.6	55.7	5.7	14.0	487.8	49.8	19.0	662.0	67.6	17.8	7.13E-07	200	100	1.88E-02	1.34E-08	4.65E-10
33	4.12 à 5.62	1.3	45.3	4.6	17.8	620.2	63.3	19.5	679.4	69.4	6.0	7.13E-07	200	100	1.47E-02	1.05E-08	1.07E-09
34	2.85 à 4.35	0.8	27.9	2.8	15.5	540.1	55.1	18.2	634.1	64.7	9.6	7.13E-07	200	100	1.01E-02	7.20E-09	4.62E-10

ANNEXE 5 :

DESCRIPTION MACROSCOPIQUE DES ÉCHANTILLONS

TABLE DES MATIÈRES

ÉCHANTILLON 1 (PHOTOS 1)	394
ÉCHANTILLON 2 (PHOTOS 2)	396
ÉCHANTILLON 3 (PHOTOS 3)	398
ÉCHANTILLON 4 (PHOTOS 4)	400
ÉCHANTILLON 5 (PHOTOS 5)	402
ÉCHANTILLON 6 (PHOTOS 6)	404
ÉCHANTILLON 7 (PHOTOS 7)	406
ÉCHANTILLON 8 (PHOTOS 8)	408
ÉCHANTILLON 9 (PHOTOS 9)	410
ÉCHANTILLON 10 (PHOTOS 10)	412
ÉCHANTILLON 11 (PHOTOS 11)	414
ÉCHANTILLON 12 (PHOTOS 12)	416
ÉCHANTILLON 13 (PHOTOS 13)	418
ÉCHANTILLON 14 (PHOTOS 14)	420

Les échantillons de carotte de roche, d'un diamètre 3,65 cm, proviennent du trou de forage d'exploration 6A-01, situé au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert (figure 6.1). D'une plongée de 60° vers le nord, le trou de forage traverse le massif rocheux plus profond. La distance de ces échantillons le long du trou de forage est donnée dans le tableau ci-dessous.

No. d'échantillon	Distance le long du trou en m à partir du niveau 6A
1	27,3-27,5
2	64,8-65,2
3	30,4-30,7
4	19-19,8
5, 13	1123,4-1123,8
6	1016,7-1017
7	1120,3-1120,5
8	1119,2-1120
9	1119-1119,2
10	1008,7-1008,9
11	1165,3-1165,5
12	1108,6-1109
14	1111,9-1112,1

Des photos de chaque échantillon et des deux surfaces de la fracture ont été prises avant et après l'essai pour des fins de comparaison.

ÉCHANTILLON 1 (PHOTOS 1)

Échantillon 1 avant l'essai

La photo de l'échantillon 1 complet montre que la fracture forme un certain angle avec le grand axe de la carotte. La veine fracturée apparaît droite et de faible épaisseur, estimée à 1mm ou moins. Les deux surfaces de la fracture sont recouvertes d'une couche de minéraux qui est très fines à certains endroits, en particulier sur la face b.

Échantillon 1 après l'essai

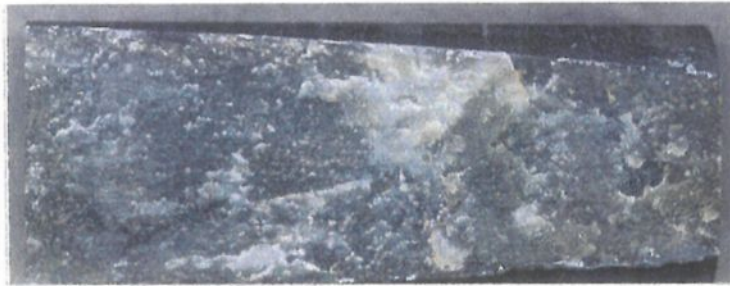
Les surfaces de la fracture après l'essai montrent l'amincissement de la couche de minéraux qui les recouvre, cédant la place à des chenaux. Une teinte brunâtre est observée sur une grande partie des deux surfaces de la fracture témoignant de la précipitation des hydroxydes.



1 cm
1 cm

dépôt d'oxydes chenaux

Surface b



→ Sens de l'écoulement

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 1: Échantillon 1 soumis aux essais à pH 7 et 2.

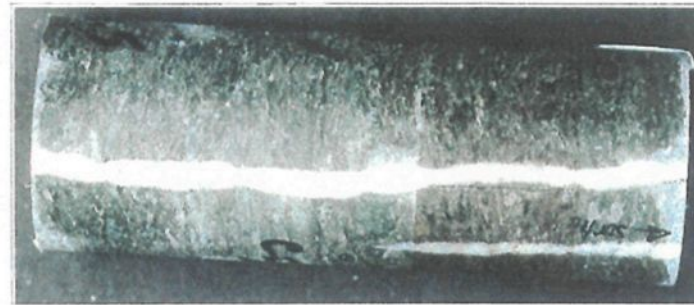
ÉCHANTILLON 2 (PHOTOS 2)

Échantillon 2 avant l'essai

La photo de l'échantillon 2 complet montre que la fracture est presque parallèle au grand axe de la carotte et passe sur une portion de l'échantillon à travers la matrice rocheuse. La fracture n'est pas droite et son épaisseur avec les minéraux de remplissage est estimée à 3 mm. Les deux surfaces de la fracture sont recouvertes presque en totalité d'une couche assez épaisse de minéraux.

Échantillon 2 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 2 après l'essai montrent la création d'un large chenal le long duquel toute la calcite a disparu laissant apparaître la matrice rocheuse. On remarque aussi des dépôts d'hydroxydes de couleur brunâtre formés sur les deux faces de la fracture le long du chenal créé.



1 cm
1 cm

Surface b



Dépôt d'oxydes

→ Sens de l'écoulement

Chenal

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 2: Échantillon 2 soumis aux essais à pH 7, 4 et 2.

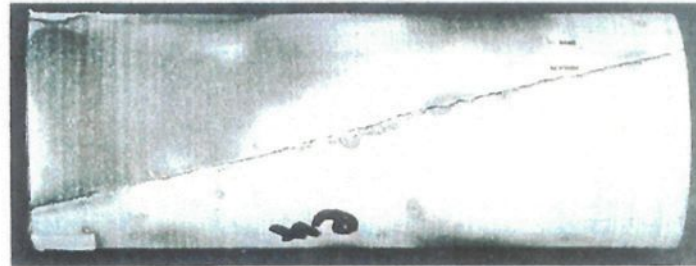
ÉCHANTILLON 3 (PHOTOS 3)

Échantillon 3 avant l'essai

La photo de l'échantillon 3 complet montre que la veine fracturée forme un certain angle avec le grand axe de la carotte. La fracture apparaît droite, peu rugueuse et ses minéraux de remplissage constituent une veine de faible épaisseur, estimée inférieure à 0,9 mm. Les deux surfaces de la fracture apparaissent recouvertes d'une fine couche de quartz et de calcite. On note à certains endroits l'existence de minéraux sulfurés, tels que la pyrite.

Échantillon 3 après l'essai

Les surfaces de la fracture 3 après l'essai montrent la dissolution de minéraux à plusieurs endroits surtout le long du chenal créé. Le chenal est plus large du côté de l'entrée d'eau dans la fracture et s'amincit vers sa sortie. On remarque aussi une légère teinte brunâtre le long du chenal témoignant de la précipitation des hydroxydes. Des minéraux sulfurés sont bien mis en évidence par le lessivage des autres minéraux dans la fracture.



1 cm
1 cm

Surface b



Sens de l'écoulement ←

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 3: Échantillon 3 soumis à l'essai à pH 2.

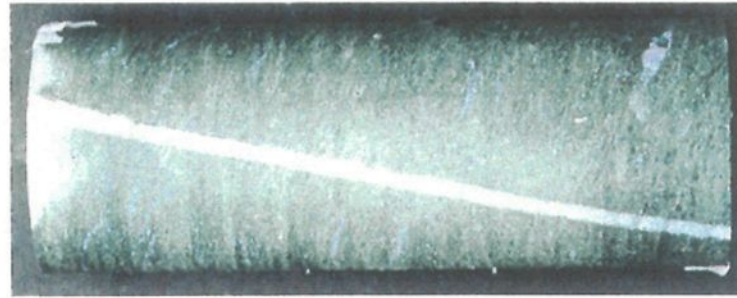
ÉCHANTILLON 4 (PHOTOS 4)

Échantillon 4 avant l'essai

La photo de l'échantillon 4 complet montre que la fracture forme un certain angle avec le grand axe de la carotte. La fracture a une allure droite. Elle est peu rugueuse et présente avec les minéraux de remplissage une épaisseur moyenne de 2,6 mm. La surface a de la fracture est recouverte d'une épaisse couche de minéraux sur une grande partie de sa surface alors que la surface b de la fracture n'est recouverte d'une couche de minéraux que sur sa moitié. Les minéraux de remplissage sont essentiellement le quartz et la calcite.

Échantillon 4 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 4 après l'essai montrent le développement de plusieurs petits chenaux surtout à l'entrée et d'un chenal principal qui traverse toute la fracture. L'eau a lessivé presque tous les minéraux de remplissage le long de son parcours, ce qui est plus apparent sur la face b et met en évidence la matrice rocheuse. Un léger dépôt d'hydroxydes est observé surtout à l'entrée le long des petits chenaux.

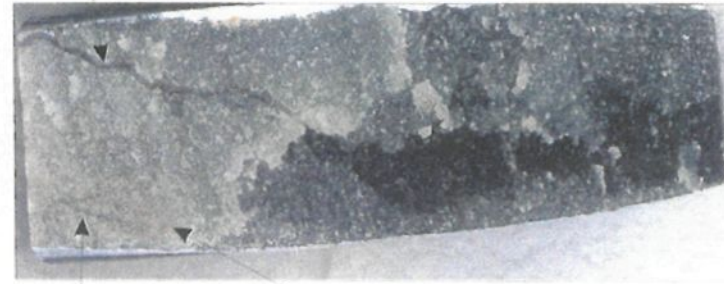


1 cm
1 cm

Surface b



chenal principal



chenal secondaire

dépôt d'oxydes

→ Sens de l'écoulement

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 4: Échantillon 4 soumis à l'essai à pH 2.

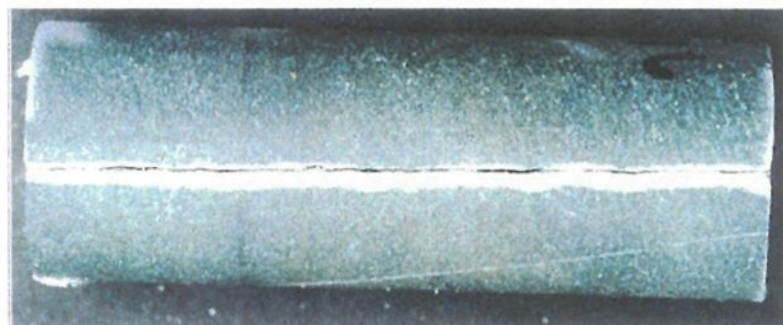
ÉCHANTILLON 5 (PHOTOS 5)

Échantillon 5 avant l'essai

La photo de l'échantillon 5 complet montre une fracture parallèle au grand axe de la carotte et qui passe au milieu de celle-ci. La fracture apparaît droite et lisse; et elle forme avec les minéraux de remplissage une veine d'épaisseur moyenne faible estimée à environ 3 mm. La face a de la fracture possède une couche plus épaisse de minéraux. La surface b est recouverte d'une fine couche de minéraux. À certains endroits, la fracture passe à travers la matrice rocheuse.

