



HAL
open science

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'IMPACT DES ANCIENS TRAVAUX MINIERES DE CHARBON SUR LES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION A LA REGION D'ALES (GARD)

Stéphanie Gairoard

► **To cite this version:**

Stéphanie Gairoard. CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'IMPACT DES ANCIENS TRAVAUX MINIERES DE CHARBON SUR LES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION A LA REGION D'ALES (GARD). Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL, 2009. Français. NNT: . tel-00410955

HAL Id: tel-00410955

<https://theses.hal.science/tel-00410955>

Submitted on 25 Aug 2009

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE
Présentée à
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Laboratoire Environnement, Géomécanique et Ouvrages

Ecole doctorale RP2E

Thèse préparée à l'Ecole des Mines d'Alès pour l'obtention du titre de
DOCTEUR en Génie Civil – Hydrosystèmes - Géotechnique

par

Stéphanie GAIROARD

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'IMPACT DES
ANCIENS TRAVAUX MINIERES DE CHARBON SUR
LES EAUX SOUTERRAINES : APPLICATION A LA
REGION D'ALES (Gard)**

Soutenue publiquement le 06 juillet 2009 devant le **jury** composé de :

Jean-Pierre FAILLAT (Rapporteur)

Jacques MUDRY (Rapporteur)

Anne-Lise COURBIS (Examineur)

Antoine DOMINGUEZ (Examineur)

Bernard VAYSSADE (Examineur)

Véronique MERRIEN-SOUKATCHOFF (Directeur de thèse)

Avant-propos

Je tiens tout d'abord à remercier Véronique Merrien-Soukatchoff pour la direction de cette thèse, ses nombreuses remarques qui ont permis de faire avancer ce travail et son accueil toujours chaleureux à Nancy.

J'exprime ma gratitude à Jean-Pierre Faillat d'avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse et d'en avoir présidé le jury. Je lui adresse aussi mes remerciements pour m'avoir fait partager son expérience dans les analyses de données, toujours de bon conseil et qui a pris le temps de nombreuses discussions sur le sujet.

Je remercie aussi Jacques Mudry pour avoir été rapporteur de la thèse et pour ses remarques éclairées.

J'ai eu plaisir à échanger avec Antoine Dominguez, expert en géothermie et membre du jury de thèse. Un grand merci aussi pour les discussions que nous avons eues sur le sujet.

Je remercie Bernard Vayssade pour son encadrement, sa grande disponibilité et ses nombreux conseils sur l'ensemble de cette thèse.

Je tiens aussi à remercier Anne-Lise Courbis sans qui le travail de modélisation n'aurait pas existé, à sa patience pour les nombreuses améliorations qu'elle a apportées au modèle.

Je remercie Pierre-Alain Ayrat, enseignant chercheur au LGEI qui a pris le temps de m'expliquer le fonctionnement des SIG toujours dans la bonne humeur et à ses colocataires de bureau, Laurent et Fred, pour m'avoir fait une place dans leur espace.

Un grand merci à toutes les personnes que j'ai rencontrées au cours de cette thèse et qui m'ont permis de découvrir la mine au passé et au présent :

Pierre Bérard, hydrogéologue, qui m'a accompagné sur le terrain pour découvrir les mines de ma zone d'étude et les personnes qui ont travaillé à la mine comme Stephan Adam (ancien mineur de Rochessadoule) source d'anecdotes et d'informations sur la mine et d'une très grande générosité.

Philippe Choquet, ingénieur dans la section sous-sol de la DRIRE à Alès, pour m'avoir laissé l'accès à sa grande réserve d'information sur les concessions de la région d'Alès et les discussions enrichissantes que nous avons eu.

Jean-Pierre Rolley pour m'avoir aidé dans la découverte de la géologie de la région d'Alès.

Christian Guevara, de l'UTAM Gardanne, pour son accueil amical et pour m'avoir transmis les informations en sa possession

Agnès Blachère, du bureau d'étude Cesame, pour m'avoir transmis les données nécessaires à ce travail.

Je remercie Mme Fouletier, Mr Vimont et Mr Vinches pour m'avoir accueilli au CMGD et au sein du groupe génie civil. Un grand merci au personnel du CMGD qui a contribué au bon déroulement de mon travail : Sylvie Cruvellier, secrétaire du CMGD, d'une efficacité redoutable et toujours de bon conseil ; les voisins de bureau, Laurent, Pierre A, Pierre G,

Merci à Hélène, Cécile et Aurore, du centre de documentation, pour leurs conseils et leur efficacité.

Et bien sûr, je ne peux pas oublier dans ces remerciements l'équipe du midi et des sorties 'extra-thèse' pour tous les moments de rigolade et les partages d'expériences hétéroclites qui ont été essentielles pour changer d'air du début à la fin de ce projet : Nicolas P., Jean-Sébastien, Robert P., Ali et Parisa, Mohammad, Rodolphe, Adnan, Claire, Nicolas C. et ceux que j'ai oublié de citer.

Enfin, mes remerciements les plus sincères seront adressés à mes parents et à Olivier, pour leur soutien quotidien qui a permis, sans conteste, l'aboutissement de ce projet.

Résumé

Cette thèse est une contribution à la connaissance des impacts, quantitatifs et qualitatifs, liés à la déprise minière de la région d'Alès.

Le travail a consisté en l'analyse et l'interprétation de données quantitatives et qualitatives des eaux d'émergences des anciennes mines de charbon du bassin alésien afin de connaître la composition chimique des eaux d'émergences et de l'expliquer. Pour cela, nous avons utilisé des Analyses en Composantes Principales (ACP), des diagrammes de Piper et de Schoeller-Berkalov sur l'ensemble des émergences. Dans un deuxième temps, nous avons réalisé une analyse de l'évolution temporelle des concentrations de chaque élément pour les émergences où les données sont disponibles.

L'aspect quantitatif est étudié grâce à une synthèse des connaissances disponible sur le réservoir minier de Fontanes (géologie, répartition spatiale, données de pompage et de niveaux piézométriques).

Certaines émergences présentent une qualité qui rend impossible leur rejet direct dans l'environnement et il est important dans cette situation de bien définir la masse d'eau concernée. Pour cela, nous avons élaboré un modèle hydrodynamique par automates séquentiels. Il est appliqué aux anciens travaux de Rochebelle-St-Martin, aboutissant à la détermination des paramètres perméabilité et épaisseur du réservoir par reconstitution du niveau piézométrique du réservoir tout en tenant compte d'un pompage encore maintenu dans l'exploitation.

Cette modélisation permet de mieux connaître les paramètres définissant l'aquifère minier dans la perspective d'exploiter cette réserve.

Ces eaux de mines présentent une qualité médiocre. A partir d'une meilleure connaissance hydrodynamique du système, obtenue par la modélisation, il devient possible de proposer une valorisation de cette eau par utilisation de ses calories en géothermie connaissant la géométrie du réservoir minier. Les anciennes exploitations minières sont à nouveau source d'énergie.

Mots clés : hydrogéologie minière, après-mine, ACP, analyses de données, géothermie, modélisation

Abstract

This thesis is a contribution to the knowledge of the quantitative and qualitative impacts, linked to the abandonment of the mining works on Alès coal basin.

This work consisted in analysis and interpretation of quantitative and qualitative data on the waters outflows of former coal mines in order to determine the chemical composition of groundwaters outflows and the water chemistry. For that, we used principal component analysis, diagrams of Piper and Schoeller-Berkalov on all waters outflows. Secondly, we analyzed the temporal evolution of concentrations of each element for the waters outflows.

The quantitative aspect is therefore considered by the synthesis of knowledge available on the mining reservoir of Fontanes (geology, spatial distribution, pumping data and piezometrics levels).

Some groundwaters outflows have a quality that makes their direct discharge into the environment impossible and it is important, in this situation, to define the affected body of the water.

For that, we have developed a hydrodynamical model by sequential automaton. It is applied to the former works of Rochebelle-St-Martin de Valgagues leading to the determination of the parameters permeability and thickness of mining aquifer recovery of piezometric level of the reservoir while taking into account a pumping still maintained.

This model will lead to a better comprehension of the parameters defining the aquifer in the mining perspective to exploit this reserve.

The mine water has a poor quality. After a better knowledge obtained by a hydrodynamical modeling, it becomes realistic to propose a recovery of this water by use of its calories from geothermal and knowing the geometry of the tank mine.

Keywords: Post-mining, data analysis, principal component analysis, geothermy, modeling

Table des matières

Avant-propos

Résumé

Table des matières	1
Liste des figures	6
Liste des tableaux	10
Introduction générale	11

CHAPITRE I :

BIBLIOGRAPHIE	13
I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE	15
I.2. GEOLOGIE DE SURFACE DE LA ZONE ETUDIEE	15
I.2.1. Le socle	17
I.2.2. Primaire	17
I.2.3. Secondaire	18
I.2.3.1. Trias	18
I.2.3.2. Lias	19
I.2.3.3. Jurassique moyen	20
I.2.3.4. Jurassique supérieur	20
I.2.3.5. Crétacé inférieur	20
I.2.4. Tertiaire	21
I.2.5. Quaternaire	22
I.2.6. Conclusion sur la géologie de la zone étudiée	22
I.3. LES MINERAIS DANS LA ZONE D'ETUDE	23
I.3.1. Types de minerais	23
I.3.2. Les mines métalliques sur les concessions de Rochebelle et Saint-Martin de Valgalgues	25
I.3.2.1. Origine des minéralisations	26
I.3.2.1.1. Au Stéphaniens	26
I.3.2.1.2. Au Trias	27
I.3.2.1.3. Au Lias	27
I.3.2.2. Descriptifs des mines métalliques	27
I.4. FOND GEOCHIMIQUE	31
I.4.1. Influence de la lithologie sur la composition des eaux souterraines et de surface	32
I.4.1.1. Influence des calcaires (28%) et dolomies (17%)	32
I.4.1.2. Influence des zones de socle (7%)	32
I.4.1.2.1. Eaux souterraines	32
I.4.1.2.2. Eaux de surfaces	33
I.4.1.3. Influence des terrains salifères	34
I.4.1.4. Influence des charbons	34
I.4.1.4.1. Eaux souterraines	35
I.4.1.4.2. Eaux de surface	35
I.4.1.5. Synthèse	35
I.4.1.5.1. Eaux souterraines	35
I.4.1.5.2. Eaux de surface	36

I.4.2.	Les éléments particuliers _____	37
I.4.2.1.	L'ion chlorure _____	37
I.4.2.2.	Élément trace : l'arsenic _____	38
I.4.3.	Réactions chimiques et géologie _____	40
I.4.3.1.	Le fer _____	40
I.4.3.2.	Les sulfates _____	40
I.4.3.3.	Le sodium _____	41
I.4.3.4.	L'hydrogénocarbonate _____	41
I.4.3.5.	Les chlorures _____	42
I.4.3.6.	Le magnésium _____	42
I.4.3.7.	Le calcium _____	42
I.4.4.	Principe et exemples de comportement chimique des eaux de mines _____	42
I.5.	Hydrologie et hydrogéologie de la zone d'étude _____	43
I.5.1.	Hydrologie _____	43
I.5.1.1.	L'Auzonnet _____	43
I.5.1.2.	Le Grabieux _____	44
I.5.1.3.	L'Avène _____	44
I.5.1.4.	Le Gardon d'Alès _____	44
I.5.1.5.	Le Galeizon _____	44
I.5.1.6.	La Cèze _____	44
I.5.2.	Hydrogéologie _____	46
I.5.2.1.	Les schistes métamorphiques et roches cristallines _____	46
I.5.2.2.	Le Trias _____	47
I.5.2.3.	L'Hettangien _____	47
I.5.2.4.	Le Jurassique moyen et supérieur (Sinémurien) _____	47
I.5.2.5.	Le Crétacé inférieur _____	47
I.5.2.6.	Le Quaternaire _____	47
I.5.3.	Hydrogéologie minière _____	49
I.5.3.1.	Les techniques d'extraction sur la zone d'étude _____	49
I.5.3.2.	Notion de réservoir minier _____	50
I.5.3.3.	Concessions de Rochebelle et de St Martin de Valgugues : Site de Fontanes _____	50
I.5.3.4.	Concession de la Grand Combe Ouest _____	52
I.5.3.4.1.	Faisceau des Oules _____	53
I.5.3.4.2.	Faisceau de Laval _____	54
I.5.3.4.3.	Faisceau de S ^{te} Barbe _____	54
I.5.3.4.1.	Faisceau de Ricard _____	55
I.5.3.4.2.	Faisceau de Grand' Baume _____	55
I.5.3.4.3.	Les faisceaux superficiels : faisceau de Lumières et de Champclauson _____	55
I.5.3.5.	Concessions de Grand Combe Est, de Robiac et Meyrannes, de Tréllys et Palmesalade (Figure 27) _____	57
I.5.3.5.1.	Réservoir de Bessèges-Rochessadoule _____	57
I.5.3.5.2.	Réservoir de Molières - Saint-Jean _____	58
I.5.3.5.3.	Réservoir de Tréllys _____	58
I.6.	PLUVIOMETRIE DE LA ZONE D'ETUDE _____	58
I.7.	LES MODELES APPLIQUES AUX RESERVOIRS MINIERES _____	59
I.7.1.	Modèle hydrogéochimique _____	60
I.7.1.1.	Modèles globaux (boîtes noires) _____	60
Un réservoir _____	60	
I.7.1.2.	Modèles distribués _____	61
I.7.2.	Modélisation hydrodynamique _____	62
I.7.2.1.	Modèles globaux (boîtes noires) _____	62
I.7.2.2.	Modèles distribués _____	63
I.7.2.2.1.	Méthode des éléments finis _____	63
I.7.2.2.2.	Réseau de tubes _____	63
I.7.2.2.3.	Modélisation par évènements discrets basé sur des machines séquentielles _____	64

I.7.3.	Couplage de modèles hydrodynamique et chimique	64
I.7.3.1.	Modèle de boîte couplé avec un modèle d'écoulement classique	64
I.7.3.2.	Modèle de tube simulant débit et paramètres physico-chimiques	65
I.8.	Conclusion du chapitre I	65

CHAPITRE II :

VALORISATION SPATIALE ET TEMPORELLE DES DONNEES MESUREES A L'EMERGENCE DES ANCIENS TRAVAUX MINIERES 66

II.1.	Les données	68
II.1.1.	Nature des données	68
II.1.2.	Pré-classement des données	68
II.1.3.	Qualité des données	68
II.1.4.	Quantité de données disponibles	69
II.2.	Matrice des distributions et des relations entre éléments chimiques et paramètres	73
II.3.	Analyses statistiques	74
II.3.1.	Analyse en composantes principales (ACP)	74
II.3.1.1.	Description de la méthode	74
II.3.1.2.	Résultats des ACP sur les paramètres communs à toutes les émergences	75
II.3.1.2.1.	ACP n°1 : Variables (ions majeurs, fer total, pH et somme des anions) sur 15 émergences	76
II.3.1.2.2.	ACP n°2 : Variables (SO_4^{2-} , Ca^{2+} + Mg^{2+} , Fe_{total} et somme des cations et des anions) sur 16 émergences	78
II.3.1.2.3.	ACP n°3 : Variables (SO_4^{2-} , Ca^{2+} + Mg^{2+} et Fe^{2+} et la somme des cations et des anions) sans les émergences de Laval, Fontanes et Silhol	80
II.3.1.2.4.	ACP n°4 : Variables (Cl^- , Na^+ , HCO_3^- , Mg^{2+} + Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} et SO_4^{2-}) sur 16 émergences	82
II.3.1.2.5.	ACP n°5 : Variables en lien avec la présence de fer (pH, Fe total et Mn^{2+}) pour les 16 émergences	84
II.3.2.	Conclusion	86
II.4.	Diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkalov	87
II.4.1.	Description du diagramme	87
II.4.2.	Résultats et interprétation	87
II.4.2.1.	Groupe des émergences avec de faibles concentrations et ne possédant pas de couverture triasique (sauf Ste Barbe)	88
II.4.2.2.	Groupe des émergences à fortes concentrations possédant une couverture triasique (sauf Ste Barbe)	91
II.4.2.2.1.	Emergence de Laval	91
II.4.2.2.2.	Emergence de Fontanes	92
II.4.2.2.3.	Emergence de Silhol	93
II.4.3.	Conclusion	94
II.5.	Identification des faciès géochimiques (Diagramme de Piper)	95
II.5.1.	Description du diagramme de Piper	95
II.5.2.	Résultats et interprétations	95
II.5.2.1.	Groupe d'émergences avec couverture triasique (Laval, Fontanes, Ste Barbe et Silhol)	97
II.5.2.2.	Groupe d'émergences sans couverture triasique (La Fontaine, Crouzette, Corniche, Palmesalade, Chalmeton, TB Larrieux, Les Estérais, Therond et Lumières)	97
II.5.3.	Conclusion	98
II.6.	Les évolutions spatiales	98
II.6.1.	Le fer	99
II.6.2.	Les sulfates	101
II.6.3.	Le calcium	103
II.6.4.	Le sodium	104

II.6.5.	Les chlorures	105
II.6.6.	L'hydrogénocarbonate	106
II.6.7.	Le magnésium	108
II.6.8.	Les extraits secs	109
II.6.9.	Conclusion	110
II.7.	Les variations temporelles	110
II.7.1.	Les extraits secs	111
II.7.2.	Les sulfates	111
II.7.3.	Le fer total	114
II.7.4.	Les chlorures	115
II.7.5.	Le magnésium	117
II.7.6.	Conclusion	117
II.8.	Conclusion du chapitre II	118

CHAPITRE III :

MODELISATION DU RESERVOIR MINIER DE ROCHEBELLE ST-MARTIN DE VALGALGUES _ 120

III.1.	Notre choix : Modèle à évènements discrets basé sur des machines séquentielles	122
III.2.	Bilan hydrologique sur la zone d'étude	123
III.2.1.	Evapotranspiration réelle	123
III.2.2.	La zone saturée	124
III.2.3.	Pendant le pompage	125
III.2.4.	A l'arrêt du pompage	125
III.3.	Principe de modélisation	126
III.3.1.	Echelle globale du réservoir minier	127
III.3.2.	Echelle du versant	128
III.3.3.	Echelle de la parcelle	129
III.4.	Connexion à l'intérieur du modèle	130
III.4.1.	Description de la géologie superficielle	130
III.4.2.	Description de la couverture végétale	133
III.4.3.	Calage des paramètres	134
III.5.	Résultats	134
III.5.1.	Le calage	134
III.5.1.1.	La perméabilité (k)	136
III.5.1.2.	La réserve facilement utilisable (RFU)	137
III.5.1.3.	L'épaisseur	138
III.5.1.4.	L'infiltration	138
III.5.1.5.	L'emmagasinement	139
III.5.1.6.	Les niveaux piézométriques initiaux	139
III.5.2.	Interprétations	140
III.5.3.	La validation	141
III.5.4.	Conclusion	143

CHAPITRE IV :

PERSPECTIVES POUR LES EAUX DE MINES DES CONCESSIONS DE ROCHEBELLE - ST-MARTIN DE VALGALGUES _____ 145

IV.1.	La géothermie	147
IV.1.1.	Intérêt et utilisation de la géothermie	147
IV.1.2.	Les différents types de géothermie	149

IV.2. Principe de la pompe à chaleur	149
IV.3. Application de la géothermie aux tunnels et mines	150
IV.4. Application au réservoir minier de Rochebelle-St-Martin de Valgagues	152
IV.4.1. Calcul global de la réserve énergétique du réservoir minier	152
IV.4.2. Paramètres utiles pour le calcul géothermique	152
IV.4.3. Estimation de la réserve potentielle du réservoir minier de St Martin de Valgagues (voir annexe 13)	155
IV.5. Conclusion	156
CONCLUSION GENERALE	157
LES ANNEXES	163

Liste des figures

Figure 1 : Situation géographique d'Alès et de sa région (site internet tourisme Gard)	15
Figure 2 : Carte géologique au 1/50 000 ^e du bassin houiller des basses Cévennes (d'après Berger et al., 1978)	16
Figure 3 : Carte géologique synthétique de la région d'Alès (Wang, 1991)	17
Figure 4 : Etape de la formation d'un charbon (site internet msn encarta)	18
Figure 5 : Répartition de la géologie de surface dans la zone d'étude	22
Figure 6 : Représentation des zones répertoriées signalant la présence de minerai autre que le charbon (inspiré de BRGM, 1994 et carte IGN)	24
Figure 7 : Log géologique représentant les minerais de la zone d'étude	25
Figure 8 : Localisation des concessions de charbon de la zone d'étude (carte IGN)	26
Figure 9 : Localisation des anciennes exploitations de minerais (carte IGN et CESAME, 2006)	30
Figure 10 : Lithostratigraphie simplifiée de la zone d'étude	31
Figure 11 : Teneurs en chlorure de pluie en France (Chery, 2006)	38
Figure 12 : Carte schématique du Massif Central représentant les zones d'anomalies géologiques en As et Au (Copard et al., 2000)	39
Figure 13 : Localisation des anomalies en éléments traces dans les eaux de surface et souterraine de la région d'Alès (d'après Brenot et al., 2006)	39
Figure 14 : Solubilité des sulfates (Schoeller, 1962)	41
Figure 15 : Evolution temporelle de la concentration en sulfates à Rothschoenberger Stollen en Allemagne (Wolkersdorfer, 2008)	43
Figure 16 : Evolution temporelle de la concentration en fer total dans la mine de Straberg en Allemagne (Wolkersdorfer, 2008)	43
Figure 17 : Développement du réseau hydrographique sur la zone d'étude (Extrait de la carte IGN 1/25000e – Alès)	45
Figure 18 : Log géologique avec situation des niveaux aquifères	46
Figure 19 : Carte représentant les systèmes aquifères du département du Gard (BRGM, 1983)	48
Figure 20 : Schéma représentant l'évolution des mouvements de terrain suite à une taille par foudroyage (gauche : initialisation du phénomène ; droite : (I) zone de foudroyage, (II) zone de fissuration et (III) zone de tassement) (Zeng, 1990)	50
Figure 21 : Foudroyage et récupération du charbon du toit (Vidal, 1962)	50
Figure 22 : Délimitation des concessions de Rochebelle et St-Martin de Valgalgues, de l'extension des travaux miniers, des exploitations autres que le charbon sur la carte IGN d'Alès au 1/50000 ^e	51
Figure 23 : Schéma d'ensemble Nord-Sud du fonctionnement de la concession de la Grand' Combe Ouest (Cesame, 1999)	53
Figure 24 : Représentation de l'extension des travaux miniers de la Grand' Combe Ouest (carte IGN)	53
Figure 25 : Schéma représentant l'organisation des écoulements de l'exploitation Ste-Barbe (Cesame, 1999)	54
Figure 26 : Localisation des émergences minières sur la concession de la Grand' Combe Ouest (carte IGN)	56
Figure 27 : Représentation des émergences des concessions de la Grand' Combe Est, Robiac et Meyrannes, Tréllys et Palmesalade (carte IGN)	57
Figure 28 : Représentation des hauteurs moyennes des précipitations pour les stations de la Grand' Combe, St Christol les Alès, Salindres et Alès d'après le Tableau 14	59
Figure 29 : Evolution réelle (carré noir) et modélisée (trait plein) des concentrations de zinc pour l'exutoire de la mine de Largentière. 1) modèle de rinçage simple et 2) avec prise en compte de la remise en solution du zinc dans les travaux miniers (d'après Schmitt et al., 2004)	60
Figure 30 : Evolution mesurée (triangle) et modélisation simple (trait plein) de mélange sur les concentrations de zinc issues du travers banc aval de la mine des Malines (d'après Schmitt, 2004)	61
Figure 31 : Principe de la modélisation d'un réservoir minier avec un modèle NCR (réseau de réacteurs chimiques) (d'après Collon-Drouaillet et al., 2005)	61
Figure 32 : Représentation schématique du calcul du modèle inverse (d'après Vaute et al., 2004)	63
Figure 33 : Schéma d'ensemble d'un motif de base du réseau avec les grandeurs C (conductance), Q (débit), K (concentration chimique) d'après Lanini et al., (2000)	65
Figure 34 : Représentation de la somme des cations et des anions en fonction de la conductivité	68
Figure 35 : Nombre de campagnes d'analyses totales par émergences lorsque le nombre est au moins égal à trois	71
Figure 36 : Répartition du nombre de mesures par élément sur l'ensemble des données	71
Figure 37 : Répartition du nombre de campagne d'analyses par année pour le site de Fontanes	72
Figure 38 : Nombre de mesure totale par élément pour le site de Silhol entre 1974 et 2001	72

Figure 39 : Répartition des campagnes d'analyses en fonction des années pour le site de prélèvement de Silhol72	
Figure 40 : Matrice des distributions et des relations entre éléments chimiques et paramètres (Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Fe_{total} , HCO_3^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , pH)	73
Figure 41 : Représentation de la répartition des variables (SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^{2-} , Na^+ , Fe total, pH et la somme des anions) pour les 15 émergences de l'ACP n°1	77
Figure 42 : Représentation de la répartition des individus (16 émergences) de l'ACP n°1 utilisant les variables SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^{2-} , Na^+ , Fe total, pH et la somme des anions	77
Figure 43 : Représentation de la répartition des variables (SO_4^{2-} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et Fe^{2+} et la somme des cations et des anions) de l'ACP pour les 16 émergences de l'ACP n°2	79
Figure 44 : Représentation de la répartition des individus (16 émergences) de l'ACP n°2 utilisant les variables SO_4^{2-} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, Fe^{2+} et la somme des cations et des anions.	79
Figure 45 : Représentation de la répartition des variables (SO_4^{2-} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et Fe^{2+} et la somme des cations et des anions) de l'ACP n°3 sans les émergences de Fontanes, Laval et Silhol.	81
Figure 46 : Représentation de la répartition des individus (sans les émergences de Fontanes, Laval et Silhol) de l'ACP n°3 utilisant les variables SO_4^{2-} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, Fe^{2+} et la somme des cations et des anions.	81
Figure 47 : Représentation de la répartition des variables (SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, Na^+ , HCO_3^- et Cl^-) de l'ACP n°4 sur 16 émergences	83
Figure 48 : Représentation de la répartition des individus (16 émergences) de l'ACP n°4 utilisant les variables SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, Na^+ , HCO_3^- et Cl^- .	83
Figure 49 : Représentation de la corrélation entre la concentration en manganèse et en fer d'après les valeurs moyennes de chaque émergence	84
Figure 50 : Représentation de la répartition des variables (pH, Fe^{2+} , Mn^{2+}) de l'ACP n°5 sur 16 émergences	85
Figure 51 : Représentation de la répartition des individus (16 émergences) de l'ACP n°5 utilisant les variables pH, Fe^{2+} , Mn^{2+}	85
Figure 52 : Diagramme de Schoeller-Berkalov représentant les 14 émergences (à partir des moyennes par élément pour chaque émergence)	87
Figure 53 : Ensemble des diagrammes de Schoeller pour l'émergence de Palmesalade	91
Figure 54 : Ensemble des diagrammes de Schoeller pour l'émergence de Laval	92
Figure 55 : Ensemble des diagrammes de Schoeller pour l'émergence de Fontanes	93
Figure 56 : Ensemble des diagrammes de Schoeller pour l'émergence de Silhol	93
Figure 57 : Classification de Piper d'après (Piper, 1944)	95
Figure 58 : Diagramme de Piper représentant l'ensemble des analyses complètes pour les émergences de la zone d'étude (voir Annexe 7)	96
Figure 59 : Diagramme de Piper représentant la moyenne des mesures pour les émergences de la zone d'étude (voir Annexe 7)	96
Figure 60 : Diagramme de Piper avec les représentations du faciès des eaux du Gardon en différents points et les eaux d'émergences minières	98
Figure 61 : Moyenne des concentrations en fer total par émergence	99
Figure 62 : Représentation d'anciennes mines à proximité de l'émergence de Fontanes (carte IGN)	100
Figure 63 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en fer	101
Figure 64 : Moyenne des concentrations en sulfates par émergence (pas de données pour Verrerie) (le T jaune signale les émergences recouvertes en partie par des terrains triasiques gypseux)	101
Figure 65 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en sulfates à partir de Berger et al (1978)	102
Figure 66 : Moyenne des concentrations en calcium par émergence	103
Figure 67 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en calcium	103
Figure 68 : Moyenne des concentrations en sodium par émergence (sauf émergence de la Verrerie par manque de données)	104
Figure 69 : Représentation de la concentration en Cl (meq/l) en fonction du Na (meq/l) pour les émergences analysées et la droite de dissolution du NaCl dans l'eau.	104
Figure 70 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en sodium	105
Figure 71 : Moyenne des concentrations en chlorures par émergence	105
Figure 72 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en chlorures	106
Figure 73 : Moyenne des concentrations en hydrogénocarbonate par émergence	106
Figure 74 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en hydrogénocarbonate	107
Figure 75 : Moyenne des concentrations en magnésium par émergence	108
Figure 76 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en magnésium	108
Figure 77 : Moyenne des extraits secs par émergence	109
Figure 78 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en extraits secs	109
Figure 79 : Evolution temporelle de la concentration en extraits secs pour l'émergence de Fontanes	111