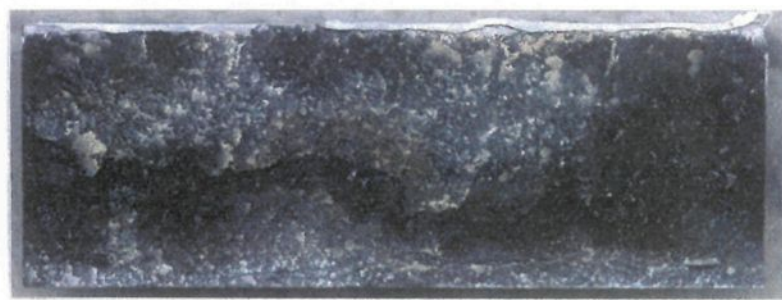
Échantillon 5 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 5 après l'essai montrent le développement d'un important chenal d'épaisseur variable le long de la fracture. Un léger dépôt d'hydroxydes est noté et localisé surtout de part et d'autre du chenal. La dissolution presque en totalité des minéraux le long du chenal sur la surface de la fracture permet de voir la matrice rocheuse, ceci de façon plus évidente sur la surface b où il n'y a qu'une fine couche de minéraux de remplissage.



1 cm
1 cm

Surface b



Surface a



→ Sens de l'écoulement
chenal dépôt d'oxydes

A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 5: Échantillon 5 soumis à l'essai à pH 2.

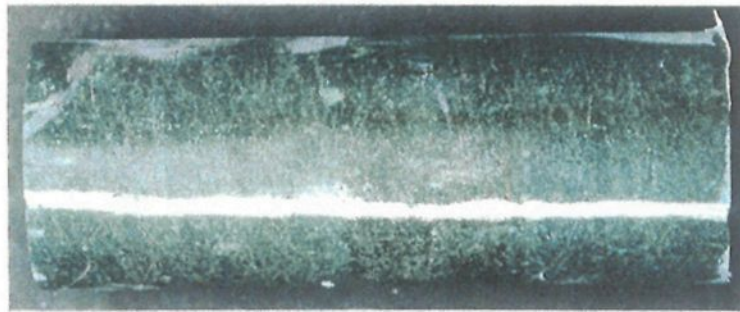
ÉCHANTILLON 6 (PHOTOS 6)

Échantillon 6 avant l'essai

La photo de l'échantillon 6 complet montre une fracture légèrement inclinée par rapport au grand axe de la carotte. La fracture apparaît droite et lisse; et elle forme avec les minéraux de remplissage une veine d'épaisseur moyenne estimée à environ 2,6 mm. Les deux surfaces de la fracture apparaissent recouvertes d'une épaisse couche de minéraux. La face a présente à certains endroits une très fine couche de minéraux.

Échantillon 6 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 6 après l'essai montrent la formation d'un chenal principal avec plusieurs bifurcations. Un deuxième chenal plus court est aussi formé à l'entrée de la fracture. Des dépôts d'hydroxydes sont très notables de part et d'autre le long des chenaux.



1 cm
1 cm

Surface b



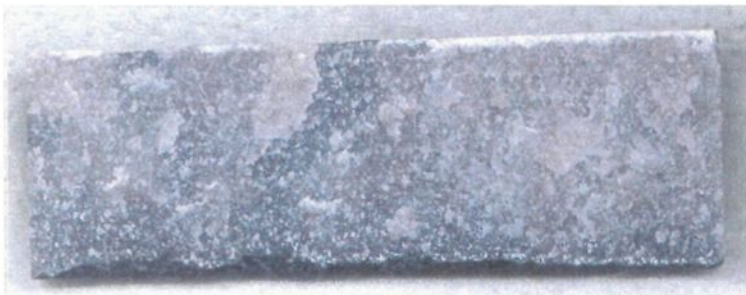
chenal

dépôt d'oxydes



→ Sens de l'écoulement

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 6: Échantillon 6 soumis à l'essai à pH 2.

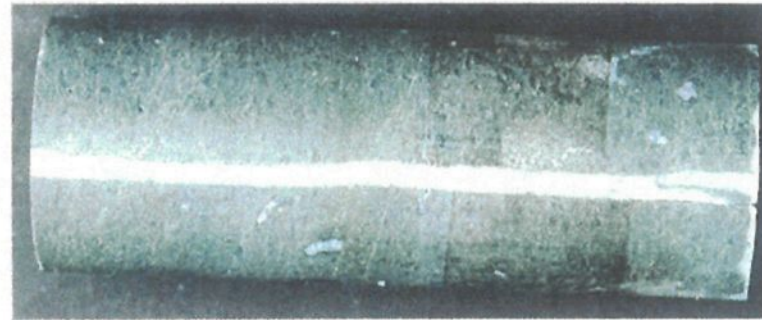
ÉCHANTILLON 7 (PHOTOS 7)

Échantillon 7 avant l'essai

La photo de l'échantillon 7 complet (photos 7) montre une fracture droite, non centrée mais parallèle au grand axe de la carotte. L'épaisseur de la fracture avec ses minéraux de remplissage varie de 2,7 à 3,15 mm environ. La surface a de la fracture est presque recouverte en totalité d'une épaisse couche de calcite et de quartz. La surface b de la fracture ne contient par contre qu'une très fine couche de ces minéraux. Seule une partie de cette surface, l'équivalent du quart de la surface, contient une épaisse couche de ces minéraux.

Échantillon 7 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 7 après l'essai montrent un important dépôt d'hydroxydes localisé surtout du côté de l'entrée de la fracture. On note aussi un lessivage de minéraux à certains endroits laissant apparaître les minéraux de la matrice rocheuse.



1 cm
1 cm

dépôt d'oxydes

Surface b



→ Sens de l'écoulement

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 7: Échantillon 7 soumis à l'essai à pH 2.

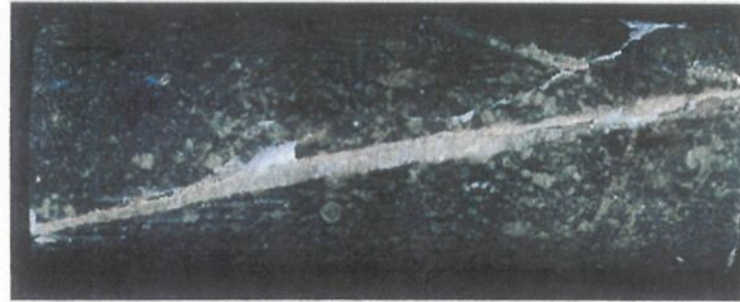
ÉCHANTILLON 8 (PHOTOS 8)

Échantillon 8 avant l'essai

La photo de l'échantillon 8 complet montre une fracture formant un angle avec le grand axe de la carotte. La fracture n'est pas droite et forme avec ses minéraux de remplissage une veine d'épaisseur variant de 1,9 à 3 mm environ. Les deux surfaces de la fracture sont recouvertes d'une couche de minéraux dont l'épaisseur varie en fonction de la localisation à l'intérieur de la fracture.

Échantillon 8 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 8 après l'essai montrent un important dépôt d'hydroxydes sur la presque totalité des deux surfaces. Ce dépôt devient moins dense dans la portion des deux surfaces de la fracture proche de la sortie. On note cependant la formation d'un chenal principal qui est moins large mais bien distinct et où les minéraux de la matrice sont mis en évidence.



Surface b



Sens de l'écoulement ←

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 8: Échantillon 8 soumis à l'essai à pH 2,5.

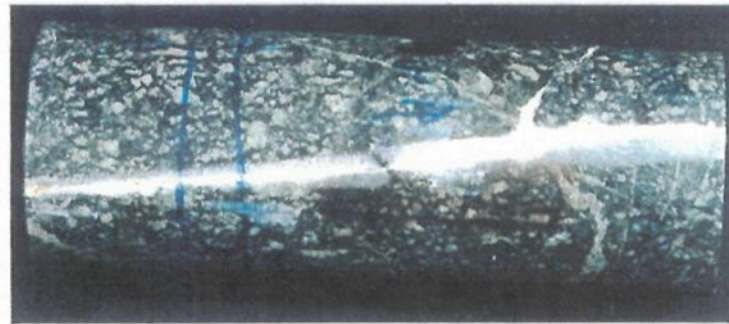
ÉCHANTILLON 9 (PHOTOS 9)

Échantillon 9 avant l'essai

L'échantillon 9 complet (photos 9) montre une fracture formant un angle avec le grand axe de la carotte. La fracture n'est pas droite et forme avec les minéraux de remplissage une veine dont l'épaisseur varie de 2,6 à 4,4 mm environ. Les deux surfaces de la fracture sont recouvertes d'une couche de minéraux dont l'épaisseur varie en fonction de la localisation à l'intérieur de la fracture.

Échantillon 9 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 9 après l'essai montrent la formation d'un chenal principal dont la trace n'est pas continue ou du moins n'est pas observable à la deuxième mi-longueur des deux surfaces de la fracture. Un dépôt d'hydroxydes très important est observé sur la presque totalité des deux surfaces de la fracture.



1 cm
1 cm

Surface b



dépôt d'oxydes

Surface a



Sens de l'écoulement ←

chenal

A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 9: Échantillon 9 soumis à l'essai à pH 2,5.

ÉCHANTILLON 10 (PHOTOS 10)

Échantillon 10 avant l'essai

La photo de l'échantillon 10 complet montre une fracture droite, plus au moins centrée et parallèle au grand axe de la carotte. L'épaisseur de la fracture avec ces minéraux de remplissage varie de 5 à 8 mm environ. Presque la totalité des deux surfaces de la fracture est recouverte d'une épaisse couche de calcite et de quartz. La fracture traverse la matrice rocheuse sur une portion de l'échantillon.

Échantillon 10 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 10 après l'essai montrent un dépôt d'hydroxydes généralisé sur presque la totalité de ces surfaces. On ne remarque pas de formation de chenaux bien distincts.



1 cm
1 cm

dépôt d'oxydes

Surface b



Sens de l'écoulement

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 10: Échantillon 10 soumis à l'essai à pH 2,5.

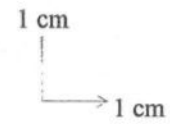
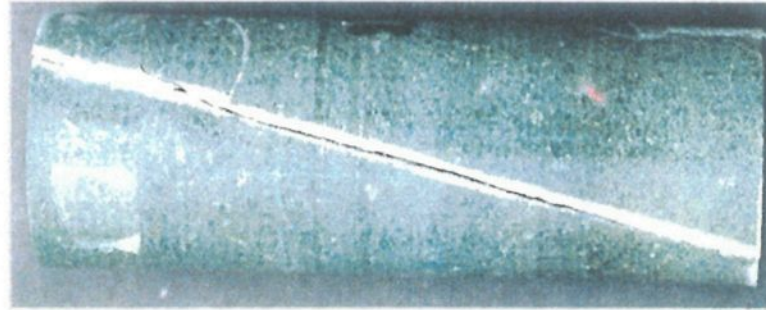
ÉCHANTILLON 11 (PHOTOS 11)

Échantillon 11 avant l'essai

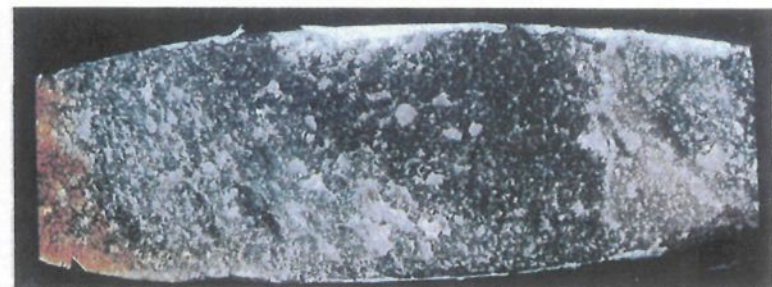
La photo de l'échantillon 11 complet montre une fracture plus au moins droite et formant un angle avec le grand axe de la carotte. L'épaisseur de la fracture avec ses minéraux de remplissage varie de 1,8 à 2,7 mm environ. Les photos des surfaces de la fracture montrent la face a avec une couche de minéraux plus épaisse et la face b avec une fine couche de minéraux sur presque toute sa surface.

Échantillon 11 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 11 après l'essai montrent un lessivage des minéraux presque généralisé et un léger dépôt d'hydroxydes surtout à l'entrée de la fracture. On ne remarque pas de formation de chenaux bien distincts.



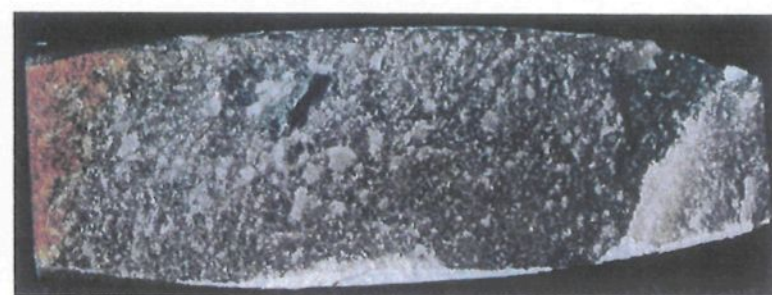
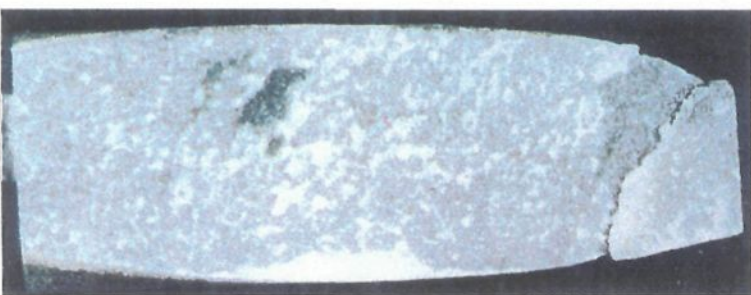
Surface b



dépôt d'oxydes

→ Sens de l'écoulement

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 11: Échantillon 11 soumis à l'essais à pH 4.

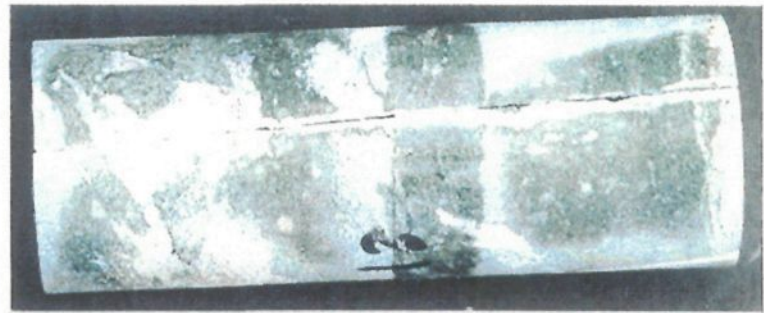
ÉCHANTILLON 12 (PHOTOS 12)

Échantillon 12 avant l'essai

La photo de l'échantillon 12 complet montre une fracture droite passant par le centre et formant un faible angle avec le grand axe de la carotte. Parfois la fracture recoupe la matrice rocheuse. L'épaisseur de la fracture avec ses minéraux de remplissage varie de 2,2 à 2,7 mm environ. Parmi les minéraux qui se trouvent dans la fracture, on note les minéraux sulfurés. Les surfaces de la fracture sont recouvertes d'une couche de minéraux d'épaisseur variable. À certains endroits, les minéraux de la matrice sont bien distingués.

Échantillon 12 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 12 après l'essai montrent la disparition de minéraux à plusieurs endroits laissant apparaître les minéraux de la matrice rocheuse. Un très léger dépôt d'hydroxydes est remarqué surtout à l'entrée de la fracture. On ne remarque pas de formation de chenaux distincts.



1 cm
1 cm

Surface b



dépôt d'oxydes

→ Sens de l'écoulement

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 12: Échantillon 12 soumis à l'essai à pH 4.

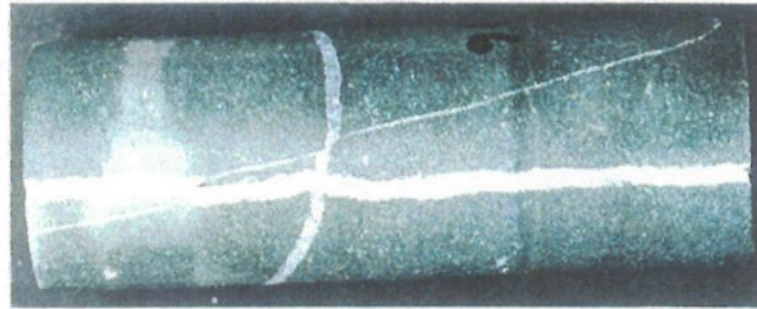
ÉCHANTILLON 13 (PHOTOS 13)

Échantillon 13 avant l'essai

La photo de l'échantillon 13 complet montre une fracture presque droite passant par le centre et parallèle au grand axe de la carotte. Parfois la fracture recoupe la carotte entre la matrice rocheuse et la veine. L'épaisseur moyenne de la fracture avec ses minéraux de remplissage est estimée à 3,6 mm. Les surfaces de la fracture sont recouvertes d'une couche de minéraux d'épaisseur variable surtout dans le cas de la face b où la matrice rocheuse apparaît à certains endroits.

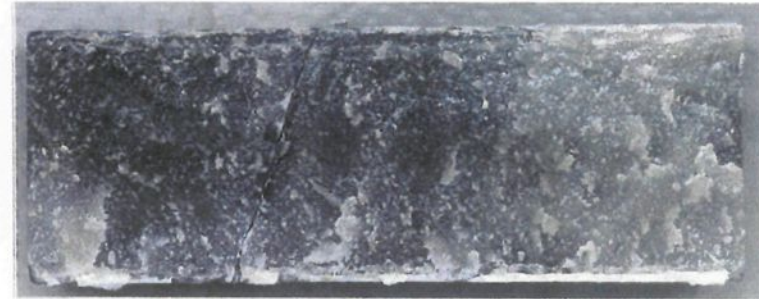
Échantillon 13 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 13 après l'essai ne montrent pas une grande différence entre les photos avant et après l'essai, sauf à quelques rares endroits où le lessivage des minéraux peut être observé. On ne note qu'une légère coloration brunâtre due à un très faible dépôt d'hydroxydes sur les surfaces de la fracture.



1 cm
1 cm

Surface b



Sens de l'écoulement ←

Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 13: Échantillon 13 soumis à l'essai à pH 7.

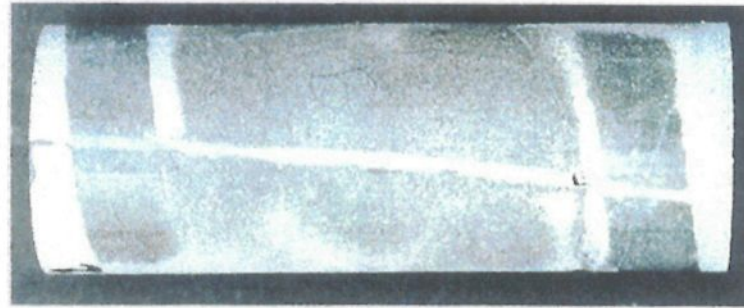
ÉCHANTILLON 14 (PHOTOS 14)

Échantillon 14 avant l'essai

La photo de l'échantillon 14 complet montre une fracture droite traversant la carotte vers le centre et sous un faible angle. Parfois la fracture passe entre la matrice rocheuse et la veine. L'épaisseur moyenne de la fracture avec ses minéraux de remplissage est estimée à 1,8 mm. Les surfaces de la fracture sont recouvertes d'une couche de minéraux d'épaisseur variable. La matrice rocheuse apparaît à plusieurs endroits surtout sur la face b de la fracture.

Échantillon 14 après l'essai

Les photos des surfaces de la fracture 14 après l'essai ne montrent pas une grande différence entre les photos avant et après l'essai, sauf dans le cas de la face b où le lessivage des minéraux de remplissage à certains endroits semble mettre en évidence les minéraux de la matrice rocheuse. On ne note aucun dépôt d'hydroxydes sur les surfaces de la fracture.

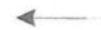


1 cm
1 cm

Surface b



Sens de l'écoulement ←



Surface a



A) Avant l'essai

B) Après l'essai

Photos 14: Échantillon 14 soumis à l'essai à pH 7.