Figure 80 : Evolution temporelle des extraits secs pour les émergences de Corniche, Ste Barbe, Crouzette, Thérond, Laval, Palmesalade, Cornas, Lumières et Larrieux. _____	111
Figure 81 : Evolution temporelle de la concentration en sulfates pour l'émergence de Fontanes _____	112
Figure 82 : Evolution de la concentration en sulfates pour l'émergence de Silhol entre 1990 et 2001 _____	112
Figure 83 : Evolution temporelle de la concentration en sulfates pour les émergences de Palmesalade, Ste Barbe, Thérond, Lumières, Corniche, Larrieux, La Fontaine, Crouzette ainsi que les précipitations pour l'année 1997 _____	113
Figure 84 : Evolution temporelle de la concentration en sulfates pour les émergences de Laval, Palmesalade, Ste Barbe, Thérond, Lumières, Corniche, Larrieux, La Fontaine et Crouzette ainsi que les précipitations. _____	113
Figure 85 : Courbe d'évolution des sulfates pour les émergences de Chalmeton et des Esteraings _____	114
Figure 86 : Evolution temporelle de la concentration en fer pour l'émergence de Fontanes _____	114
Figure 87 : Evolution temporelle de la concentration en fer pour les émergences de Corniche, Ste Barbe, Crouzette, Thérond, Laval, Palmesalade, Cornas, Lumières, Larrieux ainsi que les précipitations. _____	115
Figure 88 : Représentation des courbes de concentration en Fe total pour les émergences de Silhol, les Esteraings et Chalmeton _____	115
Figure 89 : Evolution temporelle de la concentration en chlorures pour l'émergence de Fontanes _____	116
Figure 90 : Evolution temporelle de la concentration en chlorures pour les émergences de Corniche, Ste Barbe, Crouzette, Thérond, Palmesalade, Cornas, Lumières, Larrieux et Laval ainsi que les précipitations. _____	116
Figure 91 : Evolution temporelle de la concentration en magnésium pour l'émergence de Fontanes _____	117
Figure 92 : Evolution temporelle de la concentration en magnésium pour les émergences de Corniche, Ste Barbe, Crouzette, Thérond, Palmesalade, Cornas, Lumières, Larrieux et Laval ainsi que les précipitations _____	117
Figure 93 : Phénomènes de surface et souterrain intervenant dans le bilan hydrologique (Courbis et al., 2007) _____	123
Figure 94 : Représentation des phénomènes de base inclus dans le bilan hydrologique (précipitations (P), Evapotranspiration réelle (Eta), écoulement de surface amont (USR), écoulement de surface vers l'aval (DSR), réserve facilement utilisable (WS), Infiltration (I), eau de subsurface amont (USSR) et écoulement de subsurface vers l'aval (DSSR) (Courbis et al., 2007) _____	124
Figure 95 : Représentation de la hiérarchie du modèle (Courbis et al, 2004) _____	127
Figure 96 : Limites globales du réservoir minier modélisé (carte IGN) _____	127
Figure 97 : Réservoir minier subdivisé en deux bassins versants (carte IGN) _____	128
Figure 98 : Parcelles constituant le réservoir minier de St Martin de Valgalgues (carte IGN) _____	129
Figure 99 : Carte représentant la géologie à la surface du réservoir minier de Rochebelle – St-Martin de Valgalgues et les failles (ligne rouge) d'après Cesame, 2006 _____	131
Figure 100 : Représentation de la coupe de l'exploitation de houille de Rochebelle-St Martin de Valgalgues (HBCM) dont la localisation se trouve Figure 131. _____	132
Figure 101 : Représentation du type de végétation recouvrant le réservoir minier et les failles (ligne rouge) (carte IGN) _____	133
Figure 102 : Précipitations de l'année 1997 en mm _____	135
Figure 103 : Valeurs du pompage journalier pour l'année 1997 _____	135
Figure 104 : Niveaux piézométriques modélisé et simulé pour l'année 1997 _____	136
Figure 105 : Exemples de calage de la courbe du niveau piézométrique de Fontanes avec différentes perméabilités dont les valeurs sont dans le tableau ci-dessous. _____	137
Figure 106 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs de l a RFU (les autres paramètres étant identiques pour les trois simulations) _____	137
Figure 107 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs d'épaisseur du réservoir minier (les autres paramètres étant identiques pour les trois simulations) _____	138
Figure 108 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs d'infiltration (les autres paramètres étant identiques pour les 3 simulations) _____	139
Figure 109 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs d'emménagement (les autres paramètres étant identiques pour les 3 simulations) _____	139
Figure 110 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs de niveaux piézométriques initiaux (les autres paramètres étant identiques pour les 3 simulations - Tableau 29) _____	140
Figure 111 : Synchronisme entre les pics de la courbe réelle et de la courbe simulée _____	141
Figure 112 : Notation des phases de croissance et de décroissance du niveau piézométrique réel _____	141
Figure 113 : Précipitations de l'année 1998 _____	142
Figure 114 : Pompage pour l'année 1998 _____	142
Figure 115 : Courbes mesurée et simulée du niveau piézométrique pour l'année 1998 _____	143
Figure 116 : Les différentes applications de la géothermie (version francisée) B. Lindal _____	148
Figure 117 : Perspective pour le développement des énergies renouvelables (BRGM, 2008) _____	149
Figure 118 : Principe de la pompe à chaleur (site internet ADEME) _____	150

Figure 119 : Valeurs de la température des eaux issues de la mine au niveau du pompage de Fontanes entre 1997 et 2005	152
Figure 120 : Exemple de stratification de la température des eaux de mines selon la profondeur (Wolkersdorfer 2008)	153
Figure 121 : Evolution de la concentration en fer et du pH en fonction de la profondeur dans l'aquifère minier de Frances colliery au Royaume-Uni. (Nutall et al., 2004)	153
Figure 122 : Débit de pompage au niveau du puits Fontanes entre 1996 et 2005	154
Figure 123 : Valeurs moyennes du pompage par mois, entre 1996 et 2005	154
Figure 124 : Représentation de la consommation sur 15 ans avec différentes énergies	155
Figure 125 : Log Grand' Combe (Wang, 1991)	167
Figure 126 : Log de la Vernarède (Wang, 1991)	169
Figure 127 : Coupe stratigraphique de Portes (Wang, 1991)	170
Figure 128 : Les différents stades de la formation de la Grand' Combe (Wang, 1991)	172
Figure 129 : Secteur occidental du karst de basses Cévennes (d'après Fabre, 1984)	173
Figure 130 : Secteur oriental du karst de basses Cévennes (d'après Fabre, 1984)	174
Figure 131 : Localisation des piézomètres de Fontanes, Rochebelle et St-Raby sur la concession de St-Martin de Valgalgues (carte IGN)	175
Figure 132 : Localisation des 37 émergences de la zone étudiée (carte IGN)	176
Figure 133 : Localisation des 17 émergences de la zone d'étude possédant au moins 3 analyses physico-chimiques (carte IGN)	177
Figure 134 : Localisation des 16 émergences retenues pour les analyses de données (carte IGN)	178
Figure 135 : Principales étapes constituant le modèle (a) modélisation des parcelles (b) modélisation des versants (c) modélisation du bassin versant total	222
Figure 136 : Première fenêtre d'interface pour le choix de l'équation de l'ETR	223
Figure 137 : Fenêtre permettant d'accéder aux choix des fichiers climatiques et aux boutons de réglages des paramètres	224
Figure 138 : Fenêtre permettant des modifications sur les nappes et les parcelles unitaires	225
Figure 139 : Les différents types de pompe (BRGM, 2004)	227
Figure 140 : Les différents doublets géothermiques (BRGM, 2004)	228

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse de l'état des mines métalliques (Cesame, 2006) page suivante	27
Tableau 2 : Concentrations moyennes en éléments majeurs (mg/l) dans les aquifères calcaires libres à plus de 100 km de la côte (Barbier et al., 2001) et les aquifères dolomitiques d'après Schoeller (1962)	32
Tableau 3 : Concentrations moyennes des eaux souterraines françaises en éléments majeurs dans les micaschistes, gneiss et schistes (Barbier et al., 2001 et Blum et al., 2001)	33
Tableau 4 : Teneurs en éléments chimiques d'eau circulant dans des schistes (mg/l), les terrains gypseux et les granito-gneiss d'après Schoeller (1962) et Derron (2004)	33
Tableau 5 : Composition des eaux de ruisseaux des Cévennes en contact avec des schistes et des schistes à houille en mg/l (d'après Meybeck, 1986)	34
Tableau 6 : Exemples de compositions des eaux en contact avec des charbons en France en mg/l	35
Tableau 7 : Composition chimique moyenne des eaux souterraines établie par analyse statistique en mg/l (Blum et al., 2001)	35
Tableau 8 : Analyses moyennes de la qualité des eaux souterraines à proximité du Gardon d'Alès (source Cesame)	36
Tableau 9 : Composition chimique des eaux de surface drainant de petits bassins versants français (Meybeck, 1984)	36
Tableau 10 : Moyenne de la qualité des eaux du Gardon d'Alès et de ses affluents entre 1996 et 2006 (source Cesame)	37
Tableau 11 : Débits des émergences des faisceaux superficiels	56
Tableau 12 : Réservoirs miniers de la Grand' Combe Est	57
Tableau 13 : Estimation des débits pour les exutoires	58
Tableau 14 : Hauteurs moyennes des précipitations pour 4 stations de mesure (Météo France)	59
Tableau 15 : Nom des concessions et des émergences étudiées	69
Tableau 16 : Synthèse sur la période et le nombre de données disponibles par émergence	70
Tableau 17 : Valeurs moyennes par élément et par émergence utilisées pour l'ACP	76
Tableau 18 : Moyennes des relevés de terrain de Juillet 2008	76
Tableau 19 : Matrice de corrélation	78
Tableau 20 : Matrice de corrélation	78
Tableau 21 : Matrice de corrélation	80
Tableau 22 : Matrice de corrélation	82
Tableau 23 : Matrice de corrélation	84
Tableau 24 : Dates d'ouverture et de fermeture des exploitations associées aux émergences étudiées	90
Tableau 25 : Ensemble des campagnes d'analyses complètes représentées sur des diagrammes de Schoeller pour les 10 émergences du groupe principal	89
Tableau 26 : Répartition des éléments pour les deux groupes définis	97
Tableau 27 : Paramètres choisis pour la calibration et la validation du modèle	136
Tableau 28 : Paramètres choisis pour les courbes de la Figure 105	137
Tableau 29 : Paramètres choisis pour les courbes de la Figure 110	140
Tableau 30 : Potentiel géothermique d'une sélection de 15 tunnels ferroviaires, routiers et de galeries de sondage (site internet SSG)	151
Tableau 31 : Comparatif de prévision de consommation annuelle selon 3 sources d'énergie (source Dominguez énergie)	155
Tableau 32 : Fichier landcover.dbf associant une clé pour chaque type de végétation	220
Tableau 33 : fichier catchm.dbf	220
Tableau 34 : gw.dbf	220
Tableau 35 : slopes.dbf	220
Tableau 36 : piezo.dbf	220
Tableau 37 : parcel.dbf	221

Introduction générale

Aujourd'hui, l'après-mine représente un enjeu essentiel pour les anciennes régions minières. La gestion de l'impact sur l'environnement, suite à l'ennoyage des anciennes exploitations, mais aussi la mise en sécurité des installations afin d'éviter les problèmes liés aux effondrements, doivent être gérés par les anciens exploitants et/ou les collectivités territoriales.

Chaque site d'exploitation se trouve dans un contexte géologique, topographique et géographique différent, si bien, qu'aucun scénario universel ne peut être proposé.

Cette thèse a pour but de rechercher les différentes causes des variations des propriétés physico-chimiques des eaux dans le temps et dans l'espace et de définir les propriétés hydrodynamiques d'un réservoir (Rochebelle-St-Martin de Valgalgues).

Le type de questions posées aux responsables des institutions chargées de gérer les effets de l'après-mine sont:

- Quelle sera la composition chimique des résurgences ainsi que leur évolution?
- Quels seront les impacts sur l'environnement et quels aménagements devront être mis en œuvre pour les gérer ?' (Cesame, 1999)

Notre réflexion porte sur les travaux miniers de charbon de la région alésienne sans négliger les liens pouvant exister avec les mines métalliques parfois très proches.

Outre le fait que les exploitations minières existent depuis longtemps dans les Cévennes, la géologie, complexe, qui affecte les terrains ne simplifie pas l'interprétation et la prise de décision.

Une partie du travail a consisté en la collecte et la mise en forme de données qualitatives et quantitatives des eaux souterraines dans le secteur étudié. Un Système d'information géographique (SIG) nous permettra une représentation spatiale de ces émergences et de la qualité des eaux.

Pendant l'exploitation, l'exhaure de la mine rejoint directement ou indirectement les cours d'eau à proximité. Par contre, à la fermeture d'une exploitation, lorsque l'exhaure est arrêtée, les vides miniers se remplissent d'eau jusqu'à ce que l'eau 'déborde' au niveau de l'exutoire le plus bas de l'exploitation. Le résultat est un nouvel écoulement de surface qui ne va ni forcément rejoindre le même cours d'eau que l'exhaure pendant l'exploitation, ni reprendre les écoulements qui existaient avant exploitation. Les conséquences peuvent être une modification des débits des bassins versants concernés. De même, les galeries peuvent dévier et déverser des eaux dans un autre bassin versant, et ainsi modifier leur régime naturel.

La qualité des eaux de résurgences de mines est variable au cours du temps et selon le site de mesure étudié. Pendant l'ennoyage, l'eau se charge en différents éléments et lorsque la côte de l'exutoire est atteinte, l'eau est souvent fortement chargée. Par contre, au fur et à mesure du rinçage des vides miniers, la teneur en différents éléments décroît jusqu'à atteindre un palier (régime permanent) qui dépend du contexte dans lequel se développent ces travaux.

Dans certains cas, après l'envoyage et lorsque l'eau ressort à la surface, une forte charge en métaux est relevée et il faut alors traiter les eaux pour réduire les impacts sur l'environnement.

Le travail réalisé a consisté dans un premier temps en l'étude bibliographique des informations nécessaires à la connaissance du contexte de notre étude. Dans une deuxième partie et afin de comprendre les propriétés physico-chimiques des eaux de la zone étudiée, différentes méthodes d'analyses de données sont utilisées. L'étude plus particulière de la température apparaît dans le chapitre consacré à la géothermie. D'un point de vue hydrodynamique, le réservoir minier de Rochebelle-St-Martin, le mieux renseigné, a été étudié à l'aide d'un modèle à automates séquentiels.

CHAPITRE I :

BIBLIOGRAPHIE

Le premier chapitre contient une étude bibliographique détaillée de la géologie, l'hydrogéologie et l'histoire de la zone afin de présenter le contexte de cette étude. Nous présenterons de manière plus brève la bibliographie sur des modèles hydrogéochimiques et hydrodynamiques déjà utilisés pour des réservoirs miniers et l'hydrogéologie liée à l'après-mine.

I.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE

Alès, sous-préfecture du Gard, se situe dans le Sud de la France à une quarantaine de kilomètres au Nord-Ouest de la ville de Nîmes. La zone d'étude s'étend au Nord de cette ville, au pied des Cévennes (chaîne de montagne constituant la bordure Sud-est du Massif Central et d'orientation SW-NE). L'altitude de la ville est de 150 m NGF (Figure 1).



Figure 1 : Situation géographique d'Alès et de sa région (site internet tourisme Gard)

I.2. GEOLOGIE DE SURFACE DE LA ZONE ETUDIEE

La zone étudiée est limitée (Figure 2) :

- à l'Est par la faille des Cévennes de direction NE-SW qui est un accident dextre tardi-hercynien. Elle a joué en décrochement senestre à l'Eocène supérieur (40 Ma) et en extension à l'Oligocène (34 Ma). Le fossé d'Alès est long de 50 km et large de 5-6 km. L'épaisseur de sédiment qui remplit le graben est de 1500 m (site internet geolales). Cette faille constitue une limite étanche entre la zone étudiée et le fossé tertiaire.
- à l'Ouest par la faille de Villefort qui est décrite par deux grandes périodes de fonctionnement, à l'hercynien en décrochement et pendant la période alpine en déplacement vertical diminuant vers le Nord (Wienin, 1996). Au niveau du Mont

Lozère, le déplacement de la faille a engendré 900 m de déplacement vertical sur 2,5 km. Cette faille constitue une limite étanche entre la zone étudiée et les schistes imperméables.

- et au Nord par le cheminement de la Cèze et la limite des concessions de charbon (Figure 8).

La géologie de la zone d'étude définie précédemment est synthétisée dans cette partie (Figure 2). Notons que cette lithologie de surface peut être bien différente de la lithologie présente en profondeur. (Berger et al., 1978; Gras, 1970; Brager-Ragouin et al., 1999)

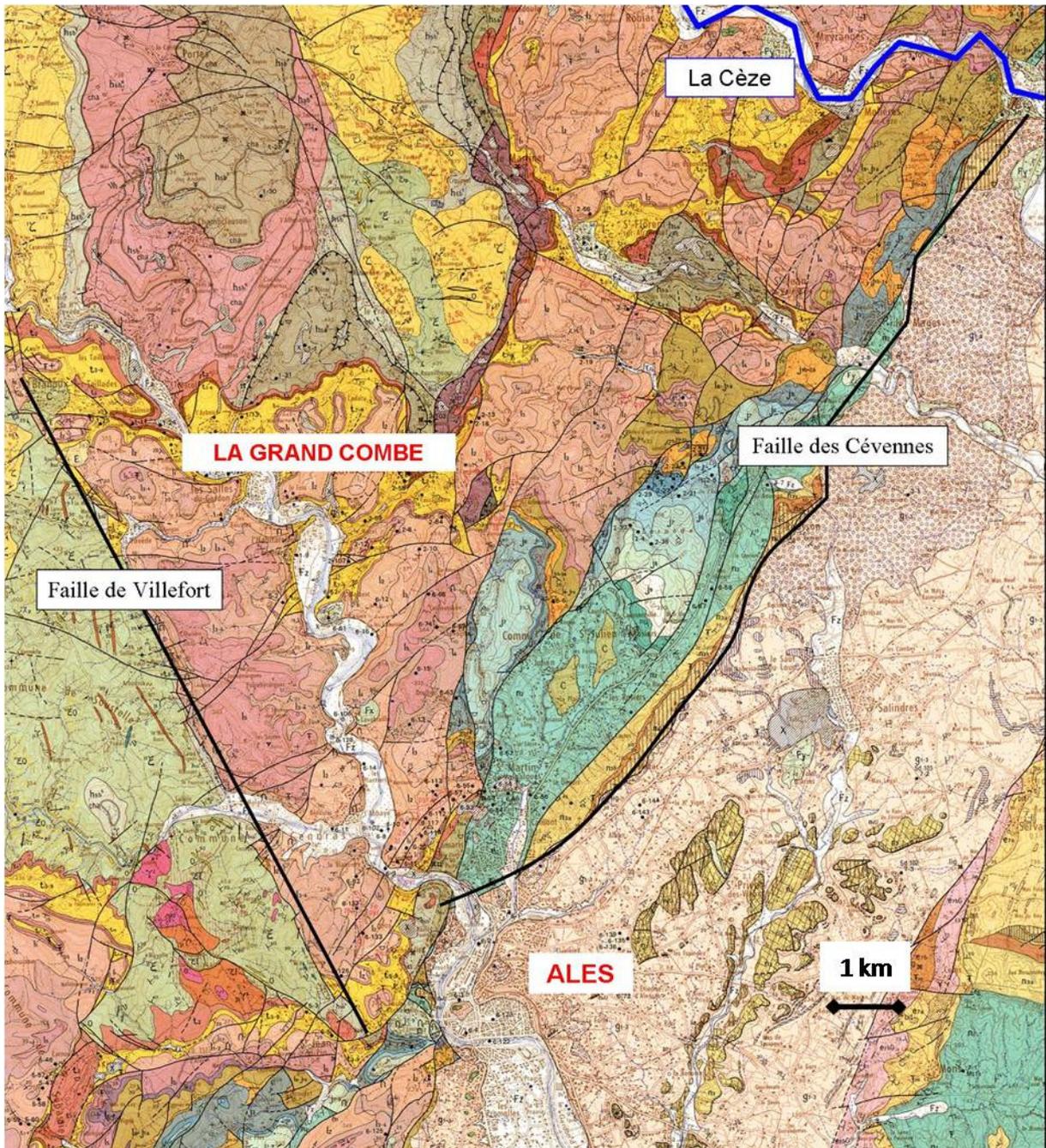


Figure 2 : Carte géologique au 1/50 000^e du bassin houiller des basses Cévennes (d'après Berger et al., 1978)

I.2.1. Le socle

Il est constitué par des terrains métamorphiques. A l’Ouest de la faille de Villefort, le socle est affleurant en formation cristallophylliennes et à l’Est, sous les formations carbonifères, il est constitué de micaschistes (Figure 125, Figure 126 et Figure 127). Le massif du Rouvergue, est constitué de socle affleurant, à l’Ouest de la Cuvette de Bessèges (Figure 3).

Nous classons les formations appartenant au socle soit en gneiss, soit en micaschistes.

I.2.2. Primaire

Les bassins houillers des Cévennes se trouvent dans un ‘triangle’ délimité par deux failles dites de Villefort à l’Ouest (d’orientation N155) et des Cévennes à l’Est (d’orientation N30-40). Le bassin houiller des Cévennes est constitué de trois cuvettes principales, du Sud au Nord : celle de Rochebelle, celle de la Grand’ Combe et celle de Bessèges (Figure 3), subdivisées en faisceau. (Wang ,1991). Un faisceau définit une alternance de couches stériles et de couches de charbon exploitables.

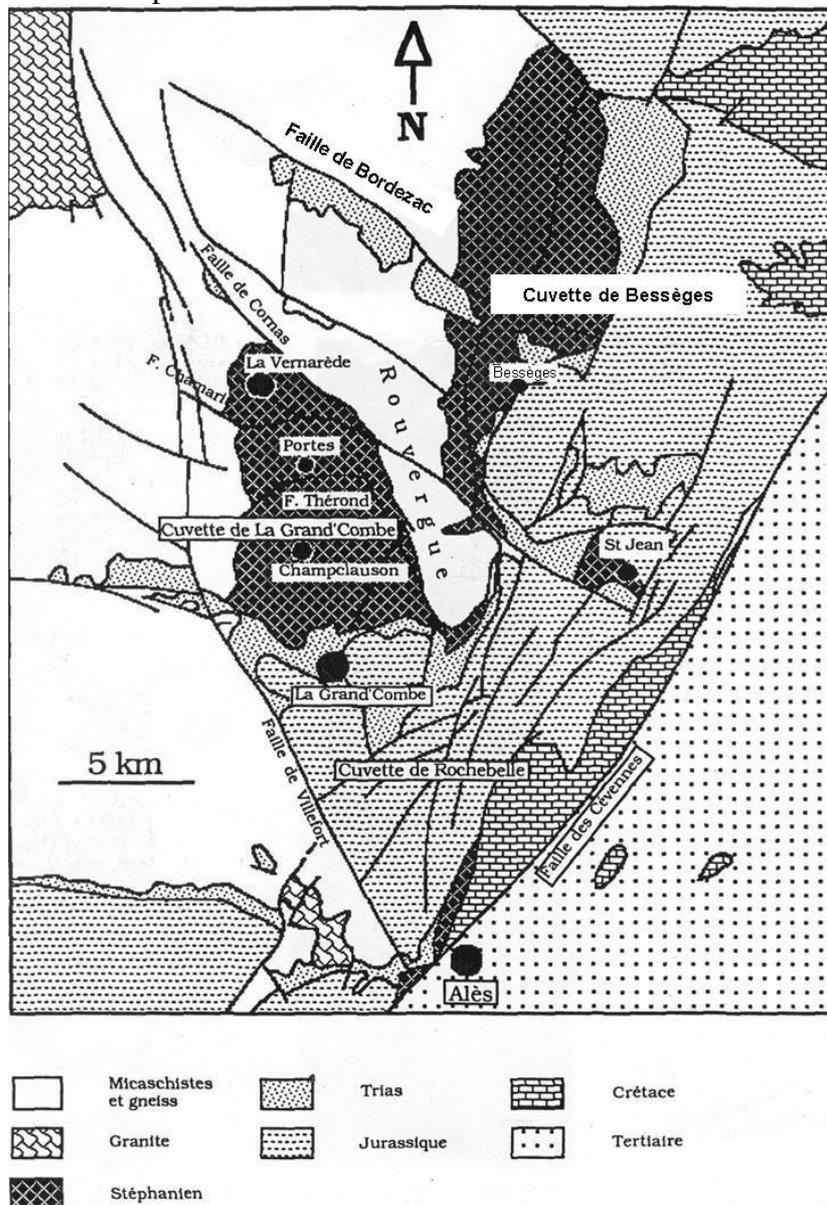


Figure 3 : Carte géologique synthétique de la région d'Alès (Wang, 1991)

La description détaillée de chaque cuvette (cuvette de la Grand' Combe, de Bessèges et de Rochebelle) apparaît en annexe 1. La complexité de la répartition des couches de charbon dans la zone étudiée est due à la tectonique qui est décrite en annexe 2.

- h_{5a}⁴ **h_{5a}⁴** : Carbonifère. Stéphanien inférieur.
- h_{5b}⁵ **h_{5b}⁵** : Carbonifère

Le bassin houiller des Cévennes est constitué de sédiments détritiques résultant de l'érosion des reliefs antéstéphanien. Des végétaux, tels que les prêles, les fougères géantes et autres types de plantes primitives, qui se sont accumulés en bordure de ces cuvettes de dépôts, sont à l'origine de l'apparition du charbon qui de ce fait est considéré comme une roche sédimentaire (Figure 4). Par intermittence, la végétation était détruite et recouverte par l'eau, lors d'évènements tectoniques entraînant des effondrements. Ce phénomène s'est répété créant ainsi des successions de couches charbonneuses.