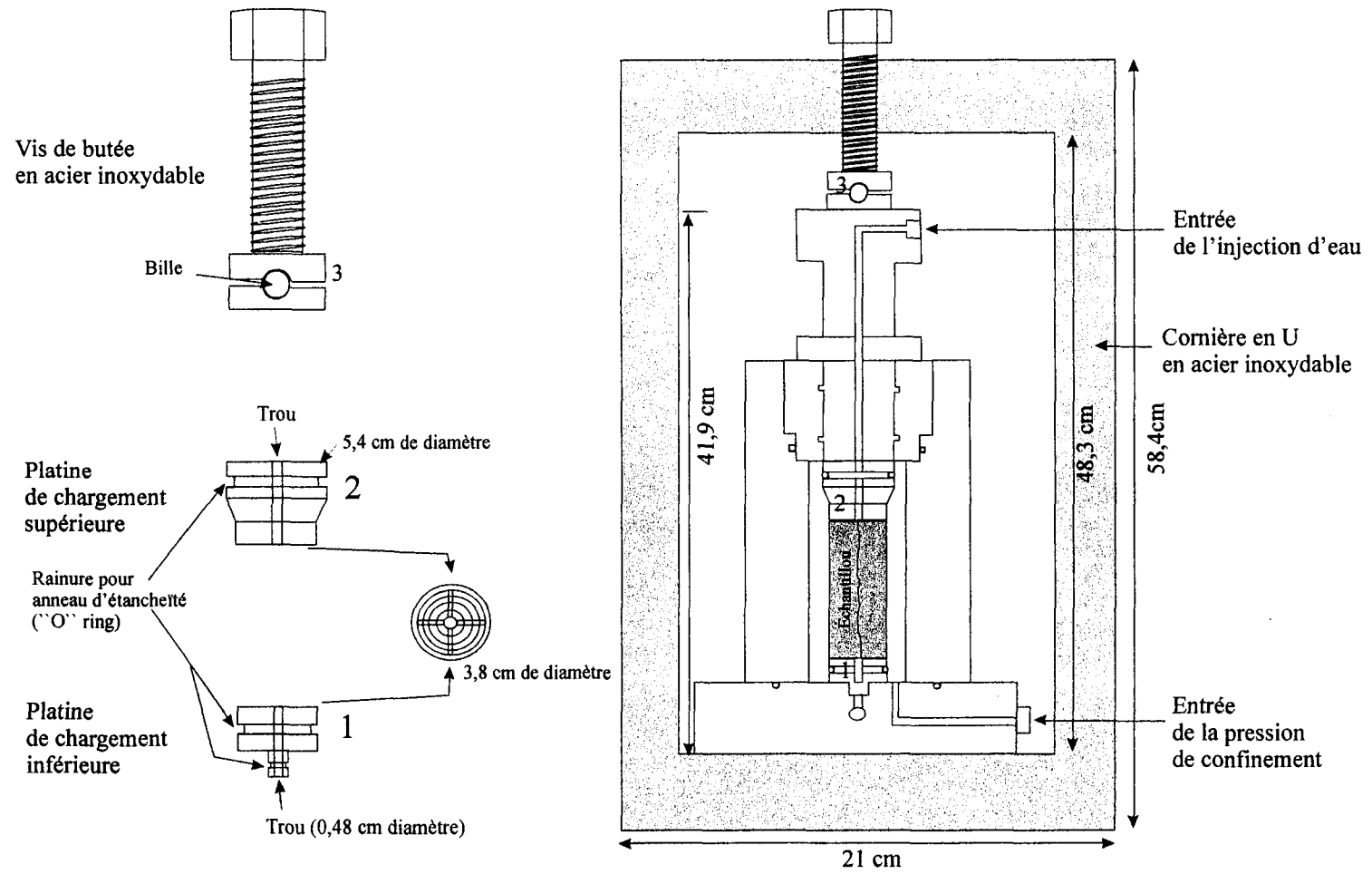
a)



b)

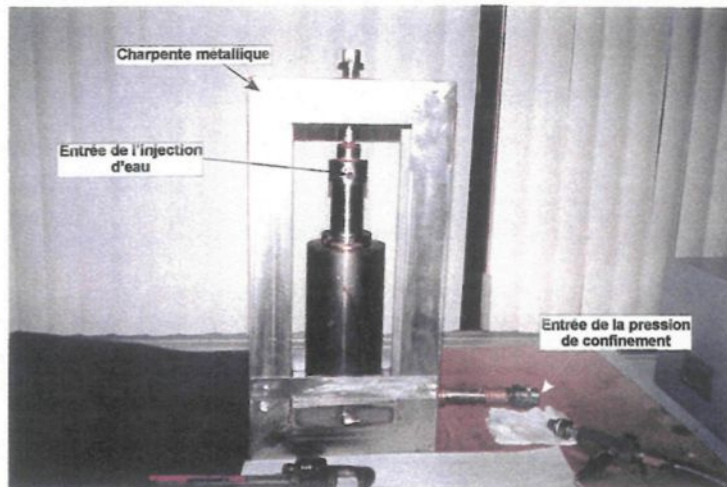


Annexe 6: Montage expérimental des essais sur les échantillons de fractures (a),
b) cellule tri-axiale dans le bac isolant.



Annexe 7: Schéma détaillé de la cellule tri-axiale avec la charpente métallique.

b)



a)



Annexe 8: Photos de la cellule tri-axiale avec la charpente métallique(a), et de la cellule tri-axiale ouverte (b).

ANNEXE 9 :**DESCRIPTION MICROSCOPIQUE DES ÉCHANTILLONS**

TABLE DES MATIÈRES

ÉCHANTILLON 1.....	428
ÉCHANTILLON 2.....	429
ÉCHANTILLON 3.....	431
ÉCHANTILLON 4.....	434
ÉCHANTILLON 5.....	435
ÉCHANTILLON 6.....	437
ÉCHANTILLON 7.....	440
ÉCHANTILLON 8.....	441
ÉCHANTILLON 9.....	443
ÉCHANTILLON 10.....	446
ÉCHANTILLON 11.....	447
ÉCHANTILLON 12.....	449
ÉCHANTILLON 13.....	452
ÉCHANTILLON 14.....	453

Cette annexe présente une description pétrographique de la matrice rocheuse et des matériaux de remplissage de veines observées en lames minces. Des lames minces ont été réalisées avant et après l'essai et selon deux orientations, l'une perpendiculairement (coupe transversale) et l'autre longitudinalement (coupe longitudinale) au grand axe de l'échantillon de carotte fracturé (annexe 5). Les deux orientations de lame mince permettent d'une part de vérifier l'hétérogénéité pétrographique de l'échantillon et de sa veine, et d'autre part de déterminer la localisation de la fracture par rapport à la veine. Lorsqu'ils sont présents, les minéraux solubles, tels que le gypse, risquent d'être éliminés durant la phase de préparation des lames minces étant donné leur grande affinité à se dissoudre même dans une très faible quantité d'eau. La description pétrographique des lames minces est effectuée sur les deux coupes, transversale et longitudinale. Dans la mesure du possible, des photographies de chacune de ces deux coupes sont montrées dans l'annexe.

Une analyse par diffraction de rayons X de la poudre des minéraux de remplissage des fractures a montré l'existence de deux principaux minéraux, la calcite et le quartz, en proportion variable d'un échantillon à l'autre, mais la calcite étant toujours en proportion plus grande. Cette méthode ne peut détecter les minéraux présents en faible quantité.

ÉCHANTILLON 1

Avant l'essai

L'observation de la lame mince en coupe transversale (photo 15) montre une matrice rocheuse riche en silice et renfermant des fragments de quartz et quelques grains de plagioclase. Il s'agit d'un tuf rhyolitique. La veine est d'une épaisseur d'environ 0,7 mm. Elle contient deux minéraux, le quartz et la calcite, avec une proportion de ce dernier plus importante (plus de 60%). La taille des cristaux de calcite varie entre 0,04 et 0,4 mm. Leur distribution dans la veine est aléatoire. Les cristaux de quartz sont, par contre, disposés le long des parois de la veine entre la matrice rocheuse et les cristaux de calcite. La taille des cristaux de quartz est plus petite que celle des cristaux de calcite et elle ne dépasse pas 0,1 mm. Quelques cristaux de quartz se trouvent à l'intérieur de la veine avec les cristaux de calcite.

Après l'essai

La lame mince en coupe transversale (photo 16) montre une matrice siliceuse formée de fragments de quartz, quelques fragments de plagioclase et de carbonates. Il s'agit d'un tuf rhyolitique. La veine a une forme régulière et une épaisseur qui varie de façon continue d'une extrémité à l'autre de la lame mince de 0,5 mm à 1 mm. Sur une paroi de la veine, on note la présence d'une fine couche formée d'agrégats de cristaux de quartz qui sont en contact avec une couche de cristaux de calcite de taille variée. Sur la

deuxième paroi de la veine, on observe un mélange sans structure bien définie de cristaux de quartz de plus grande taille avec des cristaux de calcite. En coupe transversale, la fracture a une allure ondulante; tantôt elle passe près d'une extrémité de la veine, tantôt elle passe vers le centre, en recoupant les cristaux de quartz et de calcite. La coupe longitudinale de lame mince montre les mêmes caractéristiques pétrographiques que la coupe transversale.

ÉCHANTILLON 2

Avant l'essai

La coupe transversale en lame mince (photo 17) montre une matrice siliceuse dans laquelle baignent plusieurs fragments de minéraux carbonatés (calcite) et très peu de quartz. Il s'agit d'une rhyolite. Parfois les granules de la matrice sont rubanées témoignant d'un faible degré de métamorphisme. La veine a une épaisseur variant de 2,6 à 3,8 mm. Elle contient des cristaux de calcite en abondance, d'environ 3,2 mm de longueur, allongés et ayant subi une déformation en cisaillement. Il y a aussi des petits cristaux de quartz de taille inférieure à 0,08 mm le long des deux murs de la veine entre les cristaux de calcite et la matrice rocheuse. Quelques cristaux de quartz de plus grande taille, de 0,5 mm, sont aussi présents au centre de la veine, entre les cristaux de calcite. En coupe longitudinale, la matrice rocheuse montre une réorientation et un allongement des grains témoignant d'un certain degré de métamorphisme. Le quartz et la calcite montrent les mêmes

caractéristiques que dans la coupe transversale. La veine a une forme anastomosée et a une épaisseur qui varie entre 2 et 4 mm.

Après l'essai

La lame mince en coupe transversale présente les mêmes caractéristiques pétrographiques de la matrice rocheuse qu'avant l'essai. Il s'agit d'une rhyolite. La veine a une épaisseur plus ou moins constante, entre 3,2 et 3,68 mm. Elle présente les mêmes caractéristiques minéralogiques qu'avant l'essai. La fracture coupe la veine au centre, en traversant les cristaux de calcite et de quartz et elle a une forme irrégulière.

En coupe longitudinale (photo 18), la matrice rocheuse possède les mêmes caractéristiques minéralogiques qu'avant l'essai avec des cristaux et des enclaves réorientés par le métamorphisme. La veine a une forme plus ou moins anastomosée et une épaisseur variant entre 2,32 et 4 mm. Elle a les mêmes caractéristiques pétrographiques que dans les coupes longitudinale et transversale avant l'essai. La fracture a une forme irrégulière et passe près du centre de la veine sur une grande partie de la lame, en recoupant les cristaux de calcite et de quartz.

ÉCHANTILLON 3

Avant l'essai

La lame mince en coupe transversale (photo 19) montre une matrice rocheuse riche en silice et contenant des fragments de quartz, très peu de plagioclase et des carbonates (calcite). Il s'agit d'un tuf rhyolitique. L'épaisseur de la veine varie de 0,5 à 0,8 mm. La veine est formée de cristaux de calcite de taille variée ne dépassant pas 0,9 mm. Les plus grands cristaux sont allongés parallèlement aux parois de la veine. Des cristaux de quartz de taille variée sont aussi présents mais en quantité moindre par rapport à ceux de calcite; la taille moyenne des ces cristaux est d'environ 0,2 mm. Ils sont disposés de façon aléatoire à l'intérieur de la veine. À plusieurs endroits, le contact entre les cristaux de calcite et la matrice est direct.

En coupe longitudinale, la matrice rocheuse a les mêmes caractéristiques pétrographiques qu'en coupe transversale mais avec une certaine orientation des cristaux. La veine contient une plus grande proportion de cristaux de quartz que de calcite (entre 60-80%). Elle a une épaisseur variant entre 0,24 et 0,56 mm.

Après l'essai

En coupe transversale, on observe les même caractéristiques pétrographiques qu'avant l'essai. Il s'agit d'un tuf rhyolitique. Dans cette coupe de lame mince, la veine a

une forme plus régulière et a une épaisseur plus ou moins constante entre 0,46 et 0,8 mm. Elle est formée de cristaux de quartz et de calcite de différentes tailles, souvent allongés le long de la veine. La fracture a une forme irrégulière et recoupe les cristaux de calcite et de quartz.

En coupe longitudinale (photo 20), la matrice rocheuse présente les mêmes caractéristiques pétrographiques qu'avant l'essai. La veine a une forme régulière et une épaisseur plus ou moins constante de 0,64 à 1 mm. Elle contient des cristaux de calcite et de quartz de taille variée et allongés le plus souvent le long de la veine. Les cristaux de calcite sont en plus grande proportion (60-80%). La fracture a une forme ondulante et recoupe les deux types de cristaux présents dans la veine.

A)

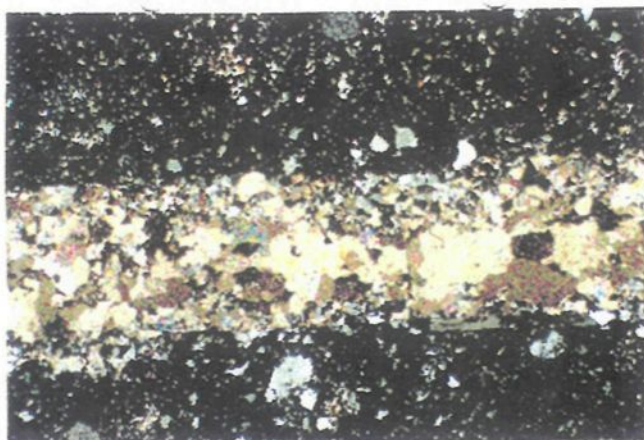


Photo 15 - Échantillon 1 : Coupe transversale en LP (1,75 mm x 2,6 mm).

B)

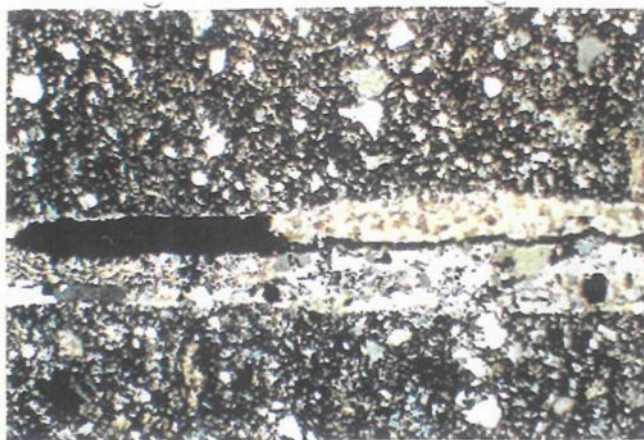


Photo 16 - Échantillon 1: Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

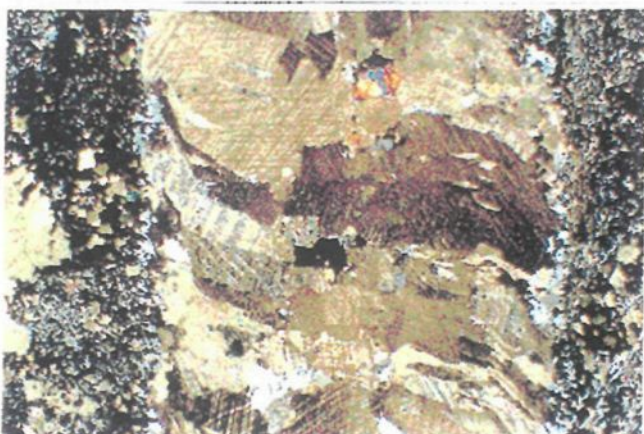


Photo 17 - Échantillon 2 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

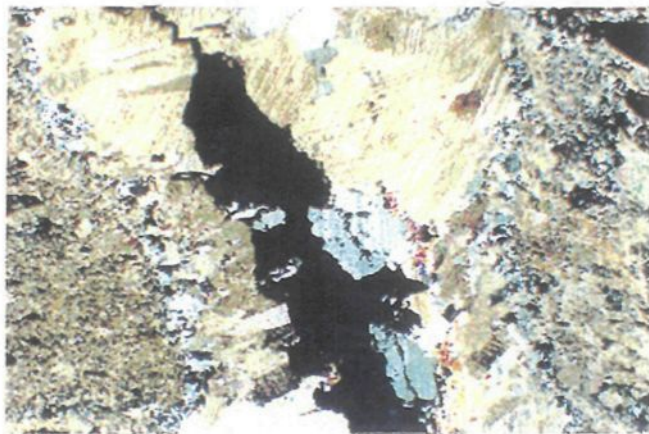


Photo 18 - Échantillon 2: Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

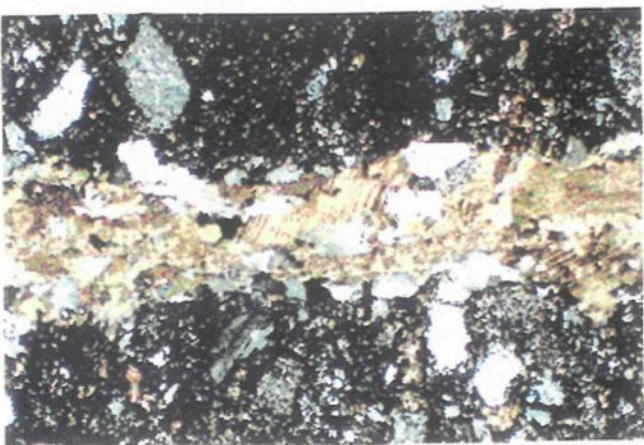


Photo 19 - Échantillon 3 : Coupe transversale en LP (1,75 mm x 2,6 mm).

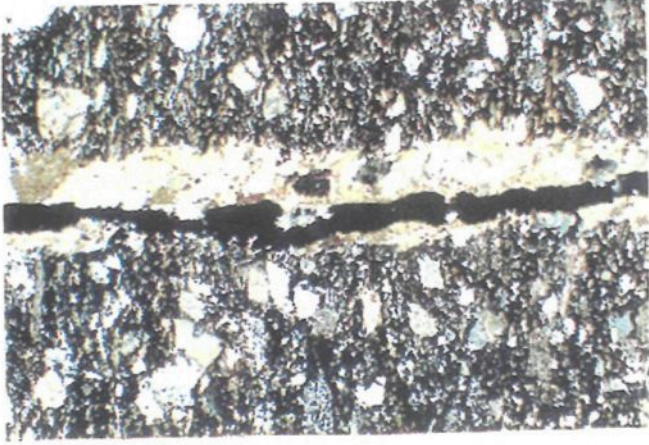


Photo 20 - Échantillon 3: Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

Quelques photos de lames minces des échantillons 1, 2 et 3 prises avant (A) et après (B) l'essai.

ÉCHANTILLON 4

Avant l'essai

En coupe transversale (photo 21), la matrice rocheuse est riche en silice contenant des fragments de cristaux de quartz, de carbonates et quelques grains de plagioclase. Il s'agit d'une rhyolite. La veine a une épaisseur plus ou moins constante entre 2 et 2,4 mm. Elle est composée principalement de cristaux de calcite de grande taille, d'environ 1,9 mm de longueur, et allongés sur presque toute l'épaisseur de la veine. Les cristaux de calcite montrent une faible déformation. Des cristaux de quartz de plus petite taille ne dépassant pas 0,12 mm sont surtout localisés le long des murs de la veine, entre la matrice rocheuse et les cristaux de calcite.

En coupe longitudinale, la pétrographie de la matrice rocheuse et de la veine est semblable à celle observée en coupe transversale. Les cristaux de calcite apparaissent, par contre, plus déformés. La matrice rocheuse montre un allongement des cristaux et des fragments (enclaves) de roches perpendiculaires à la veine et témoignant d'un certain degré de métamorphisme. La veine a une épaisseur plus ou moins constante de 1,8 à 2,2 mm.

Après l'essai :

En coupe transversale, la pétrographie est la même qu'avant l'essai. Les fragments de quartz, de plagioclases et de carbonates semblent suivre une même orientation. La veine contient aussi le même type de minéraux avec la même structure qu'avant l'essai. La veine a une forme plus ou moins constante et peu ondulée. Elle a une épaisseur de l'ordre de 2 à 2,6 mm. La fracture a une forme peu régulière et passe à côté de la paroi de la veine, le long de celle-ci, entre la limite des cristaux de calcite et des cristaux de quartz. Elle recoupe les deux types de minéraux.

En coupe longitudinale (photo 22), les caractéristiques pétrographiques de la matrice rocheuse sont semblables à celles observées avant l'essai. La veine contient les mêmes types de minéraux qu'avant l'essai. Elle a une forme peu ondulée et a une épaisseur variant entre 2,2 et 2,76 mm. La fracture a une forme irrégulière et recoupe la veine au centre sur une grande proportion de la lame mince.

ÉCHANTILLON 5***Avant l'essai***

En coupe transversale (photo 23), la matrice rocheuse est formée de ciment de poussière siliceuse englobant des débris de cristaux de quartz, d'oxydes et plusieurs fragments de carbonates. Il s'agit d'un tuf rhyolitique. La veine a une forme ondulante et

une épaisseur variable de 1,6 à 2,6 mm. Elle est formée principalement de cristaux de calcite de plus grande taille, d'environ 1,3 mm; ces cristaux sont peu déformés et allongés sur presque toute l'épaisseur de la veine. Des cristaux de quartz de plus petite taille, ne dépassant pas les 0,12 mm, séparent les cristaux de calcite de la matrice rocheuse. La coupe longitudinale n'est pas disponible à cause du manque d'échantillon suffisamment grand pour la préparation de lame mince.

Après l'essai

En coupe transversale, la pétrographie de la matrice rocheuse est semblable à celle observée avant l'essai. Il s'agit donc d'un tuf rhyolitique. La veine a une forme ondulante et une épaisseur variant entre 1,8 et 3,2 mm. La fracture passe tout près d'un côté de la veine à la limite des cristaux de quartz et de calcite en recoupant, le plus souvent les cristaux de calcite. La fracture a une forme peu régulière.

En coupe longitudinale (photo 24), la matrice rocheuse présente les mêmes caractéristiques qu'en coupe transversale. La veine présente aussi la même minéralogie que celle observée en coupe transversale avec une déformation plus importante des cristaux de calcite. Elle a une forme très irrégulière et une épaisseur variant entre 2,6 et 3,6 mm. La fracture a une forme irrégulière et passe le long d'un côté de la veine, à la limite entre les cristaux de calcite et ceux de quartz. Elle recoupe aussi bien les cristaux de quartz que ceux de calcite.