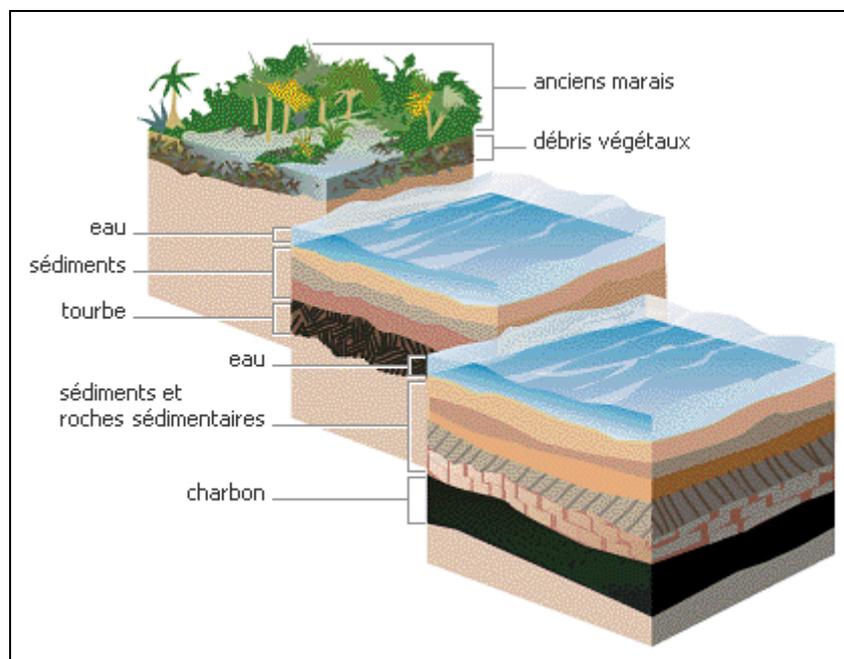


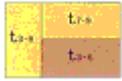
Figure 4 : Etape de la formation d'un charbon (site internet msn encarta)

I.2.3. Secondaire

I.2.3.1. Trias

La dénomination 'grès inférieur' représentant le trias inférieur rassemble des poudingues, des arkoses et des grès. D'après la carte géologique, il affleure au centre et à l'Est de la concession de St Martin de Valgalgues entre St-Jean du Pin au Sud et Tamaris au Nord.

- t₂ **t₂ Grès inférieur (Trias inférieur) – Poudingues, arkoses, grès** et marnes gréseuses à lits fins ferrugineux. En faciès lagunaire, les intercalations sont des anhydrites et du gypse. Ils reposent sur les grès, les schistes ou les granites ou le houiller. On peut l'observer sur les concessions de Rochebelle - St-Martin, à la Royale, près de Rochebelle et du Montaud. Les évaporites sont plus ou moins importantes dans ce secteur.



- **t₃₋₆ Muschelkalk – Lettenkohle** (8-27 m)

Le Muschelkalk est constitué de **calcaires dolomitiques** qui présentent dans le paysage des formes de corniches et de **marnes noires** rubanées. Il est peu visible à l’affleurement.



- **t₇₋₉ Keuper**

Il possède différents faciès selon les secteurs, soit lacustre soit de barrière avec des alternances de **marnes rouges et vertes**, de **dolomies gréseuses et de grès**.

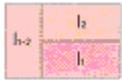


- **t₁₀ Rhétien** (5-30 m)

Le rhétien présente une alternance de différents faciès : **grès, marnes noires friables et calcaires lités**.

1.2.3.2. Lias

Sur les concessions de Rochebelle et St-Martin de Valgalgues, il représente la majorité des affleurements. Nous le retrouvons à l’Est et au Sud de la Grand’ Combe.



- **l₁ Hettangien inférieur** (10-15 m):

Il est constitué par des **calcaires noduleux** de couleur gris mat cendré qui se présentent sous forme de petits bancs décimétriques. Les interbancs sont remplis par des marnes gris clair. Sur notre zone d’étude, il affleure dans le quartier d’Alès dit « Faubourg de Rochebelle ».



- **l₂ Hettangien supérieur** (80-100 m)

Il s’agit d’une formation **dolomitique** massive et presque totalement azoïque. Les calcaires dolomitiques ou dolomie cubique ou encore dolomie capucin, se présentent sous forme de gros bancs métriques séparés par des lits fins d’argile.



- **l₃ Sinémurien inférieur** (30-60 m)

Cet étage est caractérisé par des calcaires argileux et noduleux de couleur gris bleu qui se trouvent en gros bancs à surface noduleuse et dont la cassure est bleutée. Ces bancs sont dissociés par des interlits de marnes sombres décimétriques.



- **l₄ Sinémurien supérieur** (40-60 m)

Nous sommes en présence de **calcaire bleu à chaille** donc très chargé en silice et qui forme des bancs réguliers séparés par de minces passées marneuses. En surface, nous retrouvons une altération superficielle qui donne des terrains rougeâtres où se développe une végétation silicicole.



- **l₅ Pliensbachien inférieur : Carixien** (10-40 m)

Calcaires gris bleu présentant un très bon litage et sont intercalés avec des marnes lorsque nous nous rapprochons du sommet. Nous retrouvons de nombreux restes de faune dont des ammonites et des bélemnites. Il apparaît sous forme d’affleurement réduit au Sud de Rochebelle-St Martin, au Nord de Malataverne et dans le secteur de Drulhes-Caroussède.

1.2.3.3. *Jurassique moyen*

-  **j_{8-j_{1a}}** *Toarcien supérieur – Aalénien – Bajocien inférieur*

La série **calcaréo-marneuse**, alternance de marnes et de calcaires gréseux, est difficilement dissociable d'un point de vue stratigraphique et présente plusieurs faciès. Il apparaît sous forme d'affleurement au Nord-Ouest de St-Martin de Valgalgues.

Bajocien supérieur-Bathonien inférieur

Il est représenté par un **calcaire à entroques** qui apparaissent sous forme de bancs épais de 0,5 à 2 m séparés par de fins lits de marnes. Il est souvent minéralisé dans le secteur de St-Martin de Valgalgues.

1.2.3.4. *Jurassique supérieur*

-  **j₅** *Oxfordien moyen* (18-33 m)

Il se compose de **calcaires grumeleux** avec de fines intercalations de marnes et peut être décomposé comme suit du bas vers le haut : tout d'abord, nous rencontrons un calcaire roux intercalé de marnes graveleuses et comprenant une faune abondante. Ensuite le calcaire devient grumeleux compact et les fossiles se raréfient. Enfin, au sommet, nous sommes en présence de calcaire argileux gris avec des marnes grumeleuses.

-  **j₆** *Oxfordien supérieur* (70-90 m)

Ce sont des **calcaires bruns** en bancs bien lités qui, vers le sommet, deviennent plus foncés et renferment des ammonites.

-  **j₇** *Kimméridgien inférieur* – (40-50 m)

Il est représenté par des **calcaires** légèrement **argileux** en bancs de 0,10 à 0,30 m et peu fossilifère.

-  **j₈** *Kimméridgien supérieur* (50-80 m)

Ce sont des **calcaires gris bleu** qui se trouvent sous forme de bancs épais de 1 à 2,5 m et qui sont pauvres en faune. Dans le paysage, ces calcaires forment des falaises qui délimitent des plateaux karstiques d'aspect ruiniforme.

-  **j₉** *Tithonique* (Portlandien) 20-30 m

Ce sont des **calcaires massifs** gris clair peu fossilifères. D'après Gras (1970), ces calcaires sont d'une cinquantaine de mètre, marneux et à tendance bréchique à la base avec des rognons de silex.

1.2.3.5. *Crétacé inférieur*

Il se développe surtout dans le compartiment entre la faille de la Nougardède et celle des Cévennes, dans notre zone d'étude.

-  **n₁** *Berriasien* (30 m)

Représenté par des **calcaires gris argileux** noduleux, le berriasien se trouve sous forme de gros bancs noduleux et parfois quelques interlits de marnes. Macrofaune, microfaune et microflore sont présentes.

-  **n₂ Valanginien** (100 à 1000 m)

Il est caractérisé par des **marnes grises** à intercalations de calcaire à bioclaste. En partie inférieure, se trouvent des marnes grises feuilletées à ammonites pyriteuses.

A Caussonille (Est de notre zone d'étude), on observe des intercalations de gros bancs de calcaire jaune roussâtre bioclastique. Vers le sommet de l'étage, s'intercalent des calcaires gris argileux. On peut aussi l'observer au Nord de la Royale.

-  **n_{3a} Hauterivien inférieur** (100 à 150 m)

Ces **calcaires argileux** grisâtres avec des interlits de marnes feuilletées contiennent des ammonites, microplanctons, spores et pollens.

-  **n_{3b} Hauterivien supérieur**

Il se présente sous la forme d'un **calcaire compact** ou de marnes noduleuses. Dans notre zone d'étude entre Alès et Rousson c'est-à-dire au niveau de la bordure occidentale du fossé tertiaire, l'Hauterivien est constitué par des marnes grises et des calcaires argileux. Au sommet de cet étage s'est formé un 'hardground' traduisant une lacune dans la sédimentation. Le microplancton est abondant.

-  **n_{4u}, n_{4b} Barrémien**

A l'Est de notre zone d'étude, on trouve, à la base du barrémien, des marnes et en partie sommitale les **calcaires urgoniens** sont en contact direct avec l'Hauterivien. Il est observable à proximité du faubourg de Rochebelle. Ces calcaires peuvent avoir une pureté de 99,5 % de CaCO₃ et ils contiennent des polypiers, des rhynchonelles, térébratules et rudistes.

I.2.4. Tertiaire

Il est présent dans la plaine d'Alès.

-  **e₁₋₄ Paléocène-Eocène inférieur** (15-20 m)

Ils sont composés de **sables, grès et argiles** bigarrés d'origine fluvio-lacustre. Dans les argiles abonde la montmorillonite et sont présentes de la kaolinite et des traces d'illite.

-  **e₅ Eocène moyen : Lutétien** (3-5 m)

Il est constitué par des calcaires lacustres dits 'd'Aigalier' légèrement argileux. Ils contiennent *Planorbis pseudoammonius*, *Strophosotoma lopicida* et *Limnaea michelini*.

-  **e₆ Bartonien inférieur (Auversien) et moyen (Marinésien)** (80-100 m)

Sa lithologie est constituée par des **sables argileux, marnes à intercalations** de grès et de conglomérats.

-  **e_{7a} Ludien inférieur (Sannoisien inférieur)** (30 m)

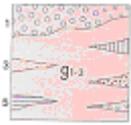
Il est représenté par des **calcaires en plaquettes** et des **marnes feuilletées** d'origine lacustre ou lagunaire.



- **e_{7b} Ludien supérieur** (Sannoisien supérieur)

Il est représenté par deux types lithologiques différents selon où se situe le point d'observation :

- les grès de Celas (0-60 m)
- **Calcaires bitumineux et marnes feuilletées** (30-50 m), à l'Est de Celas.



- **g₁₋₃ Stampien et oligocène supérieur**

Il est représenté par une série de **marnes et de grès et des conglomérats**.

I.2.5. Quaternaire

A proximité des travaux miniers, il apparaît sous deux formes :

- **F_x** : Alluvions probablement rissiennes se situant en rive gauche de la vallée de l'Auzonnet et dont l'épaisseur est de 3-4 mètres.
- **F_z** : Les alluvions récentes d'âge holocène sont des galets, des graviers, des sables et des limons et se retrouvent dans le lit du Gardon d'Alès et d'un de ses affluents, le Galeizon, et de l'Auzonnet.

I.2.6. Conclusion sur la géologie de la zone étudiée

La Figure 5 reprend de manière plus synthétique la proportion de recouvrement selon les différents types de terrains sur la zone d'étude.

Les terrains du Lias (28%) et du carbonifère (23%) représentent la plus forte proportion sur la zone et les dolomies de l'Hettangien représentent 17%. Les trois types de terrains dominant sont susceptibles de laisser circuler de l'eau suite à des phénomènes de karstification pour les calcaires et les dolomies et par l'intermédiaire des travaux miniers dans les exploitations de houille.

Le trias représente 11% de la surface de la zone mais a une forte influence sur la qualité des eaux comme nous le verrons dans le chapitre II.

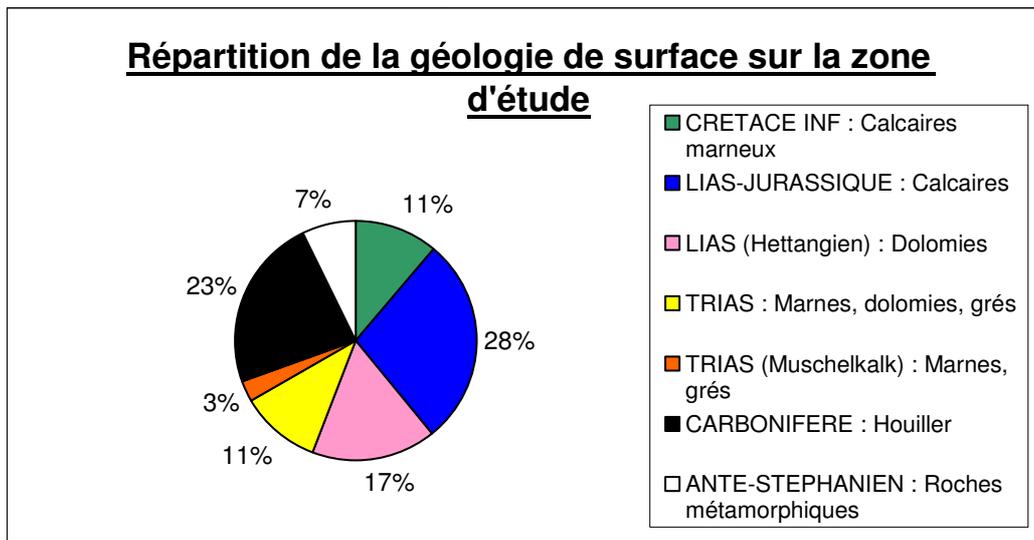


Figure 5 : Répartition de la géologie de surface dans la zone d'étude

I.3. LES MINERAIS DANS LA ZONE D'ETUDE

La qualité de l'eau d'émergence de mine de charbon dans la zone d'étude dépend bien sûr de la constitution minéralogique des couches fournissant le charbon; cette qualité est aussi influencée par les terrains situés au-dessus des exploitations de houille, ainsi que par les exploitations dans les terrains sus-jacents. La description qui suit traite des différents gîtes minéraux, exploités ou non, autres que le charbon, repérés sur la zone d'étude (Berger et al., 1978 ; site internet J-P Rolley). Leur situation géographique apparaît sur la Figure 6 et leur positionnement sur un log géologique dans la Figure 7.

I.3.1. Types de minerais

Le **zinc** se trouve sous forme d'amas à St Jean du Pin (au Sud de notre zone d'étude) et à l'Espinette. Le minerai de zinc est présent sous forme sulfurée (blende) et sous forme oxydée (calamine : $ZnCO_3$) cimentant les éléments bréchiques et recouvre le conglomérat inférieur du Trias (BRGM, 1994).

A St Félix (Sud-Ouest de St Martin de Valgalgues) se trouvait une exploitation de pyrite blendeuse dans les dolomies de l'Hettangien comme à La Coste (extrémité Sud de la zone d'étude), le Mas Dieu (SE de la Grand' Combe) et les Ribots.

Les formations contenant du zinc sont aussi présentes à la Roque dans les dolomies infraliasiques (Nord-Ouest de St Julien les Rosiers), près du Mas des Coudounels à la base des calcaires à entroques du Bajocien (Nord-Ouest de St Julien les Rosiers), à Font du Roure (Ouest de Pont d'Avène) et Landas dans les calcaires à entroques du Bajocien supérieur (Ouest de Pont d'Avène) et la Gardie (Ouest de Pont d'Avène).

L'exploitation du **plomb** est connue à Carnoulès depuis le X^{IV}e siècle et arrêtée dans les années 1960. Nous le trouvons dans la galène souvent oxydée et aussi en présence de pyrite ; l'ensemble contenu dans l'arkose à la base du Trias.

Le **fer**, dans la zone d'étude, est présent sous forme de Limonite. La dolomie de l'Hettangien en contient dans des chapeaux de fer à Vallat Pellet, Cassagnette, Mas Vacher, Panissière, la Bastide, les Peyrouses, les Ribots, le Vallat de Maraval, les Pastrous, le Valat de Couze et dans le calcaire bajocien supérieur de la Minette.

La **pyrite** provient du Vallat Pellet, du mas Vacher, de Panissière, des Ribots, des Pastrous, de la Minette mais, contrairement au fer, l'exploitation du gisement se fait en dessous du niveau hydrostatique.

Les amas Nord et Sud du Soulié dans la dolomie hettangienne ont aussi été exploités de 1922 à 1957.

L'**or** sous forme de paillette est présent en amont de St-Ambroix dans les alluvions de la Cèze et en aval d'Alès dans les alluvions du Gardon.

La **barytine** est présente à Notre Dame de Laval (à l'Est de la Grand' Combe), au Mas Dieu et à Mercoirol. Elle se trouve dans les terrains du Trias moyen et inférieur (dans les arkoses). Des incrustations de pyrite, marcassite, galène, stibine, semseyite, bournonite, cuivre gris affectent parfois les dépôts barytiques.

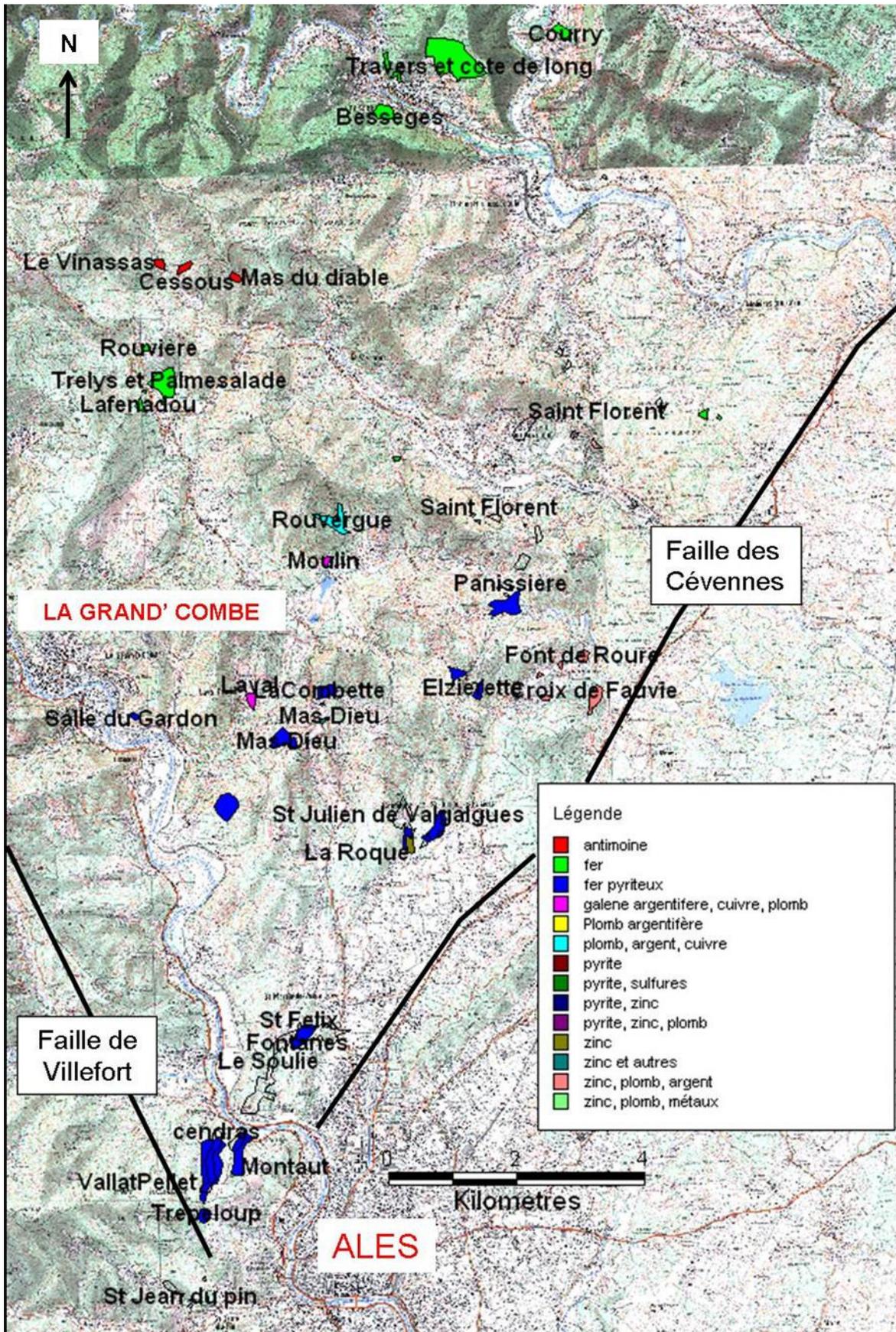


Figure 6 : Représentation des zones répertoriées signalant la présence de minerai autre que le charbon (inspiré de BRGM, 1994 et carte IGN)

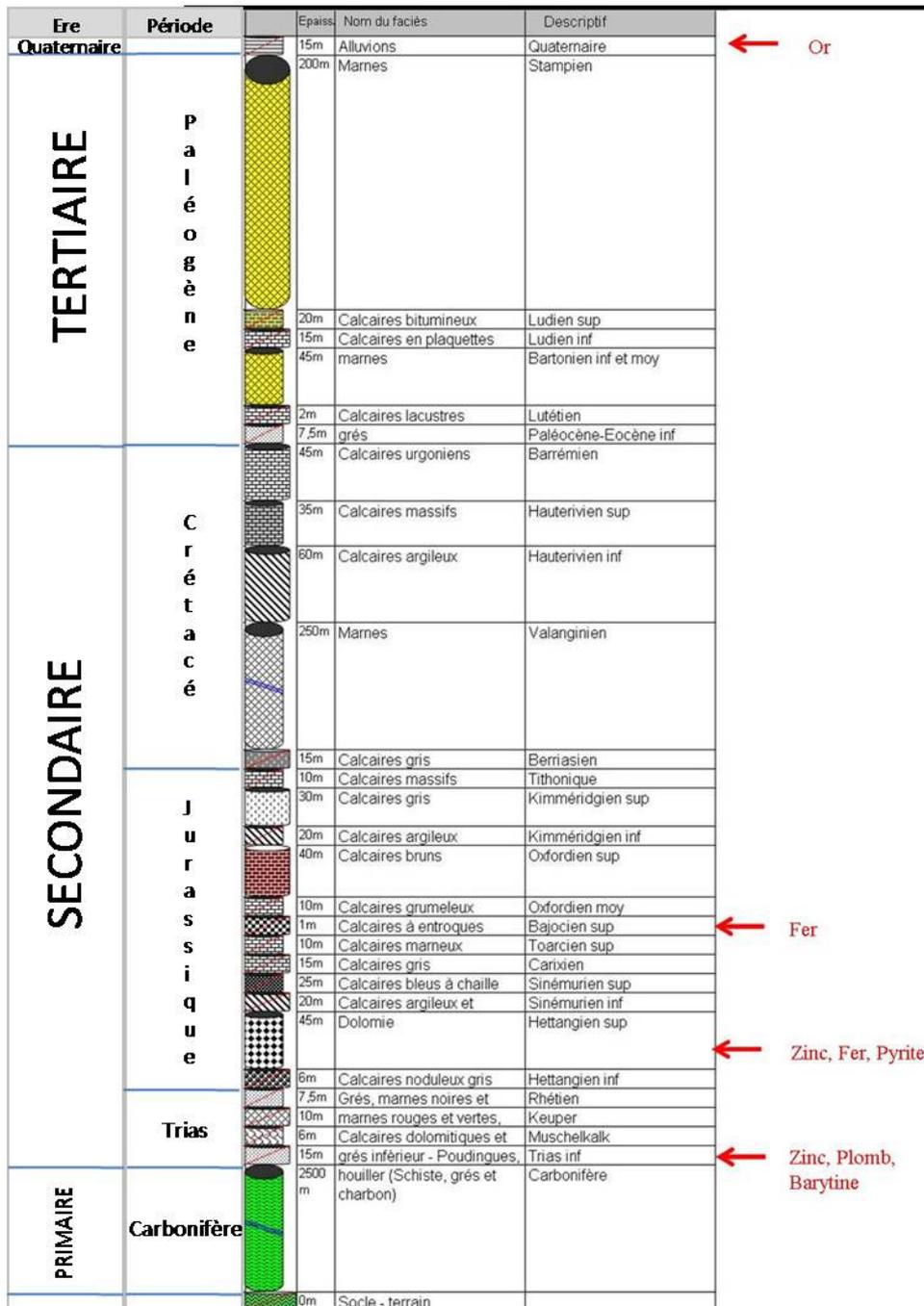


Figure 7 : Log géologique représentant les minerais de la zone d'étude

I.3.2. Les mines métalliques sur les concessions de Rochebelle et Saint-Martin de Valgalgues

Parmi les anciennes exploitations métalliques de la zone, celle des concessions de Rochebelle - St Martin de Valgalgues (St-Félix, Le Soulié, Cendras, Fontanes, Montaut, Trepeloup et Vallat Pellet au Sud de la Figure 6), au Sud du périmètre étudié (Figure 8), vont être plus détaillées. Ces anciennes mines métalliques sont les plus importantes, en volume extrait, de la zone étudiée et donc susceptible d'avoir un impact plus important sur la qualité des eaux du réservoir minier de charbon à proximité (Rochebelle – St-Martin). Nous proposons plus de détail sur la zone de St-Martin de Valgalgues car les analyses d'eau d'émergence de mine de charbon sont aussi plus abondantes dans cette zone et appelle donc plus de questions.

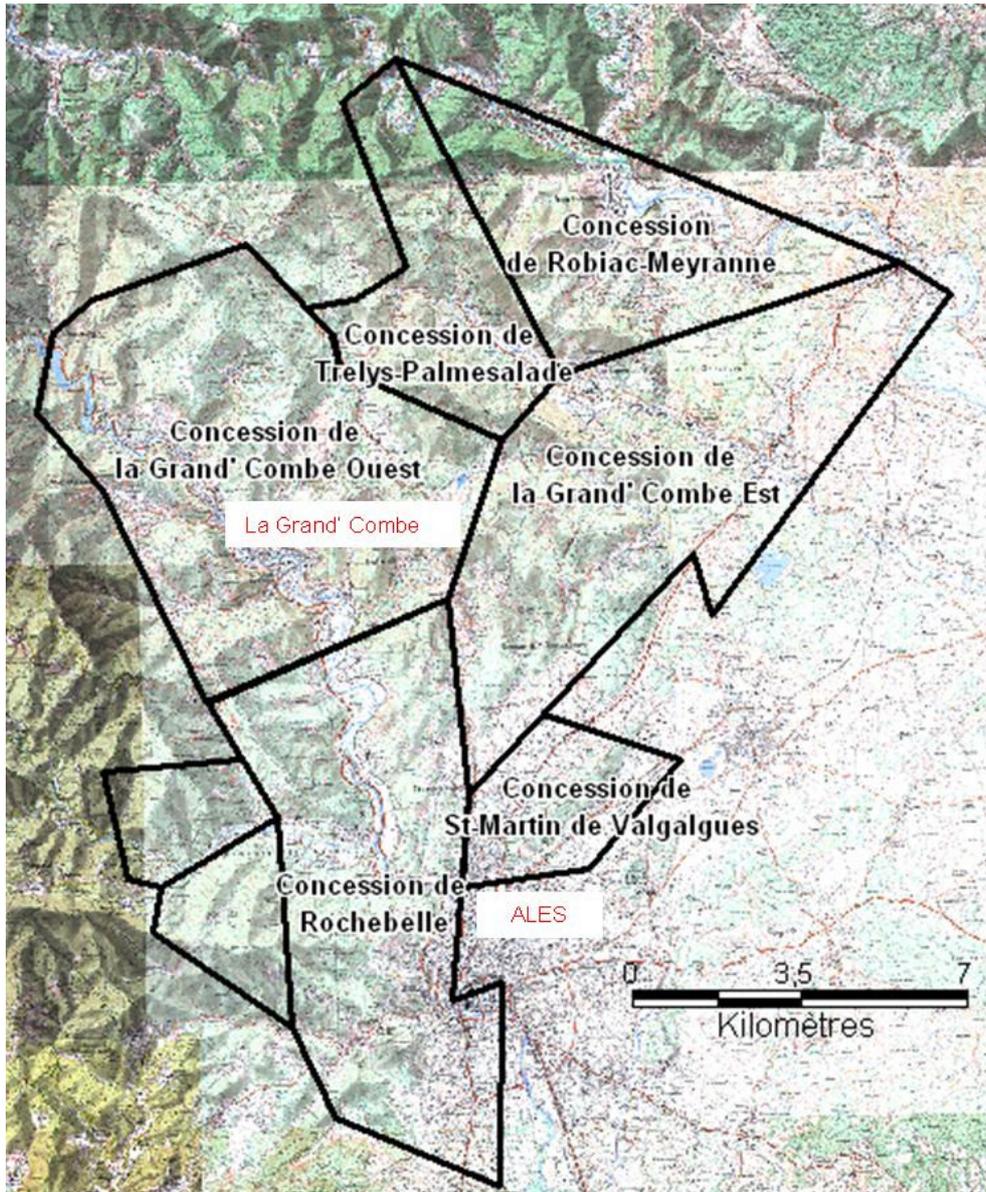


Figure 8 : Localisation des concessions de charbon de la zone d'étude (carte IGN)

I.3.2.1. Origine des minéralisations

Elles sont le résultat de dépôts induits par des circulations de fluides hydrothermaux provenant d'un pluton intrusif (origine métasomatique). L'ensemble de ces exploitations sont localisées sur la Figure 9.

I.3.2.1.1. Au Stéphanién

Elles sont constituées par :

- des minéralisations stratiformes et filoniennes de sidérite (FeCO_3)
- des dépôts de pyrite (FeS_2) avec la formation du charbon.

I.3.2.1.2. Au Trias

L'origine des minéralisations triasiques est hydrothermale avec la présence de fer, zinc, plomb, baryum.

Des dépôts de minéraux salifères sont aussi présents à cette époque (anhydrite, gypse,..)

I.3.2.1.3. Au Lias

Des minéralisations oxydées qui étaient des minéralisations sulfurées primaires sont complètement altérées et mobilisées. On trouve des amas irréguliers, de blende et de pyrite, encaissés dans les dolomies. Les oxydes sont le résultat de l'altération de la pyrite par les précipitations. Une estimation propose un volume de pyrite disponible de cinq millions de tonnes dans le Nord d'Alès (BRGM, 1994).

Il faut retenir de ces observations que la couverture secondaire à proximité des travaux miniers de St-Martin de Valgalgues est riche en éléments solubles métalliques.

I.3.2.2. Descriptifs des mines métalliques

Les différentes exploitations de minéralisations métalliques ont été rassemblées dans le Tableau 1 avec leur période d'instauration et de renonciation, le type de minéralisations exploitées, le contexte géologique lors de la formation des minéralisations, le type de travaux et la quantité de minerai qui a été extraite de l'exploitation. L'avant dernière colonne de ce tableau précise si les mines métalliques sont en relation avec les exploitations de charbon et si les exutoires de mines métalliques sont connus ou supposés. Leur localisation est observable sur la Figure 9.

Tableau 1 : Synthèse de l'état des mines métalliques (Cesame, 2006) page suivante

Nom de l'exploitation	Période instauration-renonciation	Minéralisations exploitées	Contexte géologique pour les minéralisations	Types de travaux	Quantité extraite	Liaison avec les mines de charbons	Etat hydrogéologique
Saint-Félix	1856-1991	Sulfurées (pyrite, blende)	Remplissage de la faille des Cévennes, au contact Trias-Lias	Exploitation souterraine sur plusieurs niveaux (entre +200 et + 128,5 m NGF) et petites exploitations à ciel ouvert	75 000 t de pyrite, blende et pyrite blendeuse	Travaux miniers de charbon à l'aplomb de St Félix mais séparation par un stérile de 200 m.	Deux galeries d'écoulements à 172 et 166 m donc travaux en partie noyés
Soulié Nord	1856-1991	Pyrite, zinc, plomb	Amas irréguliers dans les calcaires et les dolomies – sous forme de chapeaux de fer (limonite ou calamite)	Souterrains entre + 128,5 m NGF et + 179,5-150 NGF	-	Mines de charbon éloignées mais liaison possible avec les travaux de St Félix	Aucun exutoire connu mais liaison possible avec ceux de St Félix
Soulié Sud		Pyrite (amas irréguliers) Calamine (mines découvertes)	Dans les calcaires et dolomies	Souterrains puis reprises en découvertes	1 million de tonnes dont 700 000 t de pyrite	A priori non	Découvertes remblayées. Ecoulement vers le Gardon à + 141 m NGF possible mais non connus.

Nom de l'exploitation	Période instauration-renonciation	Minéralisations exploitées	Contexte géologique pour les minéralisations	Types de travaux	Quantité extraite	Liaison avec les mines de charbons	Etat hydrogéologique
Espinette (ou vallon Lacombe)	-	-	Lié à la faille des Cévennes – Substitution des minéralisations aux dolomies	Galerie principale dans le vallon de Lacombe et dans un 2 nd vallon (Vallat Pellet)	-	Mines du vallon de Lacombe isolées – Mine de l'Espinette : liaison de 400 m possible via la fracturation des terrains triasiques ?	Emergences débouchant par des galeries au nouveau du Gardon
Vallat-Pellet	-	Pyrite en substitution dans la dolomie hettangienne (BRGM, 1994)	-	Plusieurs petites mines : Martin Roucante, Cabane	323 638 tonnes ont été extraites entre 1913 et 1930.	En dehors de l'emprise des travaux de charbon	Petits réservoirs isolés drainés par les anciennes galeries d'accès – Mines plus hautes que le réservoir minier
Trépeloup	-	-	-	Travaux au-dessus de la cote 190 m NGF.		Mine au Sud du Vallat Pellet – A l'aplomb de l'emprise des travaux de charbons	-
Montaud (Vallon Lacombe)	-	Pyrite de substitution de la dolomie	-	Souterrains partant du vallon Lacombe en direction du Sud		En limite de l'emprise des travaux miniers – Liaison possible par fracturation mais 250 à 300 m de stériles	Drainage par le vallon Lacombe ou par les travaux miniers via la fracturation
Saint Jean du Pin – Saint Raby	1856-1996	2 niveaux pyriteux (marcassite et pyrite puis pyrite et blende)	-	-	2000 t de pyrite	En dehors de l'emprise des travaux miniers	-

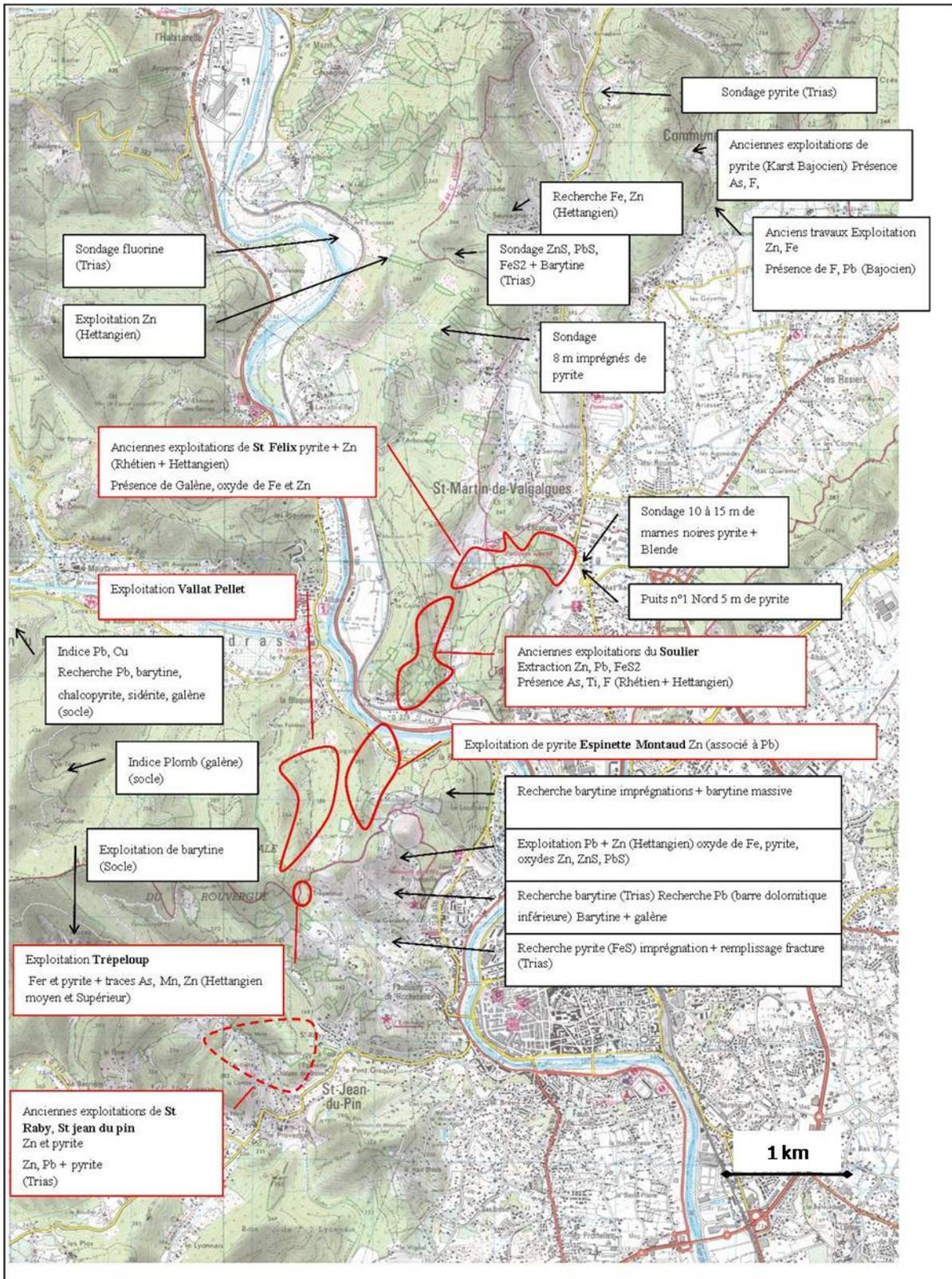


Figure 9 : Localisation des anciennes exploitations de minerais (carte IGN et CESAME, 2006)

Nous constatons que toutes les mines métalliques se trouvent au dessus de la cote 120 m NGF (niveau piézométrique maintenu dans le réservoir minier de charbon de Rochebelle-St-Martin). Aucune communication entre mines métalliques et mines de charbons n'a été mise en évidence. Il n'a donc pas été prouvé que le réservoir minier des charbons soit contaminé par celui des mines métalliques.

I.4. FOND GEOCHIMIQUE

Après avoir déterminé les sources possibles de perturbation de la chimie des eaux de mines de charbon par la présence d'autres gîtes minéraux, nous allons détailler le fond géochimique général selon le type de terrain rencontré dans la zone étudiée en le comparant à d'autres exemples en France et en apportant des précisions sur la zone d'étude.

La zone d'étude se définit par un recouvrement de surface dont la géologie est variable comme le montre la Figure 10. Les lithologies en présence sont en proportions différentes (Figure 5) avec une dominance du calcaire, des charbons et des schistes. Chaque lithologie en contact avec les eaux souterraines et de surfaces modifie leur composition. Regardons dans un premier temps chaque résultat d'interaction d'une roche avec une eau et la composition de l'eau produite à l'échelle nationale et locale.

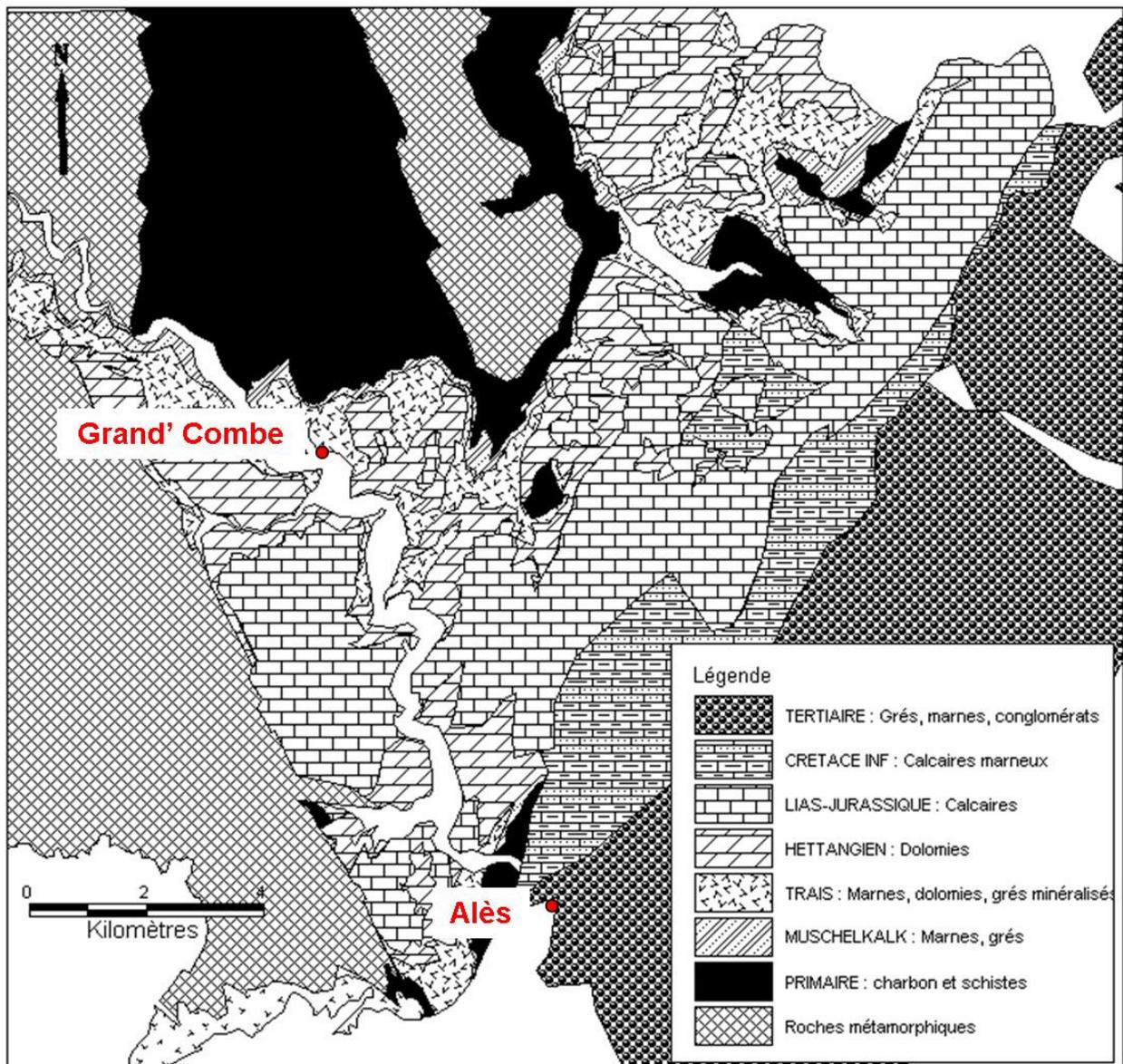


Figure 10 : Lithostratigraphie simplifiée de la zone d'étude

I.4.1. Influence de la lithologie sur la composition des eaux souterraines et de surface

Pour chaque lithologie le contact eau/roche va influencer la composition de l'eau de manière plus ou moins marquée selon le type d'interaction, les débits concernés et la nature des roches.

I.4.1.1. Influence des calcaires (28%) et dolomies (17%)

Les terrains calcaires et dolomitiques du Lias et Jurassique recouvrent environ 28% de la zone d'étude (Figure 5). Une étude de la moyenne considérant 64 échantillons en France (Barbier et al., 2001) propose les valeurs suivantes pour la composition des eaux souterraines influencées par ce type de fond géochimique (Tableau 2).

Tableau 2 : Concentrations moyennes en éléments majeurs (mg/l) dans les aquifères calcaires libres à plus de 100 km de la côte (Barbier et al., 2001) et les aquifères dolomitiques d'après Schoeller (1962)

	Aquifères calcaires (Barbier et al., 2001)		Aquifères dolomitiques (Schoeller, 1962)	
	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
pH	7,3	8	-	-
Ca ²⁺	97	194,5	87	114,7
Mg ²⁺	13,2	44,2	33,6	58,5
Na ⁺	3,3	15,8	-	-
K ⁺	1,0	3,9	-	-
HCO ₃ ²⁻	297,5	429,4	-	-
Cl ⁻	10,2	38	15,3	31,9
SO ₄ ²⁻	28,1	390,3	71,6	141
SiO ₂	7,1	17,4	5,75	10
Nb Obs	64	64	3	3

Pour les aquifères de nature dolomitique, les eaux présenteront des teneurs plus élevées en Mg²⁺ avec 20 à 40 mg/l de plus que les eaux des aquifères calcaires. (Petelet, 1998 ; Plagnes, 1997). Ces observations sont confortées par des mesures réalisées par Schoeller (1962).

I.4.1.2. Influence des zones de socle (7%)

A l'intérieur des limites de la zone d'étude, principalement à l'Ouest, 7% de roches affleurantes sont du socle. Certains cours d'eau comme le Gardon (Figure 10), prennent naissance dans cette partie ouest de la zone d'étude où le socle affleure. Dans la région, il est constitué de schistes, micaschistes et gneiss. Aux alentours d'Alès, le socle est en contact avec les terrains du carbonifère d'où une interaction possible entre les eaux de mines et le socle par l'intermédiaire du creusement des galeries et des puits.

I.4.1.2.1. Eaux souterraines

Pour les schistes, les eaux de l'aquifère vont circuler très lentement du fait de la faible perméabilité de cette roche et les interactions eau/roche se dérouleront sur une période assez longue (Tableau 3).

Tableau 3 : Concentrations moyennes des eaux souterraines françaises en éléments majeurs dans les micaschistes, gneiss et schistes (Barbier et al., 2001 et Blum et al., 2001)

	Micaschistes		Gneiss		Schistes	
	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
pH	6,2	7,3	6,0	6,5	6,5	7,3
Ca²⁺	3,6	12,4	5,7	19,2	27,4	71,8
Mg⁺	1,3	4,0	1,9	5,4	6,5	11,5
Na⁺	3,8	7,2	6,0	13,4	14,6	28,4
K⁺	1,1	1,9	0,8	1,4	1,4	2,7
HCO₃⁻	15,7	60,7	23,2	80,4	110,5	281,4
Cl⁻	3,4	5,9	5,7	10,6	19,7	34
SO₄²⁻	1,9	5,3	3,6	8,9	15,3	20
SiO₂	15,1	29,6	20,8	43,4	15,9	20
Σ ions majeurs	30,8	97,4	46,9	139,3	195,4	449,8
Nb obs	7	7	7	7	3	3

Tableau 4 : Teneurs en éléments chimiques d'eau circulant dans des schistes (mg/l), les terrains gypseux et les granito-gneiss d'après Schoeller (1962) et Derron (2004)

	Schistes		Terrains gypseux		Gypse dolomitique	Granito-gneiss
	Schoeller	Schoeller	Schoeller	Schoeller	Derron	Derron
	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum	Moyenne	
Fe²⁺	7,25	11	-	-	0,03	0,032
Ca²⁺	51,50	68	587,2	914	444,5	12
Mg²⁺	16,1	16,2	214	724	56,9	0,6
K⁺	1,4	1,4	641	1206	-	1,2
Na⁺	23,7	44	-	-	5	1,8
Cl⁻	29,9	57	31427,50	150 060	3,6	0,4
SO₄²⁻	20,6	25,3	2019,4	5248	1110	9,6
CO₃⁻	114,5	143	265	508	-	-
Mn²⁺	-	-	-	-	0,013	0,001
Nb obs	2	2	5	5	98	207

D'après Schoeller (1962), (Tableau 4), les eaux circulant dans des schistes oscillent entre le pôle calcique et sodique comme le confirme le Tableau 3. Cependant, nous ne connaissons pas l'origine exacte des schistes utilisés dans ce tableau et leur composition peut être différente de ceux de la zone étudiée.

I.4.1.2.2. Eaux de surfaces

Les concentrations en Na⁺ et Ca²⁺ sont différentes entre le Tableau 4 et le Tableau 5. L'ordre de grandeur de la concentration en Ca⁺ passe de 51,50 à 3,85 mg/l au maximum entre le Tableau 4 et le Tableau 5 et celle de Na⁺ de 23,7 à 3,10 mg/l. Les eaux souterraines en contact avec des schistes (Tableau 3 et Tableau 4) sont plus chargées que les eaux de surface circulant sur des schistes (Tableau 5).

Tableau 5 : Composition des eaux de ruisseaux des Cévennes en contact avec des schistes et des schistes à houille en mg/l (d'après Meybeck, 1986)

Site	La Mimente	Le Dourdon	Ruisseau des Portes	Ruisseau Doulovy
Nature	Schistes des Cévennes	Schistes des Cévennes	Schistes à houille	Schistes à houille
Ca²⁺	2,50	3,85	26,49	14,01
Mg²⁺	1,77	2,83	26,29	22,59
Na⁺	2,16	3,10	25,11	11,40
K⁺	0,47	0,51	2,97	2,31
Cl⁻	1,31	2,59	3,16	4,64
SO₄²⁻	6,82	8,02	58,94	50,24
HCO₃⁻	13,73	22,03	185,43	108,37
Nb obs	1	1	1	1

Les eaux circulant sur les schistes à houille, situés dans les zones d'anciennes mines de charbon, sont plus minéralisées que les schistes des Cévennes, en particulier, ils présentent des teneurs plus importantes en sulfates, attribuées à la présence de minéraux pyriteux mais ont des concentrations inférieures aux eaux souterraines en Ca⁺ et Na⁺.

1.4.1.3. Influence des terrains salifères

Les terrains triasiques de la région peuvent contenir des roches salifères. En présence de ce type de terrains, l'eau se charge rapidement en chlorures et en CaSO₄. Lorsque des eaux souterraines sont en contact avec ces terrains, les teneurs en SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg², Na⁺ peuvent être très élevées. (Schoeller, 1962) (Tableau 4)

1.4.1.4. Influence des charbons

Dans le but de mieux situer notre étude par rapport à d'autres exploitations de houille envoyées en France, une synthèse (Tableau 6) présente la composition chimique moyenne des eaux souterraines en contact avec les charbons en France. La minéralisation est variable à très variable selon les sites et selon les éléments.

I.4.1.4.1. Eaux souterraines

Tableau 6 : Exemples de compositions des eaux en contact avec des charbons en France en mg/l

	Charbon		Fendue Lyon (42)	La Roare (42)	Les Rieux (42)	Decazeville (12)	Messeix (63)	Alès – Fontanes (30)	Faulquemont (57)
	Schoeller, 1962		Cesame	Cesame	Cesame	BRGM*	Cesame	Cesame	Cesame
	Moy.	Max	stabilisé	stabilisé	stabilisé	moyenne	stabilisé	stabilisé	Après 11 ans
Fe²⁺	0,9	1,8	30-35	18	4,5	47,45	15	35	7,2
Ca²⁺	40	82	250	200	420	204,60	70	400	108,5
Mg²⁺	16	32	150	120	170	293,09	35	200	108,7
K⁺	-	-	15	10	12	33,36	10	50	46,6
Na⁺	191	322	150	100	350	80,64	35	800	308,4
Cl⁻	40,1	92	50	40	50	16,49	6	100	324,9
SO₄²⁻	76	164	1000	600	2000	1493,33	100	2400	326
CO₃⁻	244,5	255	-	-	-	374,97-HCO ₃	-	-	-
Mn²⁺	0,32	0,32	5	2,5	8	1,17	2	5	0,8
Nb obs	3	-	-	-	-	-	-	-	-

* Guerangué et al., 2000

I.4.1.4.2. Eaux de surface

D’après Meybeck (1986), les eaux de surface en contact avec des schistes à houille présentent une composition particulière caractérisée par des teneurs faible en calcium et des valeurs élevées en sulfates provenant de l’oxydation de composés soufrés réduits (Tableau 5).

I.4.1.5. Synthèse

La zone étudiée étant constituée d’une lithologie variée, chaque composition des eaux souterraines et de surface pourra être influencée par le fond géochimique. En moyenne, en France, les eaux souterraines peuvent être décrites par le Tableau 7.

I.4.1.5.1. Eaux souterraines

(1) En France

Tableau 7 : Composition chimique moyenne des eaux souterraines établie par analyse statistique en mg/l (Blum et al., 2001)

	N _{obs}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂
Calcaires	201	105,4	8,5	2,8	1,0	11,7	17,8	305	6,8
Gneiss	7	2,8	1,5	4	1	4,2	3	9,6	19,3
Grès	87	36,2	11,2	3,3	2,4	6,4	19,6	182,9	7,2
Micaschiste	7	2,4	1	2,8	1	3	0,8	7,9	12,8
Schiste	6	8,3	4,6	11,6	1,6	14,5	19	29,9	16

(2) Sur la zone d’étude

Chaque région a ses spécificités qui font que les mesures de terrain sont plus ou moins proches de la moyenne nationale. Plusieurs forages et captages notamment pour l’eau potable peuvent donner un ordre d’idée de la composition des eaux souterraines en contact avec les

calcaires et les dolomies puisque les aquifères décrits ci-dessous se développent dans ces terrains (Tableau 8).

Tableau 8 : Analyses moyennes de la qualité des eaux souterraines à proximité du Gardon d'Alès (source Cesame)

Nom station	Géologie	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Fe
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µg/l
Puits du stade de l'abbaye Cendras (09126X0095/HBC)	Calcaire et dolomie	12,3	4,44	3,02	0,46	3,98	12,04	52,18	32,02
Les Plantiers (09126X0198/FE1)	Calcaire et dolomie	60,15	19,22	23,52	1,94	9,3	137,61	143,41	53,63
Source de la Tour (09126X0101/S)	Dolomie	48	15,7	17,4	1,8	9,3	104	120	25
Paillères (09121X0045/PAILL)	Dolomie	65	13	9,2	0,5	6	47	220	10

I.4.1.5.2. Eaux de surface

(1) En France

Pour les eaux de surface, nous pouvons retenir le Tableau 9 comme référence de la moyenne nationale.

Tableau 9 : Composition chimique des eaux de surface drainant de petits bassins versants français (Meybeck, 1984)

	Nobs	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₂
		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Roches plutoniques et métamorphiques	30	0,96	0,53	1,91	0,36	-	1,8	9	9
Roches détritiques carbonatées et calcaires	60	64,6	3,2	0,82	0,41	-	4,26	213,3	6,4
Evaporites	6	248	84	13,8	1,56	21,3	720	268	8

(3) Sur la zone d'étude

La composition des eaux de rivières de la zone d'étude ne sont pas caractéristiques d'un type de lithologie mais le résultat de l'influence de plusieurs roches chimiquement différentes mais aussi de pollutions éventuelles d'origine anthropiques comme le montrent les valeurs obtenues dans les cours d'eau de la zone (Tableau 10).