ÉCHANTILLON 6

Avant l'essai

En coupe transversale (photo 25), la matrice rocheuse est riche en silice avec peu de cristaux de quartz et de carbonates. Il s'agit d'une roche rhyolitique. L'épaisseur de la veine est comprise entre 2,2 et 2,8 mm. La veine a une forme plus ou moins ondulante. Elle est formée de cristaux de calcite allongés le long de son épaisseur. La longueur moyenne des ces cristaux est d'environ 2 mm. Ces cristaux apparaissent un peu cisailés. Entre la matrice rocheuse et les cristaux de calcite, il y a un groupement de petits cristaux de quartz dont la taille ne dépasse pas 0,12 mm. La coupe longitudinale en lame mince fait défaut.

Après l'essai

Il s'agit de la même minéralogie de la matrice rocheuse que celle observée avant l'essai. La veine a une épaisseur variable allant de 1,6 à 2,4 mm. Elle contient les mêmes types de minéraux avec la même structure que dans le cas de la lame mince en coupe transversale avant l'essai. La fracture passe proche du centre de la veine et s'approche d'un côté de celle-ci à la limite des cristaux de calcite et de quartz pour terminer dans la matrice sur une petite portion de la lame mince. La fracture a une forme irrégulière.

En coupe longitudinale (photo 26), les caractéristiques minéralogiques sont similaires à celles observées en coupe transversale. La veine a une forme anastomosée et une épaisseur variant entre 1,76 et 3,2 mm. Elle est formée de cristaux de quartz et de calcite ayant le même arrangement observé en coupe transversale. Les cristaux de calcite montrent, par contre, un peu de déformation. La fracture a une forme irrégulière et passe sur une grande partie de la lame mince au centre de la veine en recoupant les cristaux de calcite.

A)



Photo 21 - Échantillon 4 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

B)



Photo 22 - Échantillon 4: Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

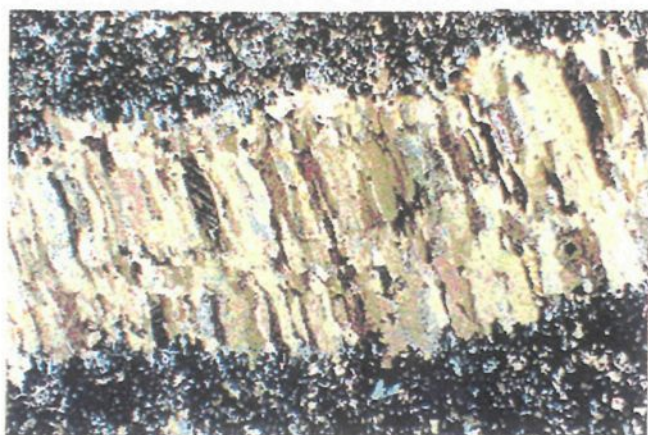


Photo 23 - Échantillon 5 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

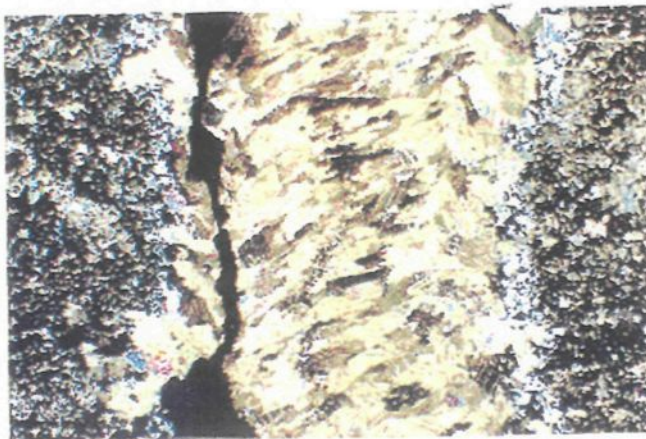


Photo 24 - Échantillon 5: Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).



Photo 25 - Échantillon 6 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).



Photo 26 - Échantillon 6: Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

Quelques photos de lames minces des échantillons 4, 5 et 6 prises avant (A) et après (B) l'essai (suite).

ÉCHANTILLON 7

Avant l'essai

En coupe transversale (photo 27), la matrice rocheuse est constituée de silice dans laquelle baignent de rares cristaux de plagioclase et de quartz. Il s'agit d'une roche rhyolitique. La veine a une épaisseur de 2 à 2,6 mm et une forme peu ondulée. La calcite est le principal minéral de la veine (plus de 80% des minéraux de la veine). Elle est de plus grande taille, environ 1,7 mm, allongée et peu cisailée. Des cristaux de quartz de plus petite taille, ne dépassant pas 0,18 mm, séparent la matrice rocheuse des cristaux de calcite.

En coupe longitudinale, la pétrographie de la matrice rocheuse et de la veine est semblable à celle observée en coupe transversale. Les cristaux de calcite apparaissent par contre plus déformés. La veine a une forme plus ou moins régulière et une épaisseur qui varie entre 2,2 et 2,8 mm.

Après l'essai

En coupe transversale, la minéralogie de la matrice rocheuse ne change pas beaucoup de celle observée avant l'essai. La veine présente aussi les mêmes types de minéraux et structures qu'avant l'essai. Elle a une forme régulière et une épaisseur qui varie entre 2 et 2,84 mm. La fracture a une forme peu régulière et recoupe la veine d'un côté le long de la limite entre les cristaux de calcite et ceux de quartz.

En coupe longitudinale (photo 28), il s'agit de la même minéralogie de la matrice rocheuse qu'avant l'essai. La veine contient aussi les mêmes types de minéraux et le même style d'arrangement que ceux observés avant l'essai. Elle a une forme régulière et une épaisseur plus ou moins constante entre 2,48 et 2,72 mm. La fracture a une forme peu régulière et recoupe la veine le long d'un de ses côtés, à la limite entre les cristaux de calcite et ceux de quartz.

ÉCHANTILLON 8

Avant l'essai

En coupe transversale, la matrice rocheuse est formée d'un ciment de poussière siliceuse et carbonatitique englobant de gros fragments de carbonates, de feldspaths silicifiés et quelques cristaux de quartz. Il s'agit d'une rhyolite. La veine a une épaisseur qui varie entre 0,8 et 1,6 mm. Elle est formée principalement de cristaux de calcite allongés le long de son épaisseur et de taille moyenne d'environ 2,1 mm. Les cristaux de calcite sont peu déformés. Une mince couche d'agrégat de cristaux de quartz de petite taille, ne dépassant pas 0,1 mm, sépare la matrice rocheuse des cristaux de calcite sur les deux côtés de la veine.

En coupe longitudinale de lame mince (photo 29), la matrice rocheuse présente les mêmes caractéristiques minéralogiques observées en coupe transversale. La veine est, par contre, un peu plus épaisse de l'ordre de 2,8 à 3 mm.

Après l'essai

En coupe transversale de lame mince (photo 30), la matrice rocheuse comprend la même minéralogie que celle observée en coupe transversale de lame mince avant l'essai. La veine renferme les mêmes types de minéraux avec le même arrangement que ceux dans la veine en coupe transversale avant l'essai. Elle a une forme plus ou moins régulière, parfois anastomosée, et une épaisseur variant entre 1,8 et 2,56 mm. La fracture passe au centre de la veine en recoupant surtout les cristaux de calcite et elle a une forme irrégulière.

En coupe longitudinale de lame mince, la matrice rocheuse a les mêmes caractéristiques minéralogiques observées en coupe longitudinale de lame mince avant l'essai. La veine a une forme plus au moins régulière et une épaisseur variant entre 2,6 et 3,52 mm. La fracture passe au centre de la veine sur une grande partie de la lame mince en recoupant les cristaux de calcite.

ÉCHANTILLON 9

Avant l'essai

En coupe transversale, la matrice rocheuse est siliceuse englobant quelques cristaux de quartz et de plagioclase. Les minéraux présentent un certain degré de métamorphisme. Il s'agit d'une roche rhyolitique. La veine a une épaisseur variable de 3,4 à 3,8 mm. Elle est formée de cristaux de calcite allongés et de longueur moyenne d'environ 2,6 mm. Elle contient aussi une fine couche d'agrégats de cristaux de quartz, de taille ne dépassant pas 0,1 mm, et séparant, sur ses deux côtés, la matrice rocheuse de la calcite. Les cristaux de calcite montrent une déformation en cisaillement.

En coupe longitudinale (photo 31), la matrice rocheuse est riche en silice avec beaucoup de minéraux de feldspaths altérés. L'épaisseur de la veine varie et est de l'ordre de 3 mm. La veine présente les mêmes caractéristiques minéralogiques observées dans la veine en coupe transversale.

Après l'essai

En coupe transversale (photo 32), la matrice rocheuse possède les mêmes caractéristiques minéralogiques qu'avant l'essai. La veine contient aussi les mêmes types de minéraux avec le même arrangement qu'avant l'essai mais avec une taille des cristaux un peu plus grande. Elle a une forme ondulée et une épaisseur plus ou moins constante de

l'ordre de 4,12 à 4,6 mm. La fracture a une forme irrégulière et recoupe la veine au centre, sauf à une extrémité de la lame où elle traverse une partie de la matrice rocheuse. Elle recoupe les deux types de minéraux dans la veine.

En coupe longitudinale, la matrice rocheuse a les mêmes caractéristiques minéralogiques que celles de la matrice rocheuse dans les autres coupes de lame mince du même échantillon. La veine renferme aussi les mêmes types de minéraux avec le même arrangement qu'avant l'essai mais avec une taille de cristaux plus grande. Elle a une forme régulière et une épaisseur plus ou moins constante de l'ordre de 5 à 5,6 mm. La fracture a une forme ondulée. Elle traverse la veine à une extrémité de la lame mince par son centre et s'approche de sa périphérie à la limite entre les cristaux de calcite et ceux de quartz pour terminer dans la matrice à l'autre extrémité de la lame mince.