Tableau 10 : Moyenne de la qualité des eaux du Gardon d'Alès et de ses affluents entre 1996 et 2006 (source Cesame)

Site de prélèvement	Ca²⁺	Mg²⁺	Na⁺	K⁺	Cl⁻	SO₄²⁻	HCO₃⁻	Fe²⁺
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Fraissinet (Gardon)	13,43	4,32	4,12	-	3,45	18,36	41,22	0,21
Amont ruisseau Sans-nom (Gardon)	-	-	-	-	-	21,40	-	-
Aval confluence Lascous (Gardon)	155,48	92,59	63,40	-	9,34	648,22	275,67	0,08
Aval confluence avec Ruisseau Bellières (Gardon)	-	-	-	-	-	66	-	0,05
Cendras (Gardon)	57,07	20,4	26,61	-	9,6	129,8	154,42	-
En moyenne sur l'ensemble des mesures disponibles pour le Gardon	59,51	29,18	24,13	-	6,9	132,9	131,34	0,14

I.4.2. Les éléments particuliers

Nous allons, dans ce paragraphe, détailler l'ion chlorure et l'arsenic car ils ne sont pas décrits dans le fond géochimique bien qu'ils apparaissent en fortes concentrations dans certaines émergences étudiées.

D'après Blum et al. (2006), certaines minéralisations sont associées à la présence des accidents cévenols (partie sud du massif central). Les éléments traces, dans les eaux naturelles, liés au fond géochimique trouvent leur origine dans les zones filoniennes (d'origine tectonique) plutôt que par dissémination des minéraux dans la lithologie. La répartition spatiale des zones présentant un fond géochimique élevé est délicate à documenter.

I.4.2.1. L'ion chlorure

La proximité de la mer joue un rôle sur la composition chimique des précipitations en chlorure (Blum et al, 2001) qui vont par la suite s'infiltrer, entre autre, dans notre aquifère minier.

La teneur en chlorure des eaux de pluie varie selon la distance entre la mer et la zone considérée. Le nombre de points mesurés dans la région est assez faible mais on peut avancer que la moyenne du secteur est comprise entre 1 et 2 mg/l (Figure 11). L'influence de la mer sur la composition des eaux de pluie se fait sentir jusqu'à 100 km vers l'intérieur des terres ce qui est le cas pour notre zone d'étude (distance entre la mer et Alès environ 80 km).

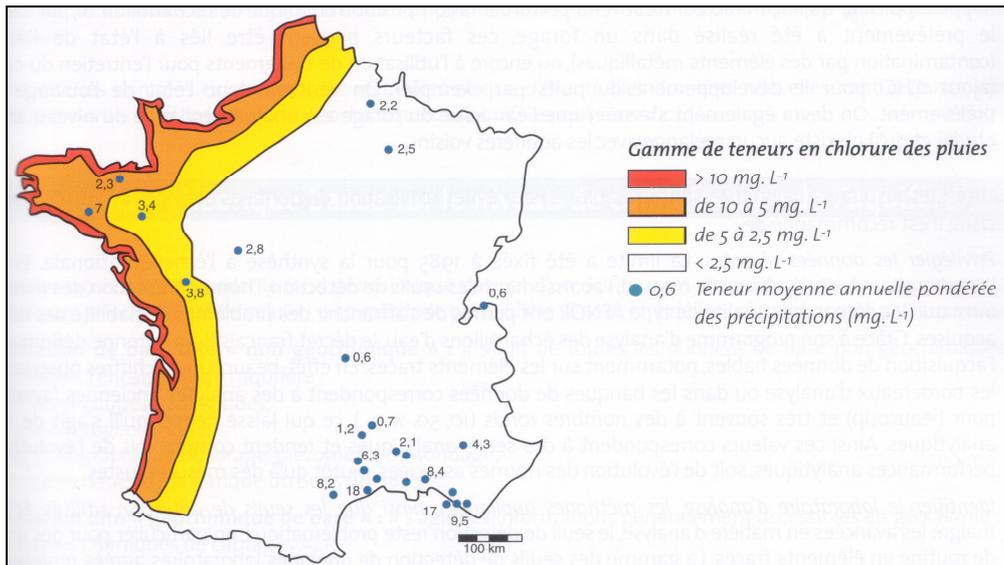


Figure 11 : Teneurs en chlorure des eaux de pluie en France (Chery, 2006)

I.4.2.2. Élément trace : l'arsenic

L'arsenic se trouve dans les roches non altérées, sous forme de sulfure (arsénopyrite, ou sulfo-antimonio-arséniures).

Cet élément a la particularité d'être adsorbé par les oxydes ferriques. Les ions chargés négativement, sont attirés par les surfaces chargées positivement (hydroxydes de fer) (Barbier et al., 2001).

La présence d'arsenic dans les eaux souterraines de la bordure cévenole est avérée mais non systématique. A St Martin de Valgalgues, la valeur de 90 µg/l a déjà été atteinte. Autour de cette ville, différentes formations géologiques peuvent contenir de l'arsenic (amas pyriteux du Soulié). Plus en aval d'Alès dans les alluvions du Gardon, trois forages contiennent de l'arsenic (maximum entre 7 et 26 µg/l). L'apport par les cours d'eau et l'influence du socle peuvent être mis en cause (Blum et al., 2006). Par contre, au niveau du forage de La Tour, alimentation en eau potable de la ville d'Alès (Figure 17), en 2007, la teneur en arsenic des eaux est inférieure à 5 µg/l (source Ades).

Copard (2000) présente ces anomalies en arsenic sur le secteur du Massif Central (Figure 12).

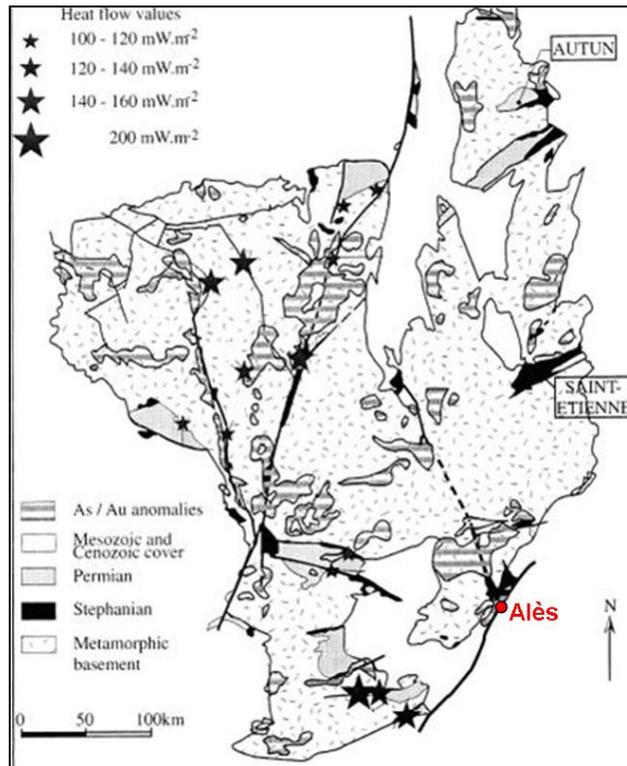


Figure 12 : Carte schématique du Massif Central représentant les zones d'anomalies géologiques en As et Au (Copard et al., 2000)

D'autres éléments traces sont potentiellement présents sur notre zone d'étude comme le montre la Figure 13.

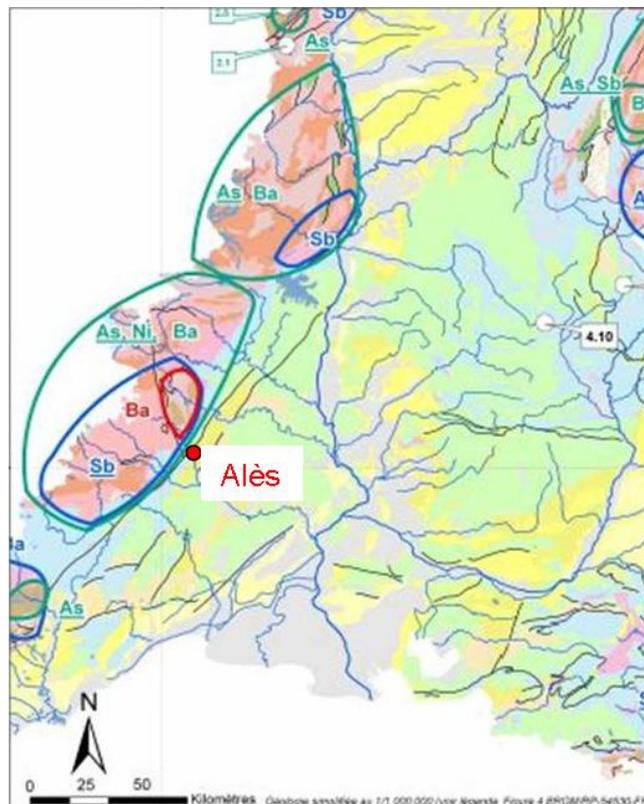


Figure 13 : Localisation des anomalies en éléments traces dans les eaux de surface et souterraine de la région d'Alès (d'après Brenot et al., 2006)

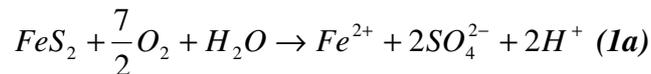
I.4.3. Réactions chimiques et géologie

Indépendamment des sites étudiés, certaines réactions vont nous intéresser pour la suite de notre réflexion notamment pour connaître l'origine des éléments dissous dans l'eau. Nous allons rassembler les réactions envisageables pour la production des éléments présents dans les eaux de mines de la région. La numérotation des équations sera référence dans la suite du rapport.

I.4.3.1. Le fer

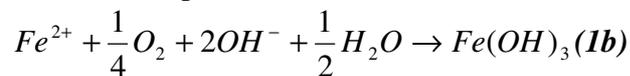
Le fer est présent naturellement dans les charbons sous forme de pyrite. L'oxydation de ce minerai crée le cation ferreux :

- Oxydation du fer et du soufre de la pyrite :



Cette oxydation peut se poursuivre par l'oxydation de l'ion ferreux en hydroxyde ferrique :

- Oxydation de l'ion ferreux (vers pH=6) :



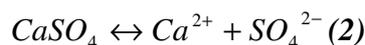
D'autres sources de fer sont possibles notamment par oxydation de pyrite contenue dans les dolomies de l'Hettangien et ensuite par percolation en direction du réservoir minier.

I.4.3.2. Les sulfates

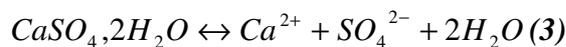
Les sulfates peuvent être produit en partie par l'équation (1a) décrivant l'oxydation de la pyrite mais ne peut être la seule source compte tenu de la concentration élevée de cet élément dans les eaux de mines.

Des terrains riches en gypse et en anhydrite datés du trias se trouvent parfois à proximité des exploitations de charbon et peuvent être à l'origine d'une forte production de sulfate compte tenu du fait qu'ils sont très solubles dans l'eau.

- Dissolution de l'anhydrite :



- Dissolution du gypse :



Une autre particularité du coefficient de solubilité des sulfates est qu'il peut varier selon la teneur en NaCl (Figure 14) de l'eau et les eaux de mines de Fontanes (la plus chargée en sulfates) contiennent aussi du NaCl ce qui tend à augmenter la quantité soluble de sulfates dans l'eau.

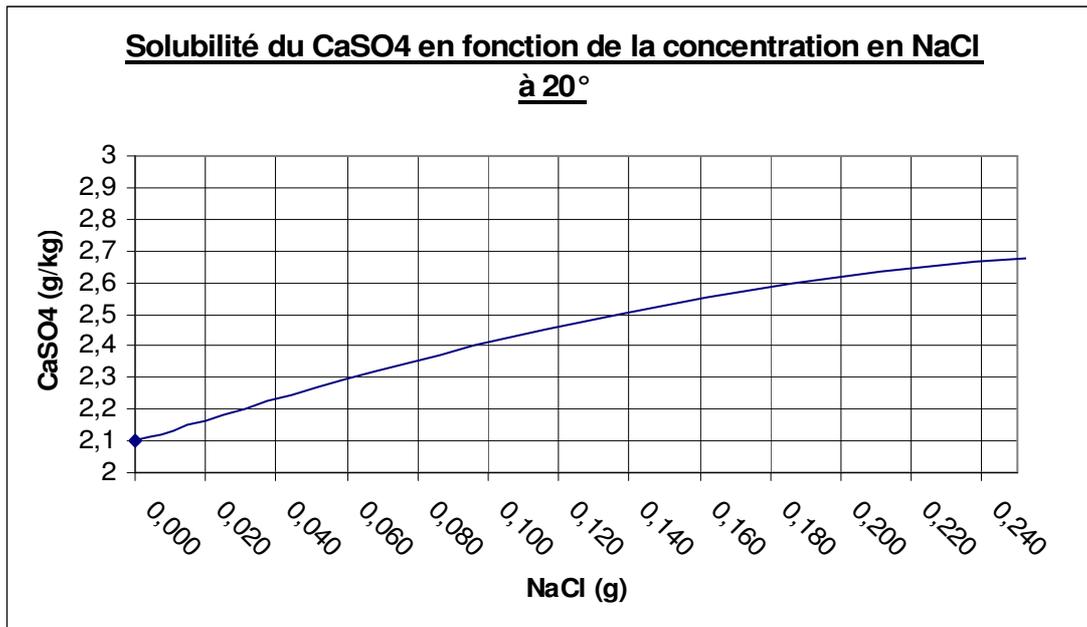
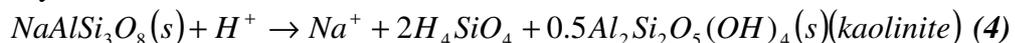


Figure 14 : Solubilité des sulfates (Schoeller, 1962)

I.4.3.3. Le sodium

Deux sources sont envisageables. La première origine peut être due à l'hydrolyse de minéraux aluminosilicatés (exemple de l'albite) présent dans les couches stériles de l'exploitation minière.

Hydrolyse de l'albite :



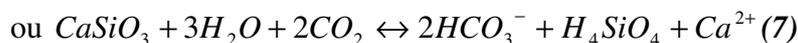
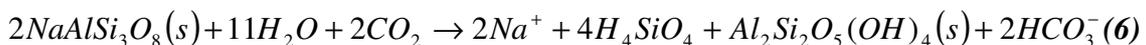
L'autre source est la dissolution de NaCl contenu dans les couches salifères du Trias.



I.4.3.4. L'hydrogénocarbonate

Sa production peut résulter de l'hydrolyse de couche stérile contenant des arkoses composées de feldspath, de mica :

Altération des aluminosilicatés :

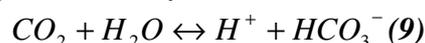


La proximité, en certains points, de roches carbonatées peut produire des ions HCO_3^- d'après cette équation :

Dissolution de carbonate dolomitique de la couverture du réservoir :



Une caractéristique des mines de la région sont leur dégagement violent de CO_2 gazeux. L'ion bicarbonate peut être formé à partir de dioxyde de carbone dans l'eau :



D'autres hypothèses sont possibles notamment par formation due à l'hydrolyse du sol puis par transfert dans le réservoir minier pour les travaux superficiels. Une origine profonde de CO₂ connu dans la région avec des mesures réalisées dans les sources karstiques du Languedoc-Roussillon (Faillat, 1997) peut en être l'origine.

1.4.3.5. Les chlorures

En règle générale, le signal est faible pour les émergences et se rapproche de celui des précipitations sauf pour les émergences de Silhol et Fontanes. Ces deux émergences ont des teneurs supérieures à la moyenne mais sont aussi recouvertes par des terrains triasiques contenant de la halite (équation (5)).

1.4.3.6. Le magnésium

Le magnésium peut être produit par hydrolyse de minéraux ferromagnésien ou par dissolution de la dolomie dans les terrains triasiques ou l'Hettangien (équation (8)).

1.4.3.7. Le calcium

Il peut être produit par dissolution de la dolomie (équation (8)), de la dissolution du calcaire et/ou de la dissolution du gypse et de l'anhydrite (équations (2) et (3))



1.4.4. Principe et exemples de comportement chimique des eaux de mines

Pour comparer l'évolution temporelle des eaux de mines que nous allons étudier, nous allons rappeler le comportement chimique de base de l'après-mine.

A l'origine, avant l'exploitation, le minerai est stable chimiquement. Lorsque les puits et galeries sont creusés à l'intérieur du minerai, des échanges se produisent entre ce dernier et l'air ou l'eau (Younger, 2002). La concentration en certains éléments dans les eaux de mines peut être dissocié en deux phases : la première avant l'ennoyage des vides miniers, lorsqu'un pompage fonctionne dans les galeries afin de maintenir dénoyées les zones à exploiter. Pendant cette période les concentrations sont plus faibles que pendant la phase suivante. La deuxième période est définie pendant l'ennoyage des vides : les eaux se chargent en éléments chimiques résultant de l'interaction entre eau et roche. Lorsque ces eaux atteignent le point d'émergence les analyses montrent qu'au début les concentrations sont fortes et ont une tendance à la décroissance au cours du temps, enfin elle se stabilise à une valeur constante (Figure 15 et Figure 16) (Wolkersdorfer, 2008).

Ces observations sont le résultat de nombreuses études sur l'après-mine à travers le monde : Europe, Amérique du Nord, Afrique du Sud. Plusieurs aspects sont étudiés : les paramètres physiques (pression, température, conductivité, pH, ...) et chimique (concentration dans les eaux).

L'après-mine s'applique aussi bien aux anciennes mines de charbon (Younger, 2002) qu'aux anciennes exploitations métalliques (Pb, Zn,...) ou de sel (Wolkersdorfer, 2008).

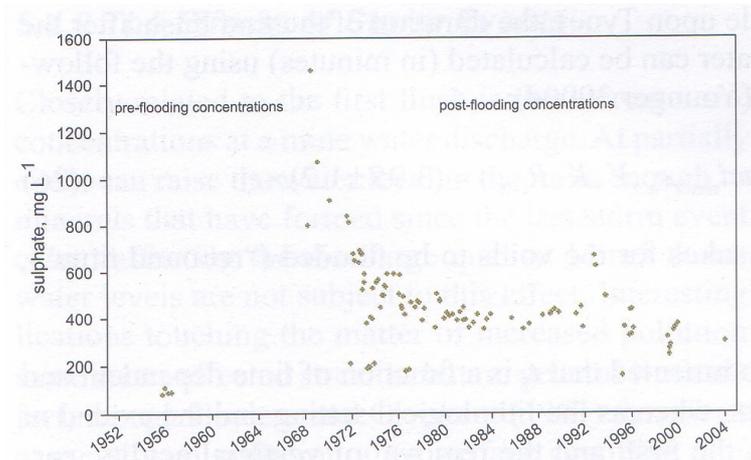


Figure 15 : Evolution temporelle de la concentration en sulfates à Rothschoberger Stollen en Allemagne (Wolkersdorfer, 2008)

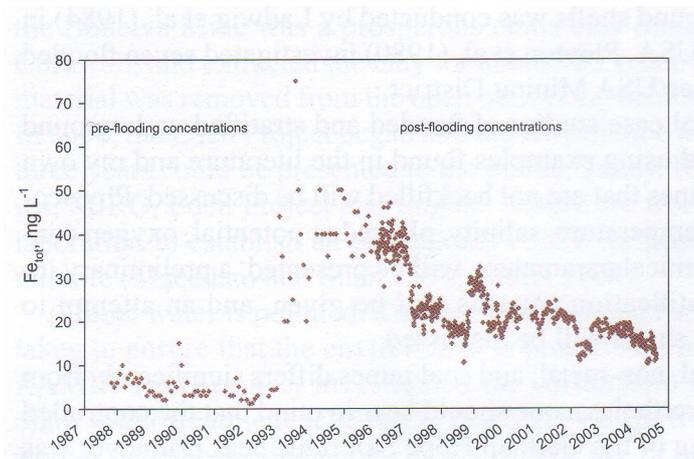


Figure 16 : Evolution temporelle de la concentration en fer total dans la mine de Straberg en Allemagne (Wolkersdorfer, 2008)

I.5. Hydrologie et hydrogéologie de la zone d'étude

I.5.1. Hydrologie

La zone d'étude est traversée par six cours d'eau principaux, ainsi que certains de leurs affluents (Figure 17), que nous allons nous attacher à décrire afin de pouvoir, par la suite, estimer différentes grandeurs et distributions.

I.5.1.1. L'Auzonnet

L'**Auzonnet** prend sa source au pied du château de Portes. Son bassin versant topographique est de 38,62 km². Sur son parcours, il rencontre différentes lithologies : le houiller (45%), les roches métamorphiques (21%), les roches sédimentaires (33%). Il conflue avec la Cèze au niveau de St-Denis.

Sur la rive droite de l'Auzonnet au niveau de St Florent sur Auzonnet se trouve le système karstique des Peyrouses (source de type vauclusien qui s'ouvre dans une reculée dont le débit est de 30 l/s) qui se développe sous le lieu-dit « la ferme des Majard » dont 1,06 km² appartiennent au bassin versant de l'Auzonnet. Il est limité au Nord, à l'Est et à l'Ouest par des failles mais la limite Sud est mal connue. Cet aquifère karstique est contenu dans les

dolomies de l'Hettangien et le niveau de base est constitué par les marnes du Keuper. La source est alimentée par les infiltrations d'eaux météoriques qui au passage traversent une mine de charbon à ciel ouvert (Garrel, 1998 ; Martin, 1988).

1.5.1.2. Le Grabieux

Le **Grabieux**, affluent du Gardon d'Alès, a un bassin versant topographique de 13,85 km² et résulte de la confluence du 'ruisseau blanc' (5,73 km²) et du 'ruisseau rouge' (8,15 km²). Il coule dans la vallée de St Julien les Rosiers (Garrel, 1998). Dans ce secteur deux systèmes karstiques existent :

- le système de la Baume Rascasse possède un bassin versant qui se développe dans les terrains du Callovien et du Kimméridgien inférieur ainsi que des affleurements du Trias et du Lias
- le système des Fonts est la seule résurgence pérenne dans ce secteur et il est alimenté par la rivière souterraine de Cauvel. Sa limite Nord est la vallée de l'Avène mais les autres limites sont plutôt mal connues. Des traçages infructueux ont été réalisés dans différents avens ainsi que des pompages.

1.5.1.3. L'Avène

L'**Avène** possède un bassin versant topographique de 12,41 km² composé par le socle cristallin et le houiller à hauteur de 38%. Elle devient pérenne vers l'aval mais, en amont, subit de nombreuses pertes notamment au niveau du hameau de Mercoirol. Ensuite l'écoulement s'effectue dans les alluvions pour ressortir à l'air libre au niveau de Lécimas. L'Avène alimente le Gardon d'Alès, au Sud d'Alès (Garrel, 1998).

1.5.1.4. Le Gardon d'Alès

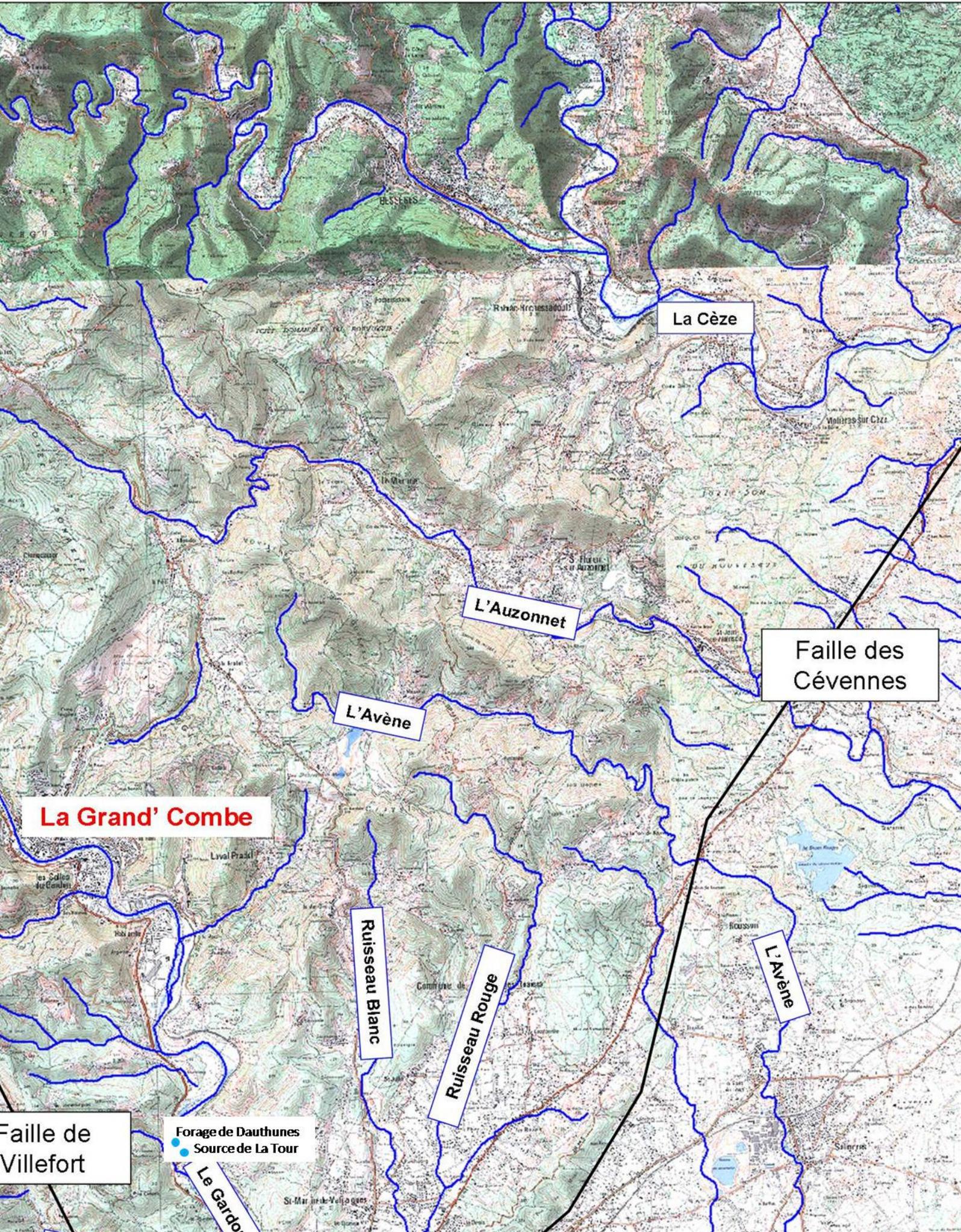
Le **Gardon d'Alès** possède un bassin versant topographique de 443 km². Sa source se situe dans le département de la Lozère. Au niveau de Sainte Cécile d'Andorge, un barrage (11 000 000 m³) a été édifié sur son cours afin de créer une réserve d'eau et d'écrêter les phénomènes de crue. Un autre barrage dit « des Camboux » a été réalisé par les Charbonnages de France afin de servir d'alimentation à la centrale électrique du Fesc aujourd'hui détruite. Le lit de la rivière contient des alluvions de type sable fin (2-5 m dans le lit mineur) et des cailloutis composés de galets et de sables grossiers (Garrel, 1998).

1.5.1.5. Le Galeizon

Le **Galeizon** conflue avec le Gardon d'Alès au niveau de Cendras. Au début de l'été, il peut contribuer à l'alimentation du Gardon d'Alès pour environ 400 l/s. En aval, il contribue également à une alimentation souterraine du Gardon par l'intermédiaire de ses alluvions dont la perméabilité le permet. A St-Paul de Coste, le bassin versant du Galeizon est de 62,2 km² et s'écoule en grande partie sur des micaschistes (Garrel, 1998).

1.5.1.6. La Cèze

La **Cèze** prend sa source dans le département de la Lozère sur la commune de St André Cap Cèze à 798 m d'altitude. Elle se jette ensuite dans le Rhône. La superficie de son bassin versant jusqu'à la confluence avec le Rhône est de 1359 km² pour une longueur de 132 km. Son débit moyen est de 22 m³/s à la confluence avec le Rhône (Garrel, 1998).



I.5.2. Hydrogéologie

Plusieurs aquifères sont présents dans notre zone d'étude (Figure 18 et Figure 19), mais l'essentiel de l'eau utilisée notamment pour l'AEP d'Alès et de la Grand' Combe, provient de la nappe de l'Hettangien (Berger et al., 1978).

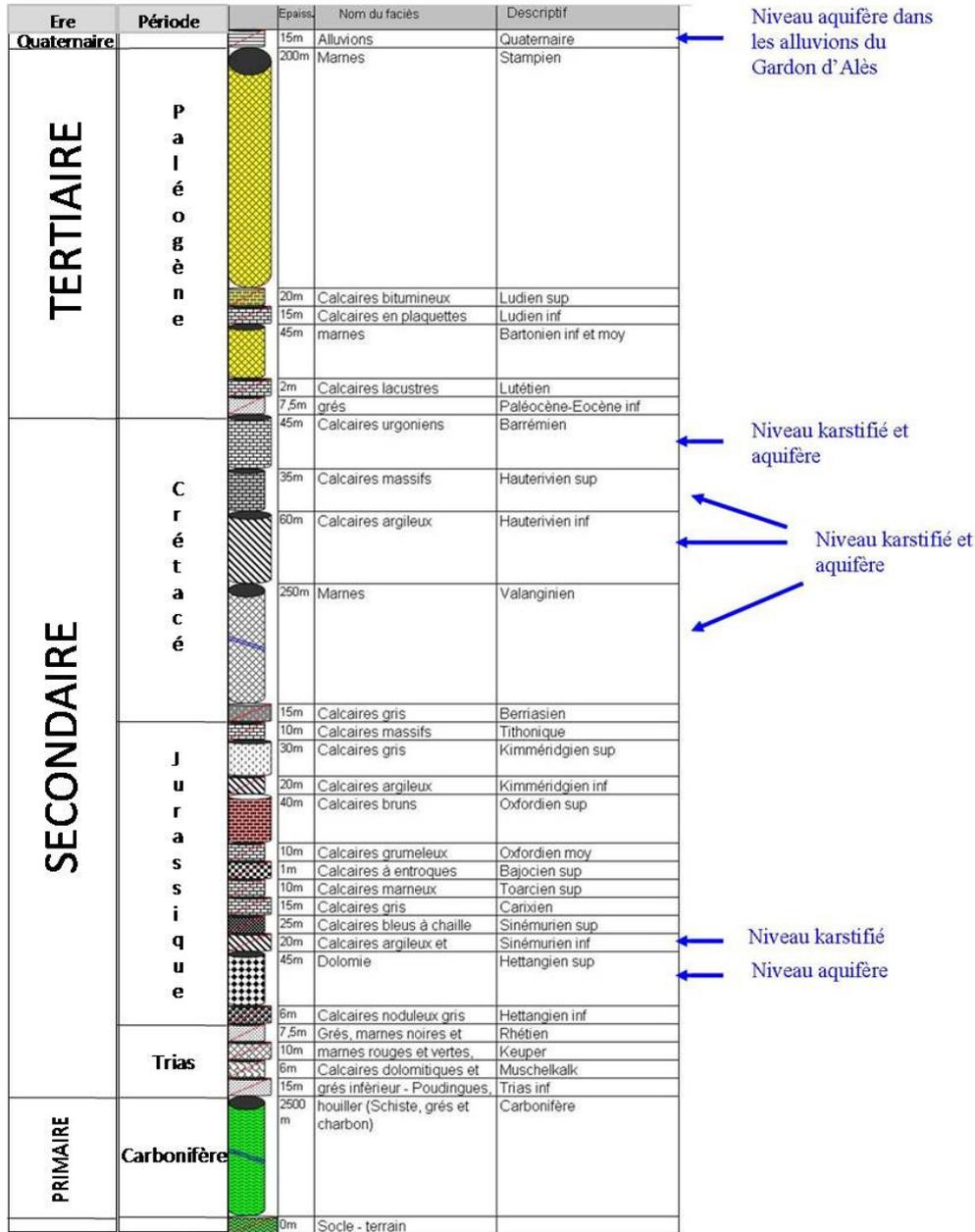


Figure 18 : Log géologique avec situation des niveaux aquifères

I.5.2.1. Les schistes métamorphiques et roches cristallines

Ils sont généralement très peu perméables. Si des circulations d'eau sont possibles, elles ont lieu au niveau des fractures et servent parfois à l'alimentation ponctuelle de points isolés.

1.5.2.2. Le Trias

Le Trias est dans l'ensemble imperméable par l'abondance des argiles du Keuper et du Muschelkalk mais chaque lithographie prise indépendamment présente un comportement perméable ; ainsi les grès de base possèdent une perméabilité interstitielle, les calcaires et les dolomies peuvent être karstifiés et les évaporites par effet de dissolution à l'affleurement peuvent présenter des cavités.

1.5.2.3. L'Hettangien

A sa base, les marnes du Keuper créent un écran imperméable permettant le stockage de l'eau dans les dolomies karstifiées de l'Hettangien. Ce niveau représente le réservoir principal de cette région (Fabre, 1984), compartimenté par des accidents tectoniques et par des diaclases ouvertes; il est associé ponctuellement aux calcaires du Sinémurien. Son alimentation se produit par des pertes karstiques, par infiltration des eaux météoriques. La plupart du temps, nous retrouvons au-dessus de ces formations, des terrains créacés imperméables. Dans la fiche de caractérisation de la masse d'eau souterraine (masse d'eau 6507 – site internet Eaufrance), les limites sont décrites comme suit :

- la limite ouest est un contact avec les formations schisteuses ou granitiques imperméables.
- la limite Est est tectonique au niveau du bassin d'Alès, en contact avec des formations argileuses imperméables du Tertiaire.

Des failles remplies d'argile peuvent engendrer au sein même de la nappe des séparations imperméables, diminuant la communication des différents compartiments constituant la nappe hettangienne.

Les exutoires de cet aquifère sont la source de la Tour (5 à 17 l/s) et les captages de Dauthunes qui fournissent de 6 à 40 l/s (Figure 17).

1.5.2.4. Le Jurassique moyen et supérieur (Sinémurien)

Il présente une très forte karstification et contribue à l'alimentation de la nappe hettangienne. Entre Saint-Martin de Valgalgues et les Mages, ces calcaires se retrouvent sous les terrains créacés.

1.5.2.5. Le Crétacé inférieur

Les calcaires urgoniens qui le constituent, présentent une forte karstification avec présence de source.

Si on considère le Valanginien et l'Hauterivien, les calcaires qu'ils contiennent peuvent fournir un certain débit si les pompages sont placés judicieusement.

1.5.2.6. Le Quaternaire

Les alluvions que nous retrouvons dans le Gardon d'Alès possèdent de bonne capacité aquifère et sont d'ailleurs déjà utilisées.

Il est important aussi, pour les aquifères et notamment les circulations d'eaux souterraines de spécifier l'impact de la fracturation sur celle-ci et dont les directions privilégiées sont Sud Ouest-Nord Est et Ouest Nord Ouest-Est Sud Est. Elles peuvent impliquer une barrière étanche pour la nappe mais aussi un axe d'écoulement privilégié.

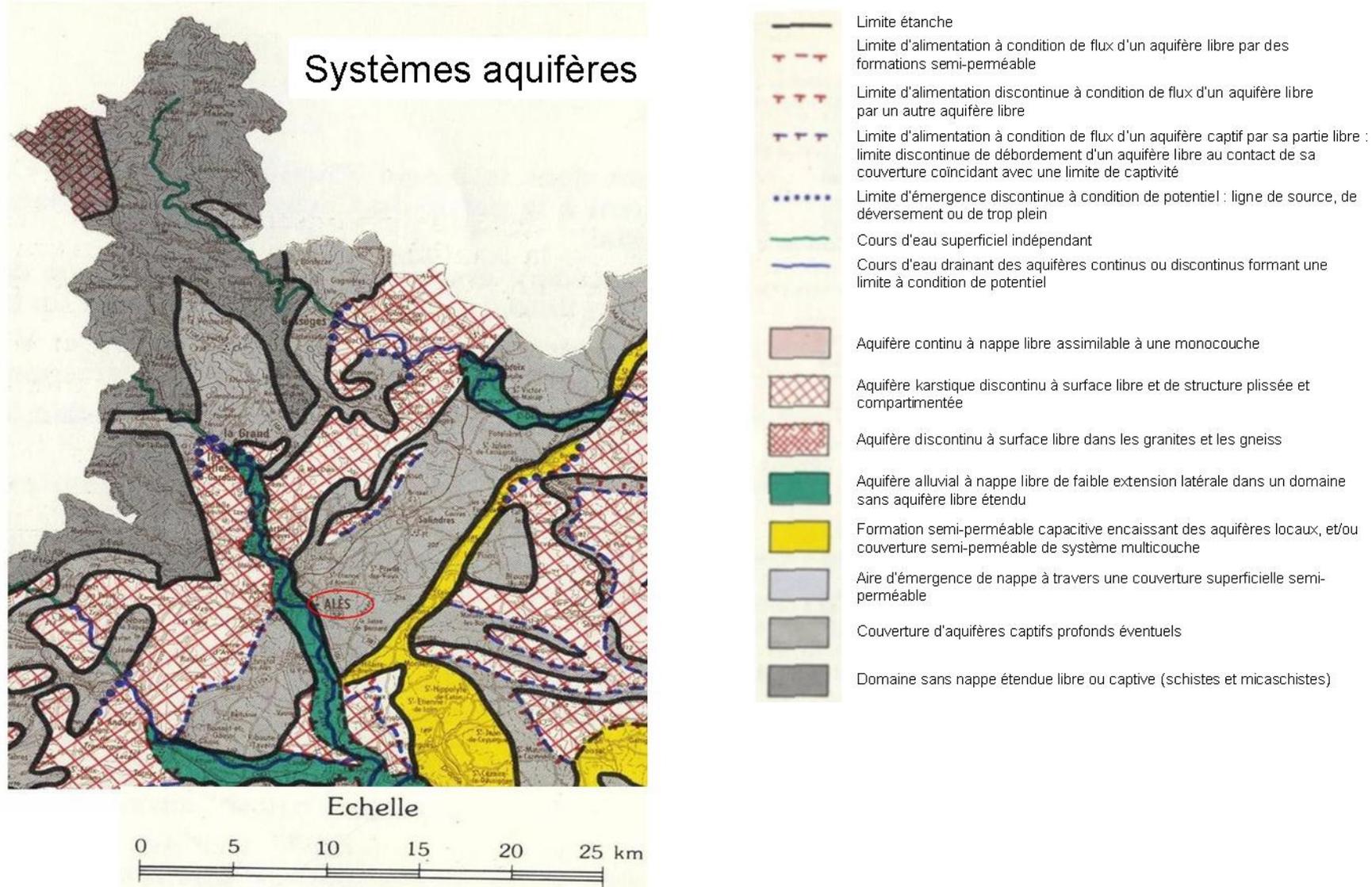


Figure 19 : Carte représentant les systèmes aquifères du département du Gard (BRGM, 1983)

De même, les anciennes galeries d'exploitations minières et la méthode d'exploitation par foudroyage perturbent l'écoulement naturel des aquifères (voire même contribuent à la création d'un aquifère au moment de l'ennoyage des travaux).

Des études (Fabre, 1984) ont compartimenté en deux secteurs la zone karstifiée en basses Cévennes. Le secteur occidental est limité par la faille de Soustelle (faille prolongeant la faille de Villefort - Figure 17) à l'Ouest et au Sud, à l'Est et au Nord par le Gardon et le Gravelongue. Le Galeizon, le Rieusset, le Gravelongue et le Gardon subissent des pertes sur leurs parcours. Des traçages ont révélé des liens entre ces pertes et les captages de la Tour et de Dauthunes servant à l'alimentation en eau potable (AEP) de la ville d'Alès (voir annexe 3).

I.5.3. Hydrogéologie minière

Il est important de noter qu'à l'état naturel les terrains houillers sont peu aquifères mais les extractions de charbon les rendent favorable au stockage et à la circulation d'eau souterraine. Le volume d'eau contenu dans ces vides sera appelé réservoir minier. Les exutoires actuels se font à la faveur d'une galerie ou directement dans le lit du cours d'eau si la mine est dans un relief ou à la faveur d'un accident géologique tel qu'une faille, ou d'un affleurement. Les travaux miniers peuvent aussi contribuer au phénomène de transfert d'eau entre bassins versants. Cette partie a pour but de synthétiser les informations déjà connues sur les émergences de la zone d'étude. Nous allons traiter successivement chaque concession de charbon (dont les limites ont été présentées Figure 8), en commençant par celles de Rochebelle - St Martin de Valgalgues avec le site de Fontanes. Nous considérerons ces deux concessions ensemble par la suite car elles communiquent par des galeries et ont une émergence commune : le puits de Fontanes. Ces deux concessions possèdent un réservoir minier commun. Ensuite nous évoquerons la concession de la Grand' Combe Ouest et les travaux des Oules, Laval, Ste Barbe, Grand' Baume et les faisceaux superficiels. La concession de la Grand' Combe Ouest est constituée de six réservoirs miniers (Les Oules, Laval, Grand' Baume, Ste Barbe, Ricard et les faisceaux superficiels que nous rassemblons). Enfin la concession de la Grand' Combe Est (constituée d'un réservoir minier), Robiac et Meyrannes (possédant un réservoir minier) et Tréllys-Palmesalade (possédant aussi un réservoir minier). Afin de mieux comprendre les écoulements dans les réservoirs miniers, il faut dans un premier temps évoquer les techniques d'extraction utilisées.

I.5.3.1. Les techniques d'extraction sur la zone d'étude

Les méthodes d'exploitations ont été adaptées au type des gisements du fait de leur diversité. D'après les données recueillies par Charbonnages de France, la méthode des chambres et piliers abandonnés n'a pas été utilisée.

Dans la zone d'étude, la technique d'extraction utilisée dépend aussi de l'époque de l'exploitation. Du XIX^e à la première moitié du XX^e siècle, l'extraction s'accompagnait d'un remblayage partiel ou total. Au milieu du XX^e siècle, la méthode par foudroyage s'est développée. Cette méthode consiste, après enlèvement des couches contenant du charbon à laisser les terrains sus-jacents combler les vides afin de stabiliser l'ancienne zone exploitée (Figure 20).

L'exploitation du charbon va laisser des vides. Le foudroyage consiste à laisser s'effondrer le toit de la mine pour combler partiellement les vides par la formation d'éboulis. (Zeng, 1990). Cette méthode sert aussi à récupérer le charbon du toit en enlevant deux étauçons les plus en arrière (Figure 21)



Figure 20 : Schéma représentant l'évolution des mouvements de terrain suite à une taille par foudroyage (gauche : initialisation du phénomène ; droite : (I) zone de foudroyage, (II) zone de fissuration et (III) zone de tassement) (Zeng, 1990)

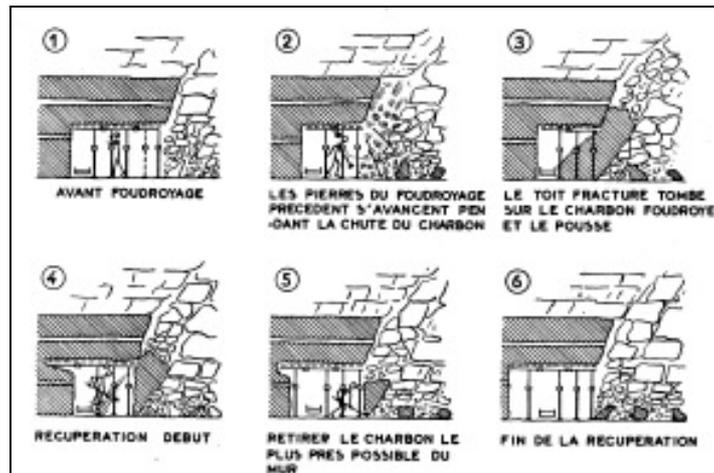


Figure 21 : Foudroyage et récupération du charbon du toit (Vidal, 1962)

Notons que les galeries permettant la liaison entre le ou les puits de l'exploitation du gisement exploité sont appelés travers-banc (noté TB dans la suite du texte).

1.5.3.2. Notion de réservoir minier

Nous avons choisi de décrire l'hydrogéologie minière par concession. La concession définit les limites d'une surface à l'intérieur de laquelle le minerai peut être exploité. L'exploitation à l'intérieur d'une concession n'est pas obligatoirement continue, ce qui va créer des zones de vides non connectées entre elles. Lorsque ces vides sont ennoyés, ils créent des réservoirs d'eau indépendants, avec une ou des émergences propres, que nous appellerons réservoirs miniers. Une concession peut donc posséder plusieurs réservoirs miniers.

Nous avons choisi une classification des émergences par concession plutôt que par bassin versant car chacune d'elles concerne un ou deux bassins versants différents. Ainsi les concessions de Rochebelle St Martin possèdent un réservoir qui s'écoule dans le bassin versant du Gardon. Les exploitations de la Grand' Combe Ouest s'écoulent vers le Gardon sauf les 3 faisceaux superficiels et les eaux des exploitations de la Grand' Combe Est s'écoulent vers la Cèze et l'Auzonnet. Chaque concession possède des écoulements propres à certains bassins versants.

1.5.3.3. Concessions de Rochebelle et de St Martin de Valgalgues : Site de Fontanes

Actuellement, l'émergence des concessions de Rochebelle - St-Martin se fait au niveau du puits de Fontanes. Sur les concessions de Rochebelle et Saint-Martin de Valgalgues, le tonnage extrait est estimé à 20 millions de tonnes, soit 10 millions de m³.

La configuration de la concession de St Félix (amas pyriteux exploités pour le zinc) est telle que ses galeries souterraines se retrouvent superposées à la partie nord-ouest des faisceaux de Fontanes et de St Martin (charbon) (Figure 22) ce qui laisse supposer d'éventuelles communications.

Notons que sur la Figure 22, Fontanes désigne à la fois une exploitation de fer pyriteux en bleu et l'émergence des concessions de Rochebelle St-Martin (puits de Fontanes)

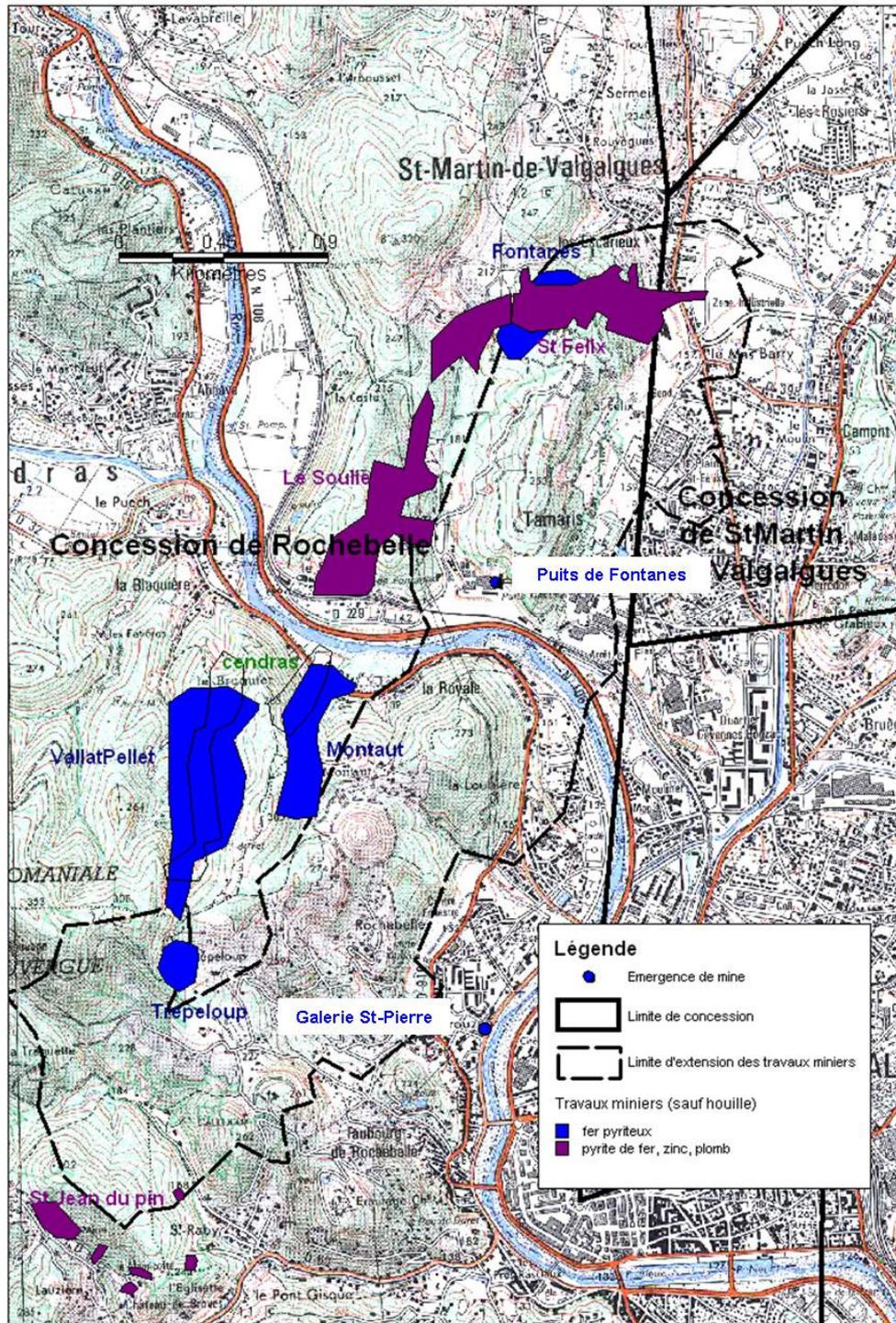


Figure 22 : Délimitation des concessions de Rochebelle et St-Martin de Valgalgues, de l'extension des travaux miniers, des exploitations autres que le charbon sur la carte IGN d'Alès au 1/50000^e

Pendant l'exploitation, 4 points servaient d'exutoire à l'eau de ces concessions (non localisés sur la carte) :

- Exploitation de Saint-Martin : une exhaure a été mise en place uniquement sur une année (1961). Le débit était de 15,3 m³/h (11 000 m³/mois).
- Exploitation de Destival : entre 1961 et 1976, le débit rejeté était de 27,8 m³/h (20 000 m³/mois). Après 1976, nous n'avons pas recueilli d'informations sur le devenir des eaux.
- Exploitation de Rochebelle : entre 1948 et 1968, l'exhaure est d'environ 0,2 m³/h (160 m³/mois). Une forte influence des précipitations se fait ressentir sur le débit d'après les mesures. Après 1968, l'exploitation est enoyée et les eaux basculent vers Fontanes
- Exploitation de Fontanes : entre 1961 et 1969, le débit au niveau de ce puits est de 51,9 m³/h (37 400 m³/mois). Après 1969, les eaux du secteur de Rochebelle viennent s'ajouter aux eaux d'exhaure de Fontanes et le débit devient 262,4 m³/h (188 900 m³/mois). Le débit varie annuellement de 1388,9 m³/h (1 000 000 m³/an) à 4 444,4 m³/h (3 200 000 m³/an).

Les caractéristiques des écoulements sont :

- le débordement gravitaire :

Aujourd'hui, le premier site d'émergence (en termes de débit) d'eau de mine sur la zone d'étude se situe dans l'ancien puits d'extraction de charbon de Fontanes. Après l'ennoyage des galeries de l'ancienne exploitation de charbon qui a duré 9 ans, le débordement s'est d'abord produit au niveau de la galerie St Pierre (Figure 22) (secteur de Rochebelle à 132 m NGF), en Novembre 1994, ce qui a entraîné une coloration du Gardon par les oxydes de fer.

- le pompage :

Suite à ce constat, un pompage a été créé au niveau de Fontanes afin de maintenir le niveau d'eau dans les galeries, en dessous de la cote de l'exutoire de la galerie St Pierre. L'équipement du site est constitué par 3 pompes (deux de 230 m³/h et une de 130 m³/h) donnant un débit maximum de 590 m³/h (Cesame, 2007). Le niveau d'eau dans les galeries se trouve en dessous du niveau du Gardon (105 m NGF). Le lit du Gardon est partiellement imperméable au dessus des galeries. Le débit de l'exhaure à Fontanes ne représente que 1 % du débit moyen interannuel du Gardon (entre 1993 et 2002 = 26 496 m³/h – site internet Banque Hydro) ce qui est négligeable (Cesame, 2006).

Le niveau dans le réservoir minier est maintenu entre 110 m NGF et 127 m NGF. En dessous du niveau minimum les pompes sont arrêtées.

La piézométrie de ce secteur est mesurée en trois points (Figure 131):

- le puits de Fontanes
- le piézomètre de Rochebelle
- le piézomètre de St-Raby

1.5.3.4. Concession de la Grand Combe Ouest

La géologie de la concession de la Grand' Combe Ouest est décrite dans l'annexe 1 – 3 – 1 de ce rapport et par les Figure 23, Figure 24 et Figure 26.

Cette concession est constituée par plusieurs faisceaux. Nous décrivons les faisceaux dans cet ordre : les Oules, Laval, Ste Barbe, Ricard, Grand Baume, Lumières et Champclauson.