A)

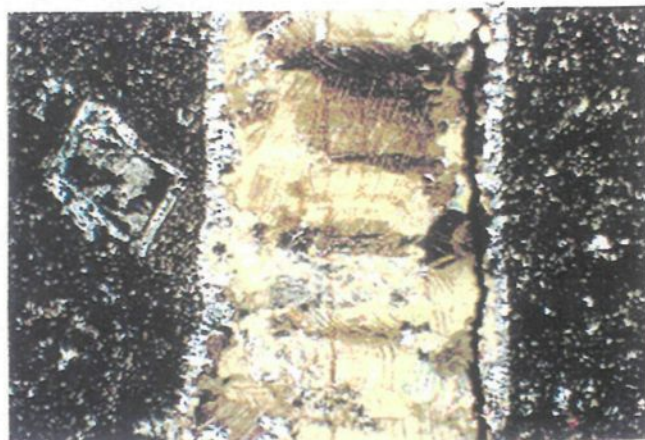


Photo 27 - Échantillon 7 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

B)



Photo 28 - Échantillon 7: Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

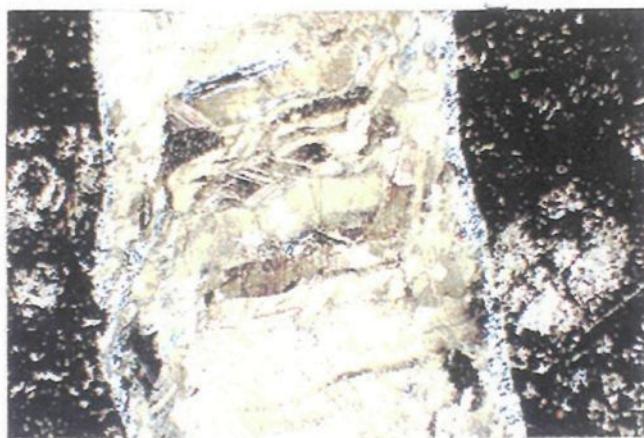


Photo 29 - Échantillon 8 : Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

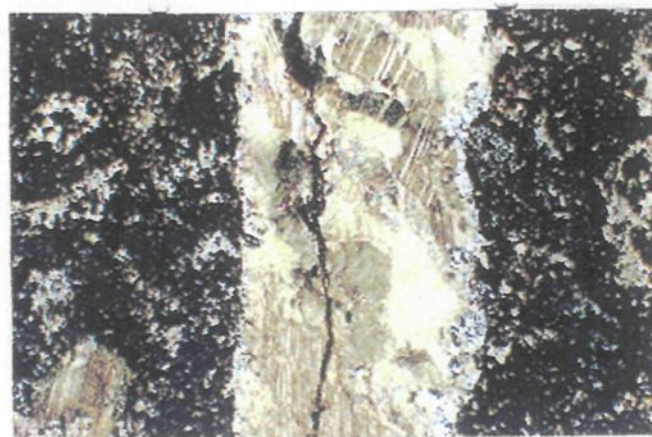


Photo 30 - Échantillon 8: Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).



Photo 31 - Échantillon 9 : Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).



Photo 32 - Échantillon 9: Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

Quelques photos de lames minces des échantillons 7, 8 et 9 prises avant (A) et après (B) l'essai (suite).

ÉCHANTILLON 10

Avant l'essai

En coupe transversale (photo 33), la matrice rocheuse est constituée d'une mésostase siliceuse englobant quelques phénocristaux de quartz et plusieurs phénocristaux de carbonates. Il s'agit d'une roche rhyolitique. La veine a une grande épaisseur d'environ 12,8 mm. Elle est formée de plusieurs générations de cristaux de calcite et de cristaux de quartz. D'un côté à l'autre de la veine, on trouve un agrégat de cristaux de quartz de plus petite taille, ne dépassant pas 0,2 mm, un agrégat de cristaux de calcite de plus grande taille, de longueur moyenne d'environ 1,4 mm, allongés et peu déformés; un deuxième agrégat de cristaux de quartz de taille variée, entre 0,1 et 0,9 mm, mélangés avec des carbonates ferrifères, une deuxième couche de cristaux de calcite de taille un peu plus grande que celle du quartz; un troisième agrégat de cristaux de quartz de plus grande taille, atteignant 2,5 mm de longueur, un troisième agrégat de cristaux de calcite de grande taille, de longueur moyenne d'environ 3 mm; et un quatrième et dernier agrégat de cristaux de quartz de plus petite taille, ne dépassant pas 0,2 mm.

En coupe longitudinale, la matrice rocheuse montre la même minéralogie qu'en coupe transversale mais avec un allongement des minéraux et des enclaves témoignant d'un certain degré de métamorphisme.

Après l'essai

En coupe transversale (photo 34), il s'agit du même type de roche (même minéralogie) qu'avant l'essai mais avec un degré de cisaillement plus marqué. La veine contient les mêmes types et le même arrangement de minéraux qu'avant l'essai. Elle a une forme peu régulière et une épaisseur variant entre 6,4 et 8 mm. La fracture a une allure irrégulière et traverse la veine vers son centre en recoupant les cristaux de calcite dans la majorité des cas.

En coupe longitudinale de lame mince, il s'agit des mêmes observations minéralogiques qu'avant l'essai mais avec une évidence plus marquée du cisaillement. La veine contient les mêmes types et le même arrangement des minéraux que précédemment. Elle a une forme irrégulière et une épaisseur qui varie entre 8 et 10,4 mm. La fracture traverse la veine vers son centre d'une façon très irrégulière et recoupe essentiellement les cristaux de calcite.

ÉCHANTILLON 11

Avant l'essai

En coupe transversale (photo 35), la matrice rocheuse est une mésostase siliceuse avec plus de fragments de quartz que de carbonate (calcite). Il s'agit d'un tuf rhyolitique. La veine a une forme ondulée et une épaisseur qui varie entre 1,6 et 1,8 mm. Elle est

composée principalement de cristaux de calcite de plus grande taille, d'environ 2,1 mm de longueur moyenne, et allongés perpendiculairement à la direction de la veine. Ces cristaux de calcite montrent une faible déformation en cisaillement. Des cristaux de quartz de taille variée, ne dépassant pas 0,2 mm, sont aussi présents et séparent les cristaux de calcite de la matrice rocheuse. En coupe longitudinale, il s'agit des mêmes caractéristiques minéralogiques qu'en coupe transversale.

Après l'essai

En coupe transversale (photo 36), la matrice rocheuse a les mêmes caractéristiques minéralogiques qu'avant l'essai mais avec la présence de fragments de plagioclase. La veine a une épaisseur un peu plus grande entre 2,6 et 2,8 mm. Elle a les mêmes types de minéraux avec le même arrangement qu'avant l'essai mais avec une taille des cristaux un peu plus grande. La fracture a une forme ondulée et passe tout près d'un côté de la veine entre la limite des cristaux de quartz et ceux de calcite mais en recoupant surtout les cristaux de calcite.

En coupe longitudinale, la matrice rocheuse présente les mêmes caractéristiques minéralogiques qu'avant l'essai mais avec plus de matière carbonatée. La veine présente aussi les mêmes types et arrangement de minéraux qu'avant l'essai. Elle a une épaisseur qui varie entre 2,4 et 2,8 mm. La fracture a une forme ondulée et traverse la veine le long

d'un de ses côtés, à la limite des cristaux de quartz et ceux de calcite, pour terminer dans la matrice rocheuse sur une petite portion de la lame mince.

ÉCHANTILLON 12

Avant l'essai

En coupe transversale (photo 37), la matrice rocheuse forme une mésostase siliceuse contenant des fragments de quartz et de plagioclase silicifié. Il s'agit d'un tuf rhyolitique. La veine est composée de cristaux de quartz de taille plus grande, entre 0,1 et 2,5 mm, et de forme variée. Ces cristaux semblent remplacer les cristaux de calcite initialement allongés perpendiculairement à la direction de la fracture. Parmi ces cristaux de quartz, quelques-uns montrent toujours l'ancien clivage des cristaux de calcite. À certains endroits de la veine, il y a présence de cristaux de calcite allongés, de taille moyenne d'environ 0,7 mm. Lorsque des cristaux de quartz sont présents entre la matrice rocheuse et les cristaux de calcite, ils montrent une croissance de la périphérie vers le centre.

En coupe longitudinale, la matrice rocheuse présente le mêmes types de minéraux observés en coupe transversale mais avec un certain degré de métamorphisme (sérécitisation). L'aspect de la mésostase siliceuse est toujours présent. La veine a une forme anastomosée et une épaisseur qui varie de 1,6 à 3,2 mm. Elle présente les mêmes types et arrangement des minéraux que ceux observés en coupe transversale. Les cristaux de calcite apparaissent, par contre, plus déformés. Quelques cristaux de quartz sont situés

au centre de la veine et peuvent suggérer un développement du centre vers la périphérie de celle-ci.

Après l'essai

En coupe transversale (photo 38), la matrice rocheuse a les mêmes caractéristiques minéralogiques qu'avant l'essai mais avec plus de fragments de plagioclase. La veine a les mêmes types et le même arrangement de minéraux qu'avant l'essai. Elle a une épaisseur qui varie entre 1,8 et 3,5 mm. La fracture a une forme ondulée et traverse la veine vers son centre en recoupant les deux types de cristaux, la calcite et le quartz. Elle devient moins rugueuse un peu vers le milieu de la lame mince où elle recoupe la limite entre les cristaux de calcite et ceux du quartz.

En coupe longitudinale, il y a à peu près les mêmes caractéristiques minéralogiques observées avant l'essai mais avec un aspect de sérécitisation de la matrice rocheuse. La veine présente aussi les mêmes caractéristiques que celles observées dans les autres coupes de lame mince. Elle a une forme anastomosée et une épaisseur qui varie entre 1,8 et 2,6 mm. La fracture a une forme ondulée et passe vers le centre de la veine en recoupant les deux types de minéraux.

A)

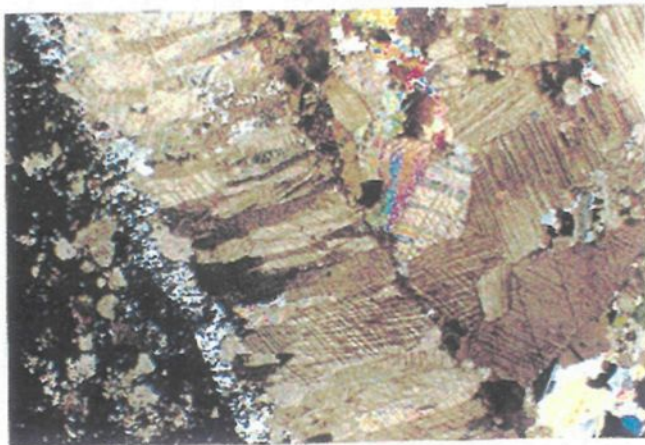


Photo 33 - Échantillon 10 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

B)