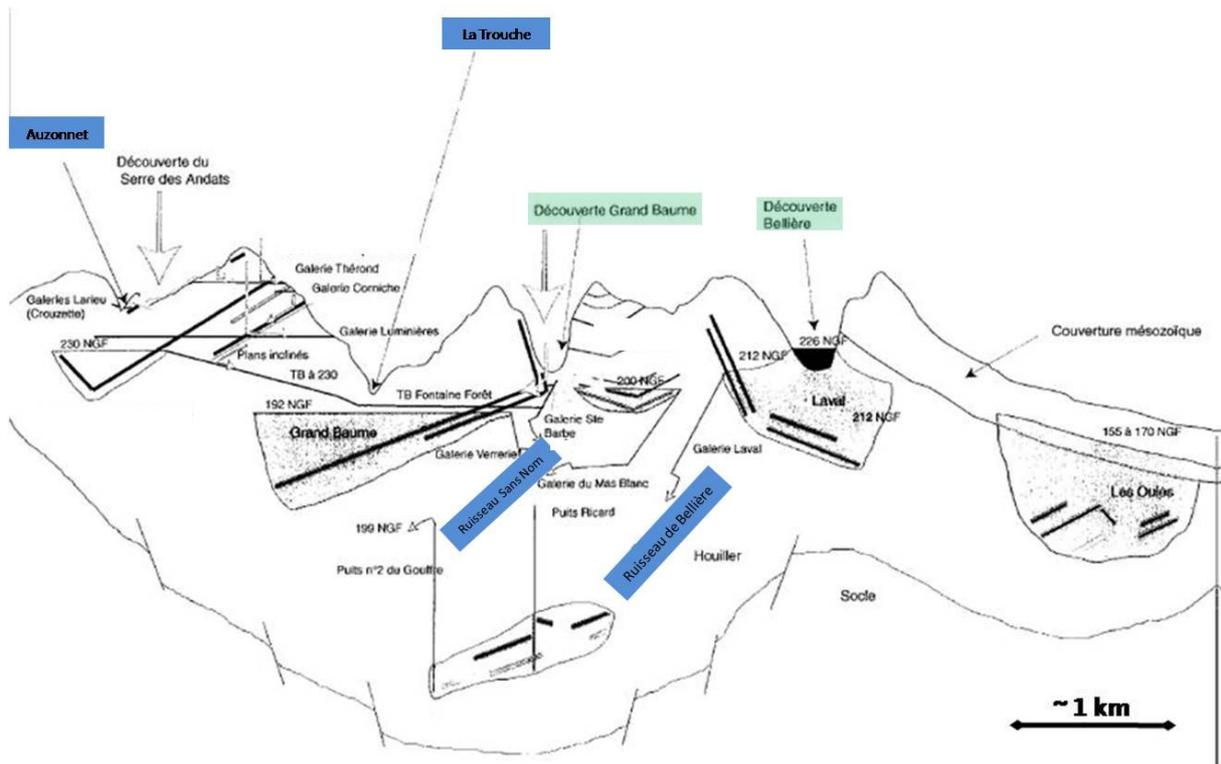


Figure 23 : Schéma d'ensemble Nord-Sud du fonctionnement de la concession de la Grand' Combe Ouest (Cesame, 1999)

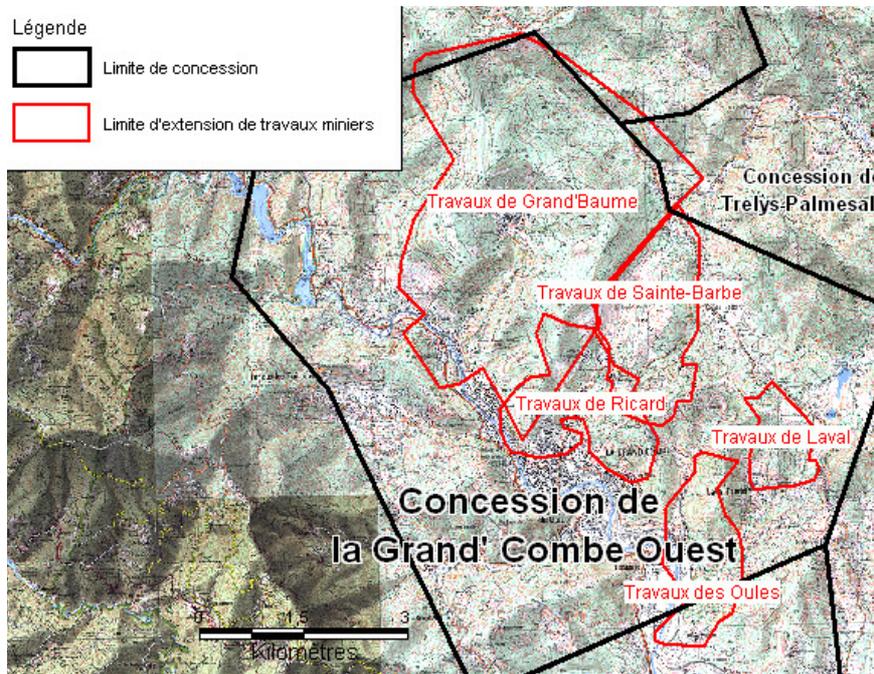


Figure 24 : Représentation de l'extension des travaux miniers de la Grand' Combe Ouest (carte IGN)

I.5.3.4.1. Faisceau des Oules

Les eaux qui se retrouvent dans ces travaux miniers dont l'extension est d'environ 2,28 km², traversent d'abord des terrains triasiques, les eaux acquièrent une forte minéralisation (Cesame, 1999), le transit dans les travaux miniers ne modifie pas énormément le faciès de

ces eaux comme le montreront les analyses de données du chapitre II. L'exutoire de ces travaux est drainé par le système hydrogéologique du Gardon.

I.5.3.4.2. Faisceau de Laval

Après l'ennoyage des travaux (~1,10 km²), l'exutoire des eaux de mine s'est produit par la galerie de Laval (à la cote 207,5 m NGF), au niveau du **ruisseau de Bellière** affluent du Gardon. Au début de la résurgence, le débit était de 9 m³/h jusqu'à 40 m³/h. En 1997, le débit au niveau de la galerie de Laval a atteint 170 m³/h mais il est en moyenne de 125 m³/h pour une année moyenne, cette augmentation était due à la création de nouvelles exploitations en surface qui favorisent l'infiltration vers les travaux miniers. La création des découvertes (exploitation à ciel ouvert) ont engendré 20% d'augmentation du débit du bassin versant du Ruisseau de Bellière.

I.5.3.4.3. Faisceau de S^{te} Barbe

La cote d'ennoyage est de 200 m NGF dans ces travaux dont l'extension est d'environ 3,24 km².

Le ruisseau 'Sans Nom', affluent du Gardon, est alimenté par trois résurgences minières, de l'amont vers l'aval : la galerie Ste Barbe, la galerie du Mas Blanc et la galerie du puits Verrerie. Ces résurgences le rendent pérenne et la plus importante en termes de débit est la galerie du Mas Blanc (fin Juillet 98, le débit était de 70 m³/h).

Le ruisseau sans nom reçoit des émergences minières qui contribuent à soutenir fortement son débit. L'émergence des travaux de la montagne Ste Barbe se fait par la galerie du Mas Blanc et une faible partie des écoulements des zones les plus élevées se fait en direction de travaux appartenant à une autre unité hydrogéologique qui est celle des travaux de la Grand Baume et vers la galerie Ste Barbe par le travers banc de St Andéol. Le débit au niveau de la galerie du Mas Blanc est aussi engendré par des apports de la découverte de Grand Baume (Figure 25) (Cesame, 1999).

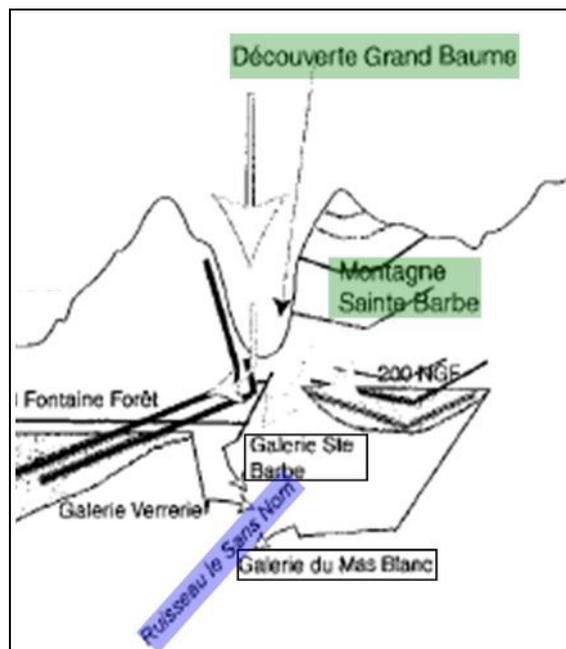


Figure 25 : Schéma représentant l'organisation des écoulements de l'exploitation Ste-Barbe (Cesame, 1999)

I.5.3.4.1. Faisceau de Ricard

En 1998, les travaux (~3,14 km²) étaient quasiment totalement ennoyés et le débit d'émergence a été estimé à 2 m³/h dans le bassin versant du Gardon.

I.5.3.4.2. Faisceau de Grand' Baume

Cette exploitation a une surface de 15 km². Pour maintenir un niveau d'eau bas dans ces travaux miniers, en 1965 une galerie a été percée entre le puits de la verrerie et le ruisseau Sans Nom à 191,21m NGF afin d'évacuer les eaux vers un point bas, aujourd'hui nous considérerons cette cote comme le niveau d'ennoyage dans les travaux miniers. Il est possible qu'une partie des eaux se vidangent dans les travaux de la montagne Ste Barbe (Cesame, 1999).

Une coloration a permis de mettre en évidence que le drainage de la fosse se fait par la galerie Ste Barbe, la galerie de la Verrerie et/ou du Mas Blanc.

La totalité des émergences se produit dans le bassin versant du Gardon. Une partie des travaux miniers de Grand' Baume se trouve sur le bassin versant de l'Auzonnet et draine les eaux du bassin versant de l'Auzonnet vers celui du Gardon.

I.5.3.4.3. Les faisceaux superficiels : faisceau de Lumières et de Champclauson

Les travaux de Lumières et de Champclauson sont répartis sur le bassin versant du Gardon et celui de l'Auzonnet. Le ruisseau de la Trouche et le ruisseau de Lumières (négligeable) sont des affluents du Gardon dont la pérennité dépend des résurgences minières. De même, l'Auzonnet devient pérenne au niveau des émergences de mines.

Les travaux profonds de la couche Champclauson trouvent leur résurgence au niveau de la galerie 230 (travers banc qui avait été utilisé pour dénoyer certaines galeries).

La galerie Ste Barbe sert aussi d'exutoire à ces travaux ce qui explique une partie de son débit même à l'étiage.

Pour les autres faisceaux superficiels, les résurgences sur l'Auzonnet sont :

- la galerie Crouzette (337 m NGF)
- la galerie Larrieux (357 m NGF)
- la galerie Palmesalade (340 m NGF)

et pour le Gardon :

- la galerie de Théron (396 m NGF)
- la galerie de la Corniche (394 m NGF)
- la galerie de Lumières via la Trouche (295 m NGF).

Une partie des résurgences se fait par les affleurements en amont de la cote 230 notamment dans le ravin de la Trouche où le débit, même en été, est de 30 m³/h.

Tableau 11 : Débits des émergences des faisceaux superficiels

Galerie	Débit min mesuré (m ³ /h)	Débit max mesuré (m ³ /h)	Débit moyen sur une année (m ³ /h)	Bassin versant
Sainte-Barbe	90	350	180 (pour pluie = 1300 mm)	Gardon
Lumières	1	180		Gardon
Théron	10	100	variable	Gardon
Corniche	2	60	variable	Gardon
Fontaine	5	180	variable	Gardon
Palmesalade	1	20	1 à 2 (entre 1992 et 1997)	Auzonnet
Larrieux	8	150	10 (entre 1992 et 1995)	Auzonnet
Crouzette	3,5	43,2	10 à 25 (entre 1992 et 1996)	Auzonnet

Dans la vallée de la Trouche, le débit provenant des émergences est d'environ 195 m³/h (Tableau 11) (Théron+Corniche+Lumières+Fontaine).

Pour la découverte de la Serre des Andats, le point bas se situe dans le bassin versant de l'Auzonnet, près de son lit et par traçage un exutoire secondaire a été mis en évidence dans la vallée de la Trouche.

D'après l'étude Cesame (1999), nous constatons aussi que les travaux jouent un rôle sur la répartition des eaux dans les bassins versants ; ainsi 120 m³/h sont détournés du bassin versant de l'Auzonnet vers celui du Gardon. Ce détournement vers le Gardon représente une perte de 14% pour le débit de l'Auzonnet au niveau du Gour Nègre (860 m³/h).

En parallèle à ce détournement, d'autres travaux miniers (Larrieux-Crouzette-Palmesalade) amènent de l'eau à l'Auzonnet et au global nous avons un soutien du débit d'étiage.

De même pour le Gardon, les eaux provenant des travaux miniers constituent 8 % (~209 l/s) du débit total moyen de celui-ci (Cesame, 1999).

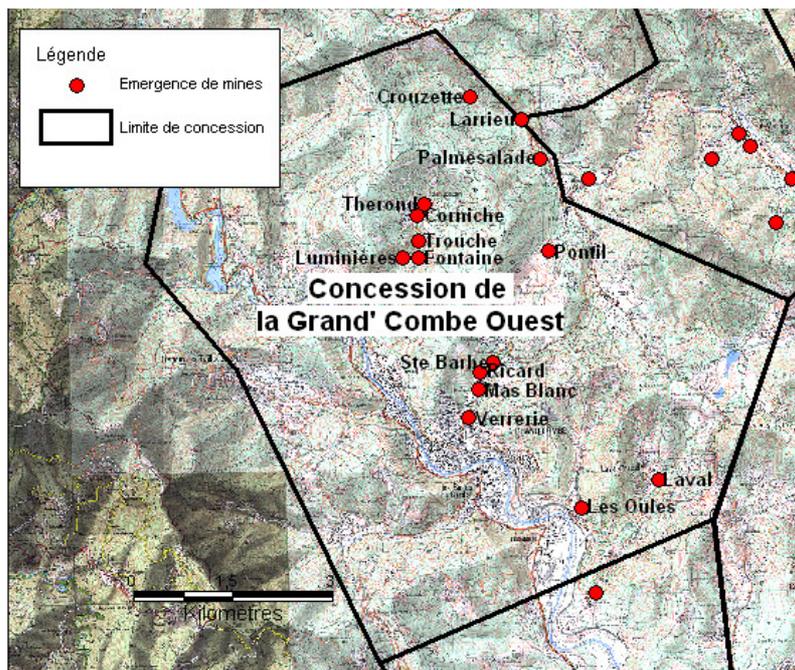


Figure 26 : Localisation des émergences minières sur la concession de la Grand' Combe Ouest (carte IGN)

I.5.3.5. Concessions de Grand Combe Est, de Robiac et Meyrannes, de Tréllys et Palmesalade (Figure 27)

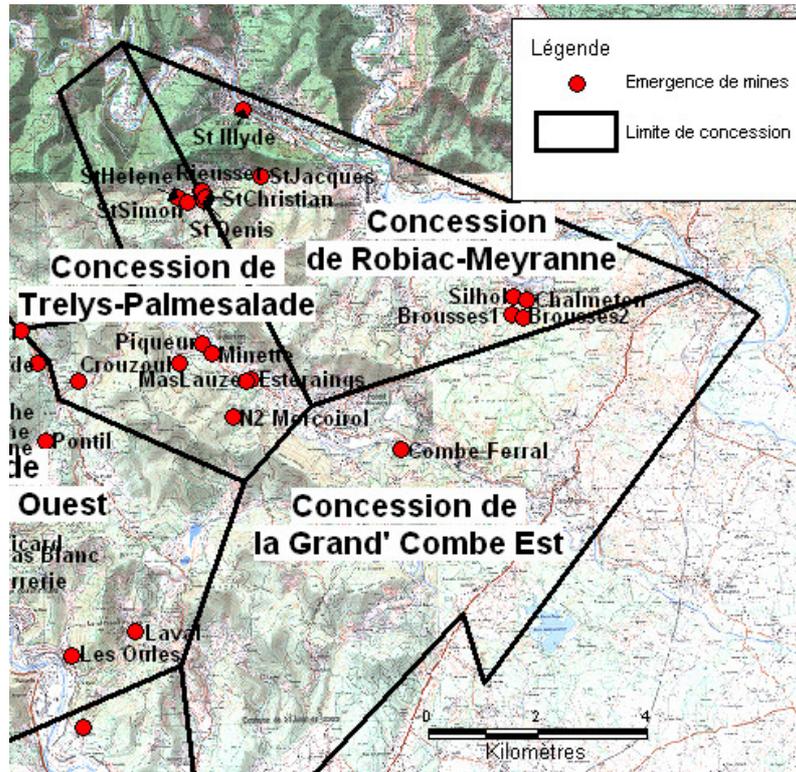


Figure 27 : Représentation des émergences des concessions de la Grand' Combe Est, Robiac et Meyrannes, Tréllys et Palmesalade (carte IGN)

Sur ces concessions, lors de leur exploitation, il existait 3 stations de pompage pour l'exhaure. Après ennoyage des travaux, 3 réservoirs miniers indépendants se sont mis en place avec chacun un exutoire (Tableau 12). Ces trois réservoirs ne sont pas connectés entre eux et ne sont pas superposés dans l'espace.

Tableau 12 : Réservoirs miniers de la Grand' Combe Est

Réservoir minier	Nom de l'exutoire du réservoir	Date d'apparition de l'émergence	Côte de l'émergence (m)
Tréllys	Galerie des Estéraings	15/01/60	171
Bessèges-Rochessadoule	Galeries Saint-Illyde et Saint-François	23/11/56	242
Molières – Saint-Jean	Galeries d'accès aux puits de Silhol et Chalmeton	05/03/75	160

I.5.3.5.1. Réservoir de Bessèges-Rochessadoule

L'exutoire par les galeries de St-Illyde et St François se fait à environ 171 m NGF. L'eau est canalisée à la sortie des galeries et chemine sous une ancienne usine à tube pour enfin rejoindre la Cèze.

Le débit moyen de ces galeries est de 90 m³/h et de 40 m³/h pendant l'étiage. Cet apport correspond à 0,4% du débit total de la Cèze en hiver et 3% en été ce qui est négligeable. Le

système minier a un effet tampon entre les précipitations et la restitution à la Cèze mais aucun transfert de bassin versant n'est visible.

I.5.3.5.2. Réservoir de Molières - Saint-Jean

Les galeries d'émergence, Silhol et Chalmeton, se situent à la cote 160 m NGF et concernent les travaux de Molières – Saint-Jean – Saint-Florent, de Panissières et de Combe-Ferral. L'évacuation se fait en direction de la Cèze.

Lorsque le débit de la Cèze est moyen, les deux galeries apportent 130 m³/h à celle-ci soit 0,4% de son débit. Par contre, en été, le débit des galeries augmente de 2,4 % le débit de la Cèze ce qui reste toutefois faible.

Un détournement de certaines eaux provenant du bassin versant de l'Auzonnet et de l'Avène en direction de celui de la Cèze se produit; cependant il n'est que de l'ordre de quelques m³/h.

I.5.3.5.3. Réservoir de Tréllys

Les travaux de Tréllys, du Feljas et de l'Arcas, dont l'exutoire est la galerie des Estérais (Tableau 13), sont envoyés jusqu'à la cote 242 m NGF. Le débit apporté à l'Auzonnet est important car le système minier joue un rôle tampon avec les précipitations mais aucun transfert de bassin versant ne se produit. Par exemple, lors d'un étiage quinquennal la galerie des Estérais peut tripler le débit de l'Auzonnet (de 14 à 39 m³/h).

L'émergence des Estérais a un débit moyen de 120 m³/h (Cesame, 2002).

Tableau 13 : Estimation des débits pour les exutoires

Nom de l'exutoire du système	Q moy (m³/h)	Q étiage (m³/h)	Cote d'exhaure en m NGF
Galerie des Estérais	120	25	242
Galeries Saint-Illyde et Saint-François	130	40	171
Galeries d'accès aux puits de Silhol et Chalmeton	130	35	160

I.6. PLUVIOMETRIE DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude se trouve sous un climat méditerranéen. Les précipitations ont lieu en automne et en hiver sous forme de pluies cévenoles, événements violents. Les pluies deviennent plutôt rares en été.

Il est difficile de quantifier la pluviométrie à différentes échelles de temps dans ce secteur car les événements sont parfois violents et très court en même temps.

Une moyenne des précipitations sur l'année donne 1 000 mm/an pour Alès alors qu'à Nîmes (qui ne se trouve qu'à 40 km au Sud d'Alès) les précipitations moyennes sont de 750 mm/an. La température moyenne de la zone d'étude est de 14°C.

Tableau 14 : Hauteurs moyennes des précipitations pour 4 stations de mesure (Météo France)

Hauteur moyenne des précipitations en mm														
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Année	Période de suivi
St Christol les Alès (138 m)	88,8	77,2	75,1	75	79,8	62,6	35,7	59	110,5	153,4	93,5	90,7	1001,3	1950-2001
Salindres (195 m)	97,4	76,9	75,6	83,5	82,7	67,2	40,3	64,1	114,3	155,3	95,2	93,6	1042,9	1954-2001
La Grand Combe (288 m)	197,1	62,8	63	122,1	131,9	69,6	41,4	68,8	197,2	218,8	203,3	219,2	1595	1994-2001
Alès PC (143 m)	96,9	80,5	87,8	84,6	91,8	68,1	39,3	67,8	118,7	161,4	102,5	101,4	1100,9	1946-2001

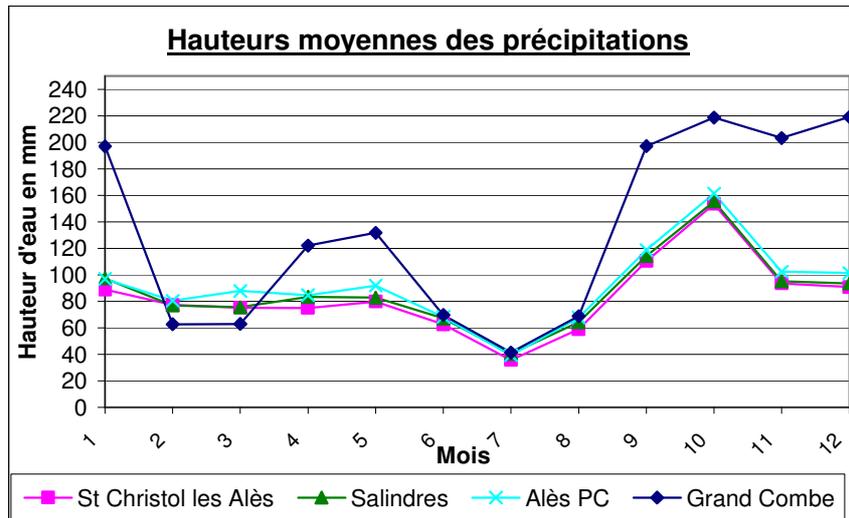


Figure 28 : Représentation des hauteurs moyennes des précipitations pour les stations de la Grand' Combe, St Christol les Alès, Salindres et Alès d'après le Tableau 14

Nous voyons que la courbe pour la Grand' Combe est différente des autres (Figure 28). Une raison est que l'altitude de la station de mesure est plus élevée (288 m) que les autres stations citées. La Grand' Combe se situe sur les contreforts des Cévennes tandis que les autres points de mesures se font en plaine.

Par ailleurs, Livet (1943) indique un cumul annuel de 1,38 m pour les pluies à La Grand' Combe entre 1865 et 1941.

I.7. LES MODELES APPLIQUES AUX RESERVOIRS MINIERS

Plusieurs types de modélisation sont applicables aux réservoirs miniers : les modèles analogiques, physiques et numériques. En simplifiant la classification, deux grands types de familles de modèles numériques existent suivant le phénomène qu'ils décrivent. Le premier grand groupe cherche à décrire et prévoir le déroulement des réactions hydrogéochimiques dans le réservoir minier mais dans notre étude, nous ne pouvons utiliser ce type de modèle par manque de données sur la chimie des émergences. Le second groupe s'attache à décrire le comportement hydrodynamique du système minier. Ces deux groupes ne sont pas forcément indépendants et les deux comportements seront alors décrits dans des modèles associant les écoulements des eaux et les réactions qui s'y produisent.

Une des classifications proposée dans la littérature (site internet Gnouma) pour les modèles hydrologiques est la suivante : de manière générale, les modèles que nous allons décrire sont notés comme appartenant aux modèles paramétriques conceptuels c'est-à-dire qu'ils considèrent le bassin versant et la nappe (dans le cas de l'hydrogéologie) en général par

simplification du cycle de l'eau. Au final, le système est décrit comme des réservoirs interconnectés.

Les modèles paramétriques sont subdivisés en deux groupes :

- Les modèles globaux ou boîte noire dans lesquels le bassin est considéré comme une seule entité. Le bassin versant est un ensemble indifférencié. Les entrées et les sorties sont liées par des relations empiriques pouvant être des équations différentielles ne tenant pas compte des variations spatiales des processus.
- Les modèles distribués qui prennent compte de la variabilité spatiale des processus et/ou des entrées et/ou des conditions aux limites et/ou des bassins versants. Il permet de discrétiser le bassin versant par des mailles ou des unités plus petites permettant de tenir compte de la répartition des caractéristiques du milieu.

Entre ces deux groupes peuvent être défini les modèles semi-distribués, dans lesquels le bassin versant est décrit à la fois par des caractéristiques globales et des caractéristiques à une échelle plus fine et plus détaillée.

Nous allons appliquer cette classification aux modèles décrits pour l'après-mine.

I.7.1. Modèle hydrogéochimique

Ce type de modèle a pour but de reproduire les phénomènes chimiques qui se produisent dans le réservoir minier. Le système minier peut être décrit par un ou plusieurs réservoirs chimiques.

I.7.1.1. Modèles globaux (boîtes noires)

Un réservoir

Schmitt et al. (2004) proposent une simulation permettant d'estimer l'évolution temporelle de la teneur d'un élément (le zinc) des anciens travaux de Largentière (07) (Figure 29 et Figure 30)

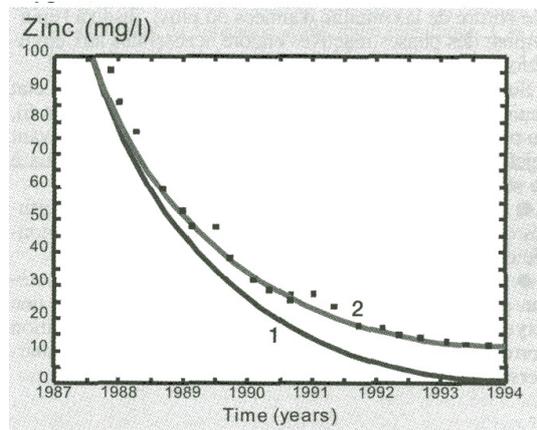


Figure 29 : Evolution réelle (carré noir) et modélisée (trait plein) des concentrations de zinc pour l'exutoire de la mine de Largentière. 1) modèle de rinçage simple et 2) avec prise en compte de la remise en solution du zinc dans les travaux miniers (d'après Schmitt et al., 2004)

Le modèle est basé sur une approche simple de mélange des eaux d'origine superficielle - ne contenant pas de zinc qui vont grâce à l'oxygène qu'elles contiennent oxyder la sphalérite pendant leur circulation dans les anciens travaux miniers – et d'eaux souterraines. Un phénomène de rinçage est en cours et conduit à une tendance décroissante des concentrations en zinc.

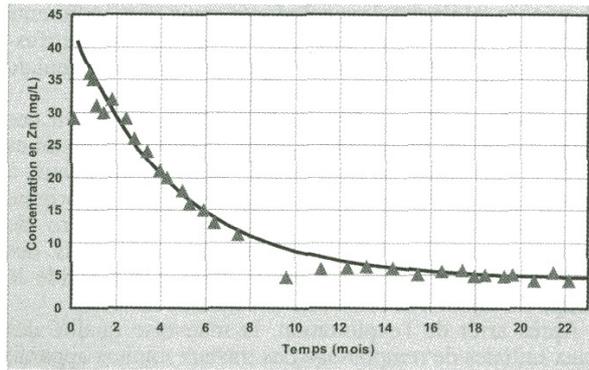


Figure 30 : Evolution mesurée (triangle) et modélisation simple (trait plein) de mélange sur les concentrations de zinc issues du travers banc aval de la mine des Malines (d'après Schmitt, 2004)

1.7.1.2. Modèles distribués

Des systèmes plus complexes permettent de décrire plusieurs types de réactions se produisant dans le réservoir minier. Plusieurs approches sont possibles avec un modèle 'global' au départ qui considère le réservoir minier dans deux ou trois dimensions.

- Un modèle 'global' peut être affiné par un modèle semi-distribué dans l'espace qui va permettre de reproduire les concentrations dans plusieurs puits servant de contrôle sur le bassin. Les résultats sont d'autant plus variables que la position des puits et les connections hydrauliques avec d'autres travaux ne sont pas prises en compte.
- P. Collon-Drouaillet et al. (2005) proposent une méthode qui simule les quantités d'éléments dans l'eau par l'intermédiaire de réservoirs chimiques. La concentration est obtenue en sortie du système. Cette méthode est appelée modélisation 'NCR' (Network of Chemical Reactors) permet de prédire l'évolution de la qualité de l'eau lors de l'ennoyage (Figure 31).