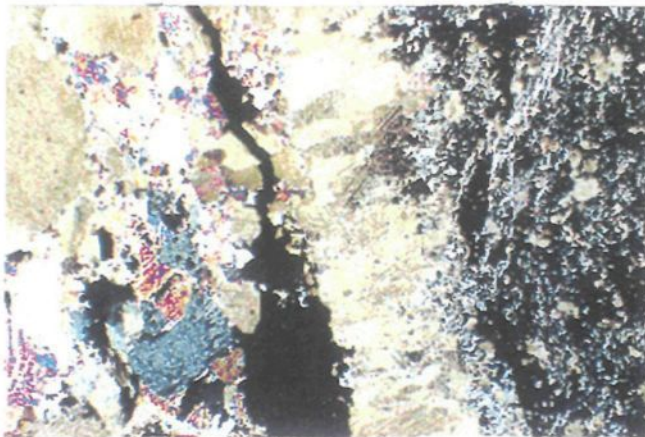


Photo 34 - Échantillon 10: Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

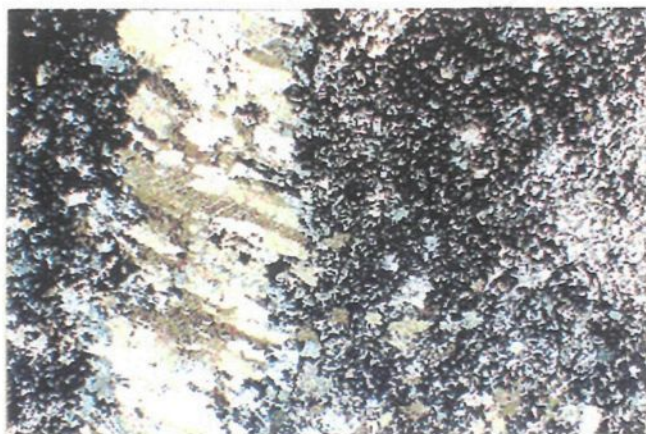


Photo 35 - Échantillon 11 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

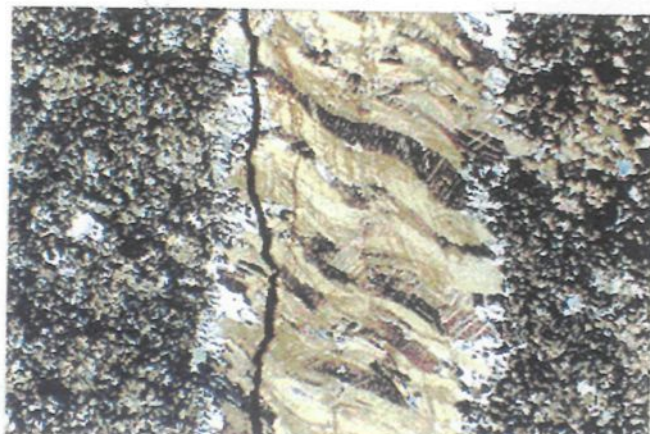


Photo 36 - Échantillon 11: Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

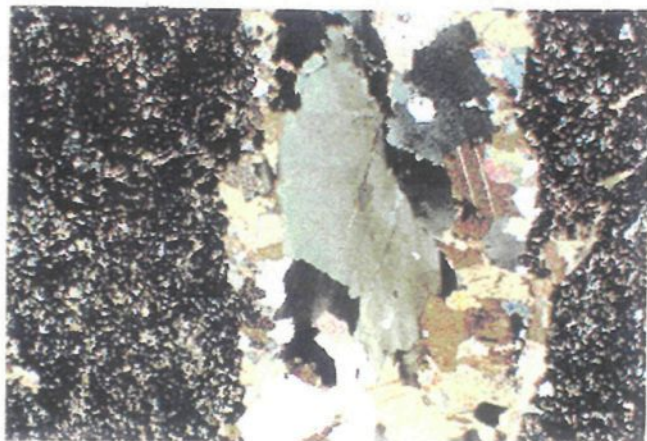


Photo 37 - Échantillon 12 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

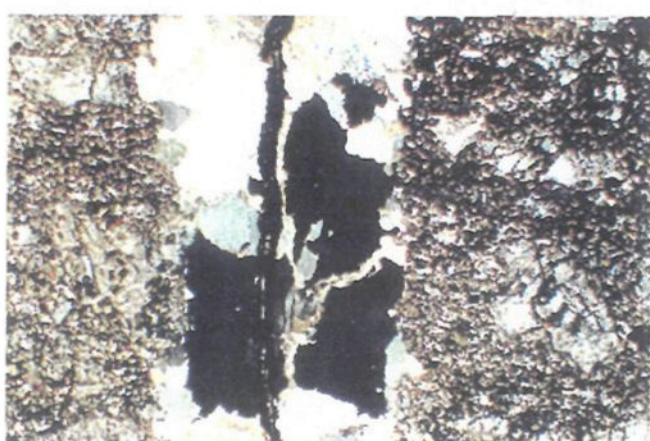


Photo 38 - Échantillon 12 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

Quelques photos de lames minces des échantillons 10, 11 et 12 prises avant (A) et après (B) l'essai (suite).

ÉCHANTILLON 13

Avant l'essai

Il s'agit d'un duplicata de l'échantillon 5 (photo 39). Voir détails pétrographiques de celui-ci avant l'essai.

Après l'essai

En coupe transversale, la matrice rocheuse est une mésostase riche en silice contenant des fragments de carbonates et de quartz de petite taille. Elle contient aussi des oxydes. Il s'agit d'un tuf rhyolitique. La veine a une forme plus ou moins ondulée et une épaisseur variant entre 3 et 3,8 mm. Elle contient les mêmes types et le même arrangement des minéraux que ceux observés en coupe transversale de lame mince pour l'échantillon 5 avec la calcite au milieu de la veine et les cristaux de quartz à sa périphérie. La taille des cristaux de quartz ne dépasse pas 0,2 mm tandis que celle des cristaux de calcite est d'environ 3,2 mm. Les cristaux allongés de calcite perpendiculaire à la direction de la veine ne montrent pas de déformation.

En coupe longitudinale (photo 40), la pétrographie de la matrice rocheuse est la même que celle en coupe transversale après l'essai. La veine a une forme peu ondulée et son épaisseur varie entre 2,68 et 3,8 mm. Les deux types de minéraux sont présents avec le même arrangement dans la veine. Les cristaux de calcite montrent bien une déformation en

cisaillement. La fracture est moins rugueuse sur la moitié de la lame mince et elle passe près de la limite des cristaux de calcite et ceux de quartz en recoupant les deux types de minéraux. Sur la deuxième moitié de la lame mince, la fracture a une forme ondulée et passe plus ou moins au centre de la veine en recoupant les cristaux de calcite.

ÉCHANTILLON 14

Avant l'essai

En coupe transversale (photo 41), la matrice rocheuse est une mésostase siliceuse englobant des fragments de quartz, quelques fragments de plagioclase et des carbonates. Il s'agit d'un tuf rhyolitique. La coupe transversale ne contient qu'une partie de la veine. Pour la description de celle-ci, on fera référence à la coupe transversale et à la coupe longitudinale des lames mince de l'échantillon après l'essai. La coupe longitudinale fait défaut dans ce cas.

Après l'essai

En coupe transversale, la pétrographie de la matrice rocheuse est la même que celle observée avant l'essai. La veine a une forme régulière et une épaisseur plus ou moins constante de 1,76 à 2,08 mm. D'un côté à l'autre de la veine, il y a une fine couche d'agrégats de cristaux de quartz dont la taille ne dépasse pas 0,4 mm, et une couche plus épaisse d'agrégats de cristaux de calcite de plus petite taille, ne dépassant pas 0,5 mm de

longueur, et ne présentant pas la forme allongée observée dans les autres échantillons. Ces deux agrégats de cristaux occupent à peu près le tiers de l'épaisseur de la veine. Sur les autres deux tiers, il y a un mélange de cristaux de quartz et de calcite de taille variée. La fracture a une forme plus ou moins régulière. Elle traverse la veine sur un côté de celle-ci en passant entre la limite des cristaux de calcite et ceux de quartz sur à peu près la moitié de la lame mince.

En coupe longitudinale (photo 42), la matrice rocheuse est une mésostase siliceuse englobant des fragments de quartz, quelques fragments de plagioclase et des carbonates. Il s'agit toujours d'un tuf rhyolitique. La veine a une forme régulière et une épaisseur qui varie entre 1,6 et 2,48 mm. Elle est composée de cristaux de quartz et de cristaux de calcite de taille variée avec une proportion plus importante de ces derniers. Les deux types de cristaux ne semblent pas suivre une structure bien définie à l'intérieur de la veine (disposition aléatoire). La fracture a une forme régulière et passe tantôt tout près d'un côté de la veine, tantôt par le centre en recoupant les cristaux de calcite et ceux de quartz.

A)

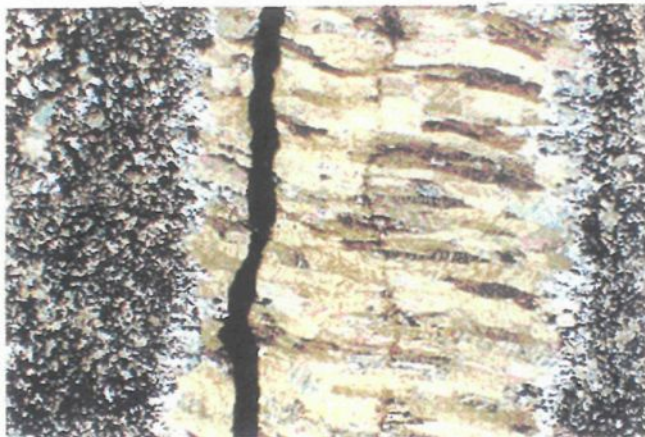


Photo 39 - Échantillon 13 : Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

B)

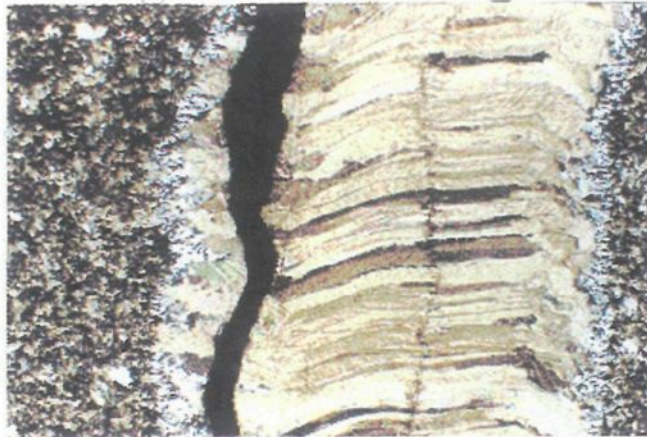


Photo 40 - Échantillon 13: Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

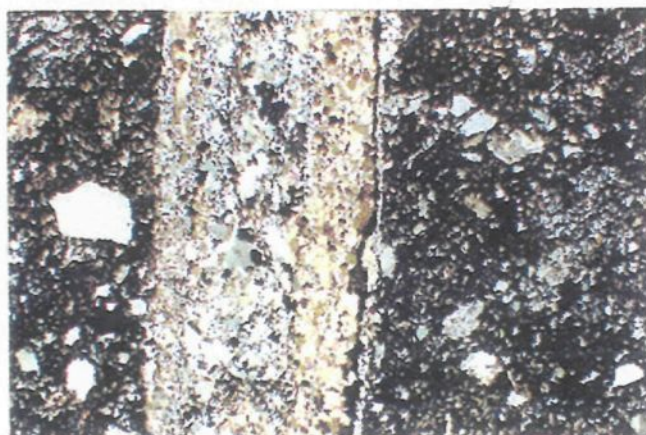


Photo 41 - Échantillon 14: Coupe transversale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).



Photo 42 - Échantillon 14: Coupe longitudinale en LP (4,6 mm x 6,3 mm).

Quelques photos de lames minces des échantillons 13 et 14 prises avant (A) et après (B) l'essai (suite).

a)



b)



Annexe 10 : Dépôt d'oxydes sur la Barricade (a) et sur le mur de la galerie (b)
au niveau 6A de la mine Bouchard-Hébert.