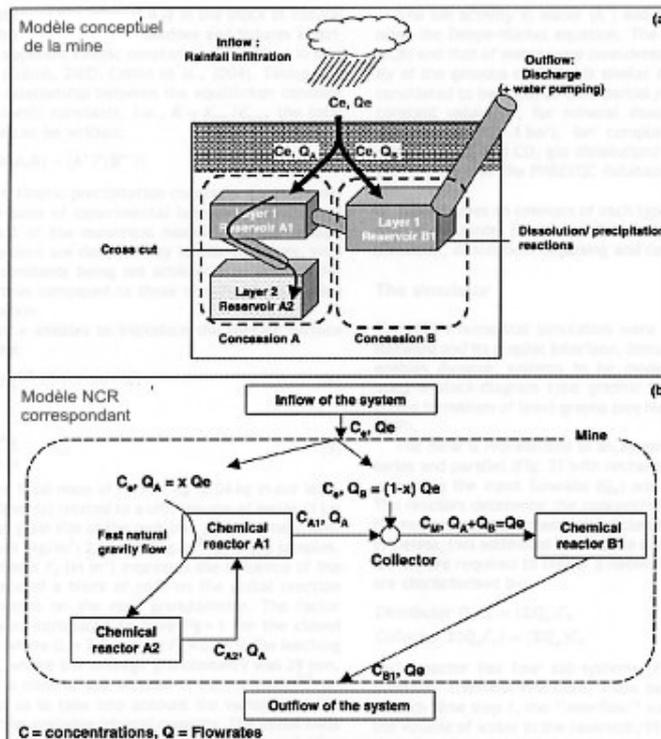


Figure 31 : Principe de la modélisation d'un réservoir minier avec un modèle NCR (réseau de réacteurs chimiques) (d'après Collon-Drouaillet et al., 2005)

Les réacteurs chimiques sont connectés en série ou en parallèle. Les réacteurs sont décrits par une position spatiale par rapport au système, un volume, les concentrations initiales des phases solide, liquide et gazeuse et les réactions chimiques liées à ces phases. Des liens hydrodynamiques sont établis entre ces phases.

Ce modèle intègre les caractéristiques du bassin houiller (géologie, hétérogénéité) contrairement au modèle semi-distribué (Collon et al., 2006). Cependant, dans cet exemple (bassin ferrifère lorrain), la géologie est plutôt homogène, ce qui n'est pas le cas dans toutes les zones minières notamment notre zone d'étude du bassin d'Alès. L'utilisation d'un tel modèle est efficace quand on possède peu de données piézométriques et géologiques (10 piézomètres dans cet exemple, ce qui demande malgré tout une information supérieure à celle disponible pour St Martin de Valgalgues).

Pour notre étude, le manque de données sur la qualité des eaux ne nous permet pas d'utiliser ces méthodes pour mieux connaître le fonctionnement hydrogéochimique du réservoir.

- Un troisième type de modèle est appelé hydrodynamique distribué c'est-à-dire à plusieurs dimensions (matrice 3D et fractures). Il a pour inconvénient de demander une bonne connaissance de la structure du système décrit (porosité, fracture) et des paramètres hydrogéologiques

I.7.2. Modélisation hydrodynamique

Le but de ce type de modèle est de comprendre et d'estimer les circulations qui se produisent dans le réservoir minier.

I.7.2.1. Modèles globaux (boîtes noires)

Plusieurs modèles ont été développés et sont basés sur deux méthodes dites « directe » et « inverse » :

- La méthode directe est utilisée lorsque les données d'entrées du système sont connues et consiste à donner : soit diverses valeurs soit une zone de répartition des paramètres structuraux puis par l'intermédiaire du modèle à obtenir un signal de sorties. Ces sorties simulées sont comparées aux sorties réelles.
- Dans le cas de la méthode inverse, nous connaissons les données entrantes et sortantes réelles et le but est de déterminer les paramètres structuraux 'les plus vraisemblables' (ex : coefficient d'emmagasinement, limites,...) pour obtenir un signal de sorties simulées proche du signal de sorties mesurées (d'après Bonnet, 1982).

Une méthode de modélisation inverse a été mise en œuvre dans le bassin ferrifère lorrain. Son principe consiste en l'élaboration d'une réponse impulsionnelle type entre entrées et sorties du système de manière à prévoir la réaction du réservoir minier en cas de conditions météorologiques extrêmes.

Les entrées dans le modèle du système minier sont la pluie et l'évapotranspiration potentielle, la sortie est le débit de l'exutoire. La relation entre entrées et sorties dite réponse impulsionnelle est donnée en fonction du temps. Le modèle global propose alors plusieurs réponses qu'il génère par itération afin d'obtenir le meilleur ajustement par rapport au débit de sortie (Figure 32).

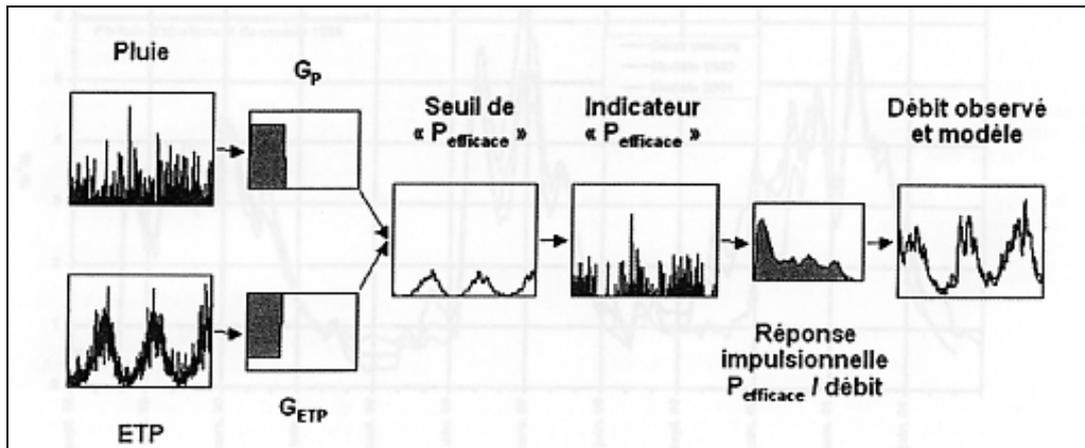


Figure 32 : Représentation schématique du calcul du modèle inverse (d'après Vaute et al., 2004)

Pour réaliser cette modélisation, il faut posséder des relevés complets du système (entrées et sorties) pour pouvoir déterminer le plus précisément possible la courbe impulsionnelle (Vaute et al., 2004) et ceci constitue une limite à l'utilisation de cette méthode dans notre cas.

D'après Ledoux (2003), un modèle 'boîte noire' s'utilise lorsqu'on considère les écoulements de manière globale. Son but est de trouver une relation entre des données d'entrées (précipitations) et des données de sorties (débit). On recherche alors un opérateur permettant de décrire la relation entrée/sortie.

Encore une fois, pour la zone étudiée, les données d'entrées et de sorties ne sont pas assez nombreuses pour mettre en œuvre ce genre de modélisation de plus, le pompage vient perturber l'écoulement naturel et donc le signal entre entrées et sorties.

1.7.2.2. Modèles distribués

1.7.2.2.1. Méthode des éléments finis

Cette méthode est utilisée pour résoudre numériquement des équations contenant des dérivées partielles. Ces équations peuvent représenter des comportements hydrodynamiques et de transport sur un domaine avec des conditions aux limites permettant d'assurer existence et unicité d'une solution. Dans notre cas, le milieu non homogène et géométriquement complexe obligerait à un maillage fin ; or nous disposons de peu de données pour le renseigner.

1.7.2.2.2. Réseau de tubes

La modélisation hydrodynamique peut être résolue par différents types d'outils : par assimilation des conduits miniers à des tubes, par éléments finis.

Pour un réservoir minier, les galeries et les puits creusés peuvent être assimilés à des réseaux de tubes interconnectés (Baubron et al., 2003).

Ce type de modèle tient compte de la géométrie particulière de l'aquifère et des écoulements qui en résultent.

La description du milieu peut être appréhendée de manière discrète et très détaillée en utilisant pour la matrice (partie non exploitée) un modèle assimilé à un milieu poreux. Les écoulements dans les fractures et les galeries seront simulés à l'aide d'un système de tube. (Lanini et al., 2000).

Pour le réservoir de St Martin de Valgalgues, la limite pour l'utilisation de ce modèle est la mauvaise connaissance des relations entre galeries et puits et leur répartition spatiale. Nous ne pouvons donc pas utiliser ce modèle. Les autres réservoirs de la zone d'étude ne sont pas assez bien renseignés pour pouvoir proposer une modélisation.

I.7.2.2.3. Modélisation par évènements discrets basé sur des machines séquentielles

Dans un modèle à évènements discrets basé sur des machines séquentielles, la réponse de chaque sous système crée une excitation pour le sous-système suivant (Bonnet, 1982) ; ainsi chaque sous-système peut représenter : les écoulements de surface, les écoulements hypodermiques, les écoulements souterrains dans notre cas. Notre choix s'est porté sur un modèle de ce type car il a été développé à l'Ecole des Mines d'Alès, nous permettant de le modifier et de l'adapter au site de Fontanes en prenant en compte le nombre réduit de piézomètres. L'originalité de notre modèle est aussi liée à la prise en compte des pompages réalisés dans le réservoir minier et qui modifient de ce fait son niveau piézométrique.

Ce modèle est peut être classé dans les modèles semi-distribués car il est basé sur une variabilité spatiale de l'occupation des sols et de l'évapotranspiration mais présente aussi une vision globale de la nappe.

I.7.3. Couplage de modèles hydrodynamique et chimique

I.7.3.1. Modèle de boîte couplé avec un modèle d'écoulement classique

Certains modèles permettent de traiter les deux aspects à la fois : circulation des eaux (ou le temps de remplissage du réservoir) et les réactions chimiques qui se produisent lors de cette circulation.

Ce problème peut être résolu par un modèle de boîte.

Le modèle proposé par Eckart et al. (2001) permet d'estimer plus précisément les phénomènes de drainage dans les mines ainsi que la prévision des sites d'impact de l'ennoyage sur les écosystèmes. Pour cela, on estime le flux au point d'exutoire ainsi que l'anticipation de la situation de ces points d'émergence. Une autre information déterminée par ce modèle est le temps d'ennoyage (temps pendant lequel le réservoir se remplit d'eau après l'arrêt de l'exhaure) et la charge de polluant pour les années qui suivent.

Les boîtes représentent les cavités de la mine. Entre chacune d'elles, il détermine la 'conductance' (m^2/s) selon différents paramètres.

- $C = k_f \cdot \frac{A}{s}$
- C peut aussi être obtenu aussi directement à partir d'une mesure

Où C est la conductance en m^2/s ; k_f = la conductivité hydraulique (m/s) ; s la distance entre les boîtes (m) ; A = l'aire rectangulaire traversée (m^2)

Chaque boîte contient des données sur : le volume de la réserve, la recharge, la décharge, le pH, l'Eh, la température, la concentration, l'apport de polluant, les minéraux typiques. A l'intérieur de chaque boîte, les niveaux supérieur et inférieur sont géoréférencés. Le modèle des boîtes est ensuite combiné à un modèle classique d'écoulement dans les aquifères.

La balance de masse peut être équilibrée au fur et à mesure de l'évolution du système et permet de recalibrer le modèle, à chaque pas de temps, et donc d'ajuster les prédictions en temps réel. Les connections hydrauliques peuvent être déterminées pendant la phase d'ennoyage. Le manque de données sur la structure interne du réservoir minier et sur les réactions chimiques précises se produisant dans le réservoir limite l'utilisation de ce modèle dans notre cas.

I.7.3.2. *Modèle de tube simulant débit et paramètres physico-chimiques*

Le modèle de tube décrit dans les modèles hydrodynamiques peut par le même principe de tube et de nœuds fournir la concentration en sortie et demande comme le modèle précédent une bonne connaissance de la structure interne du réservoir (Figure 33).

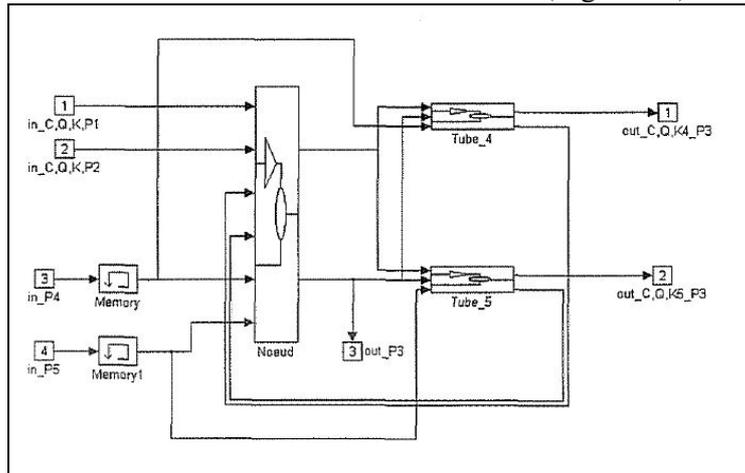


Figure 33 : Schéma d'ensemble d'un motif de base du réseau avec les grandeurs C (conductance), Q (débit), K (concentration chimique) d'après Lanini et al., (2000)

I.8. Conclusion du chapitre I

Les circulations d'eaux souterraines peuvent se produire à l'intérieur de différents types de terrains sur la zone d'étude. Les formations au sein des calcaires du Lias et des dolomies de l'Hettangien constituent un réservoir connu et utilisé représentant un recouvrement de la zone de 45% avec des signes de karstification. Les terrains houillers représentent environ 23% de la surface de la zone d'étude et ils sont considérés comme imperméable à l'état naturel. Les parties exploitées en grande partie par foudroyage constituent aujourd'hui des réservoirs potentiels d'eaux souterraines.

Au total, au moins la moitié de la zone d'étude permet des écoulements souterrains que ce soit par l'intermédiaire de drains karstiques ou d'anciens conduits de mine, ou de vides produits par foudroyage. Ces vides se remplissent par les eaux de précipitations notamment quand ils sont superficiels. Les eaux qui en ressortent sont chargées en minéraux et le chapitre suivant va s'attacher à en décrire l'origine par différentes méthodes d'analyses.

CHAPITRE II :

VALORISATION SPATIALE ET TEMPORELLE DES DONNEES MESUREES A L'EMERGENCE DES ANCIENS TRAVAUX MINIERES

L'étude et la valorisation des données concernant l'eau des émergences étudiées dépendent de la quantité de mesures disponible. Au préalable une description de ces données est donc indispensable. Une critique de la qualité des données sera faite et porte sur la précision des mesures, leur nombre et leur répartition temporelle.

II.1. Les données

II.1.1. Nature des données

La majeure partie des données proviennent du bureau d'étude CESAME (St Etienne). Il s'agit à la fois de mesures de chimie des eaux aux émergences de mines, de mesures de débits sur les cours d'eau et les émergences, et de quelques mesures de niveaux piézométriques. Plusieurs sites internet recensent des données notamment sur les niveaux d'eaux dans les rivières et les eaux souterraines : InfoTerre (BRGM), ADES (site internet Eaufrance), Banque hydro (site internet Banque hydro).

II.1.2. Pré-classement des données

L'ensemble des analyses chimiques d'eaux ont été classées selon un modèle identique, en conservant à chaque fois le même ordre dans le tableau des paramètres analysés.

II.1.3. Qualité des données

Les informations recueillies étaient déjà triées par le bureau d'étude CESAME. Nous avons complété cette critique en faisant le calcul d'erreur sur la balance ionique de chaque campagne d'analyse (Tableau 16) d'après la formule :

$$\text{Erreur sur le bilan ionique} = ((\Sigma \text{ cation} - \Sigma \text{ anion}) / (\Sigma \text{ cation} + \Sigma \text{ anion})) * 100$$

Cations: Ca, Mg, Na, Fe, Mn
Anions: Cl, SO₄, HCO₃

Le rapport entre la conductivité et la somme des anions et des cations permet aussi de confirmer la bonne qualité des données qui vont être utilisées (Figure 34). Le rapport entre les abscisses et les ordonnées est linéaire preuve d'erreurs limitées sur les mesures. Nous pouvons noter que l'émergence de Larrieux présente une exception car elle possède un point qui sort de la droite de régression, la qualité de l'analyse correspondante peut être remise en cause.

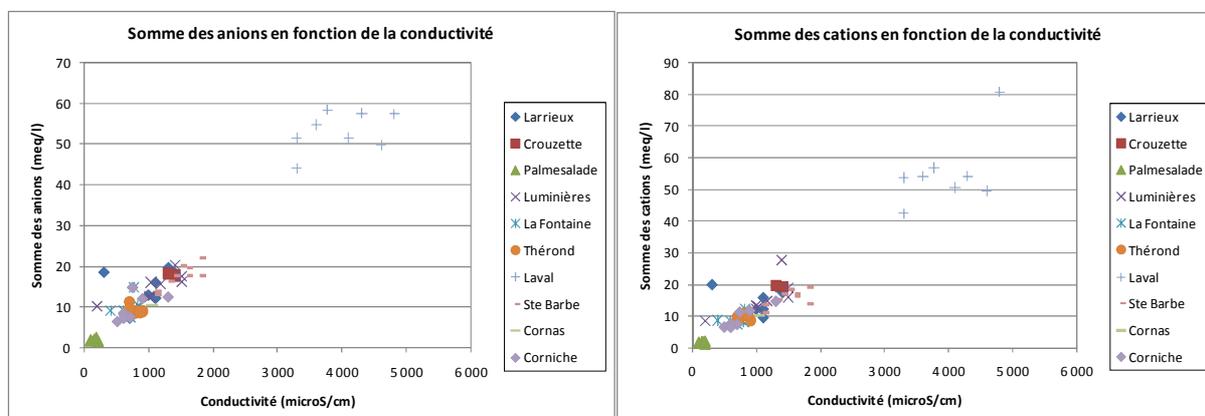


Figure 34 : Représentation de la somme des cations et des anions en fonction de la conductivité

Une partie de ces mesures a été faite par le laboratoire d'analyse Bouisson-Bertrand dont les erreurs de mesures sur les analyses pour 2007 sont :

Paramètres	TAC	pH	Conductivité	Mg	Ca	Chlorures
Incertitudes en % (sauf pH)	4	0,07 u pH	4	9	13	9

Paramètres	SO ₄ ²⁻	K	Na	MES	As	Fe
Incertitudes en % (sauf pH)	22	8	10	11	27	11

II.1.4. Quantité de données disponibles

Au total, 38 émergences ont été analysées (Figure 132) et leur nom apparait dans le Tableau 15.

Tableau 15 : Nom des concessions et des émergences étudiées

Nom de la concession	Émergences
Rochebelle et St-Martin de Valgalgues	Fontanes
Robiac - Meyrannes	St-Illyde-St-François, Silhol, Chalmeton, les galeries St-Jacques, du Rieusset, des Brousses 1 et des Brousses 2
Grand' Combe Ouest	Les Oules, Laval, Ricard, Luminières, Corniche, Ste-Barbe, Cornas, Trouche, le puits Pontil, Verrerie, Travers Banc (TB) Malbosc, Crouzette, la Fontaine, Théron, Palmesalade, TB Larrieux, Mas Blanc
Grand Combe Est	Combe Ferral
Tréllys Palmesalade	St-Hippolyte, St-Christian, St-Simon, St-Denis, St Hélène, les galeries du piqueur, du plan, Crouzoul haut, N2 Mercoirol, du Mas Lauze et Broussous, les Estéraings

Pour les analyses chimiques, 18 d'entre d'elles ont fait l'objet de moins de 3 campagnes de prélèvement et ne seront pas retenues car les données sont trop peu nombreuses et ne permettent pas de savoir si elles sont représentatives et les 17 autres possèdent plus de 3 campagnes d'analyses (voir Figure 35 et Figure 133). Pour les analyses de données, l'émergence de St-Illyde – St-François a été éliminé car, bien que possédant 3 campagnes d'analyses, ses campagnes sont relativement incomplètes et ne permettent pas un comparatif des résultats avec les autres émergences. Au final, 16 émergences sont retenues pour les analyses de données suivantes (Figure 134).

Tableau 16 : Synthèse sur la période et le nombre de données disponibles par émergence

Nom de la concession	Nom de l'émergence	Date de la première analyse disponible	Date de la dernière analyse disponible	Nombre total de campagnes d'analyses disponibles	Erreur sur le bilan ionique (%)
Rochebelle-St-Martin	Fontanes	06/95	10/07	106	
Robiac	Silhol	05/74	07/01	21	0,86
Grand' Combe W	TB Larrieux	01/97	04/98	10	0,09
Grand' Combe W	Palmesalade	01/97	06/98	10	-5,20
Grand' Combe W	Luminières	01/97	04/98	10	-1,30
Grand' Combe W	La Fontaine	01/97	04/98	10	-2,72
Grand' Combe W	Théron	01/97	05/98	10	2,64
Grand' Combe W	Corniche	01/88	12/97	10	-3,2
Grand' Combe W	Laval	01/97	04/98	10	0,22
Grand' Combe W	Ste Barbe	01/78	04/98	10	-5,28
Robiac	Chalmeton	05/74	07/01	6	1,75
Trélys	Les Estéraings	04/63	07/01	5	3,19
Grand' Combe W	Cornas	01/97	07/98	4	-0,54
Robiac	St-Illyde	02/99	01/01	3	3,83
Grand' Combe W	Crouzette	01/97	04/98	3	1,26
Grand' Combe W	Verrerie	01/74	01/84	3	-
Grand' Combe W	Mas Blanc	01/78	07/98	3	-4,38
Grand' Combe W	Malbosc	10/85	-	1	0,30
Grand' Combe W	Les Oules	11/85	-	1	2,73
Grand' Combe W	Ricard	01/78	-	1	-
Grand' Combe W	Puits Pontil	01/67	-	1	-
Grand' Combe W	Trouche	07/98	-	1	0
Trélys	St Christian	01/01	-	1	9,65
Trélys	St Simon	01/01	03/01	2	7,34
Robiac	Les Brousses1	01/01	-	1	10,01
Trélys	Ste Hélène	01/01	-	1	7,60
Trélys	Galerie piqueur	01/01	-	1	-0,39
Trélys	N2 Mercoirol	01/01	-	1	7,04
Grand' Combe E	Combe Ferral	01/01	-	1	5,3
Trélys	St Hyppolite	03/01	-	1	0,48
Trélys	Broussous	03/01	-	1	5,05
Robiac	Rieusset	01/01	-	1	1,38
Robiac	Brousses2	01/01	-	1	2,07
Robiac	St Jacques	01/01	03/01	2	-0,27
Trélys	Mas Lauze	01/01 (que le débit)	07/01 (que le débit)	3	
Trélys	Crouzoul haut	01/01 (que le débit)	07/01 (que le débit)	3	
Trélys	Galerie du plan	01/01 (que le débit)	07/01 (que le débit)	3	
Trélys	St Denis	01/01 (que le débit)	07/01 (que le débit)	3	

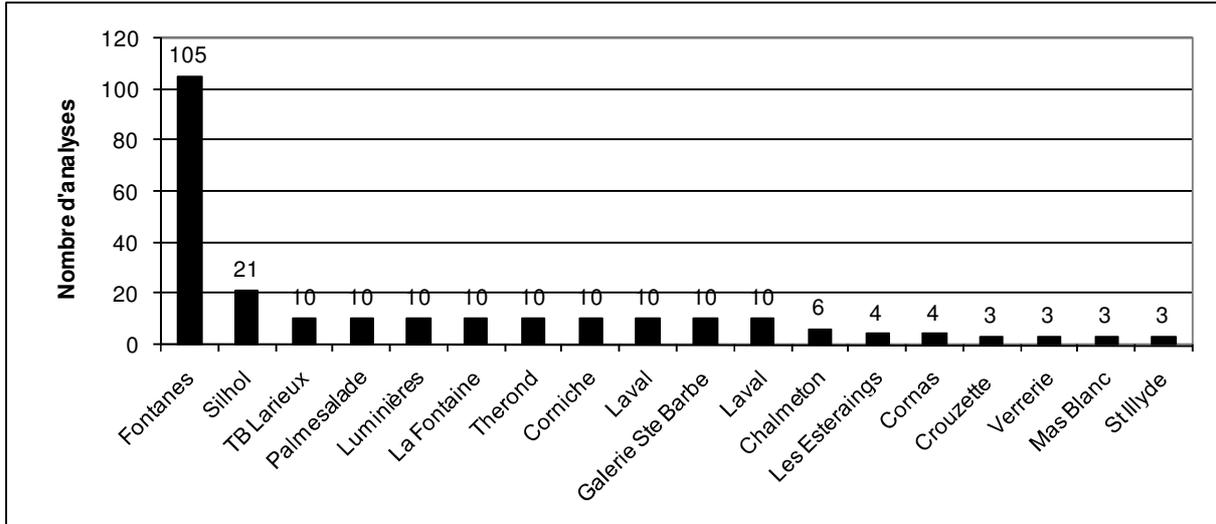


Figure 35 : Nombre de campagnes d'analyses totales par émergences lorsque le nombre est au moins égal à trois

Pour chaque émergence, le nombre de mesures est très variable selon l'élément considéré (Figure 36) ainsi que la répartition temporelle de ces mesures (Figure 37, Figure 38 et Figure 39).

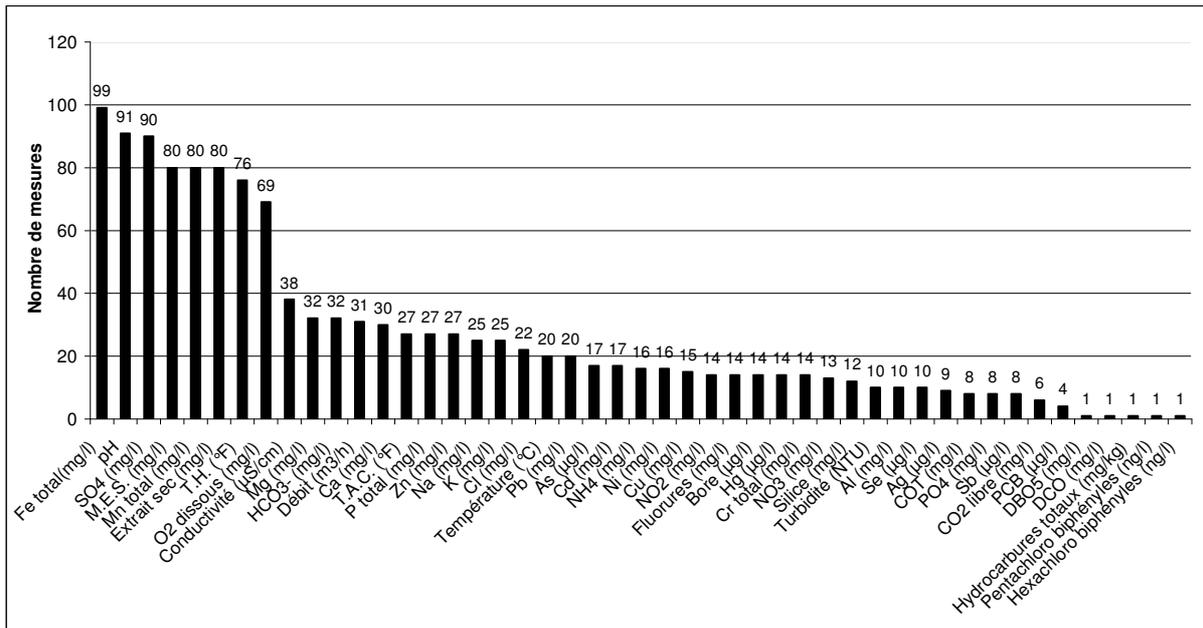


Figure 36 : Répartition du nombre de mesures par élément sur l'ensemble des données

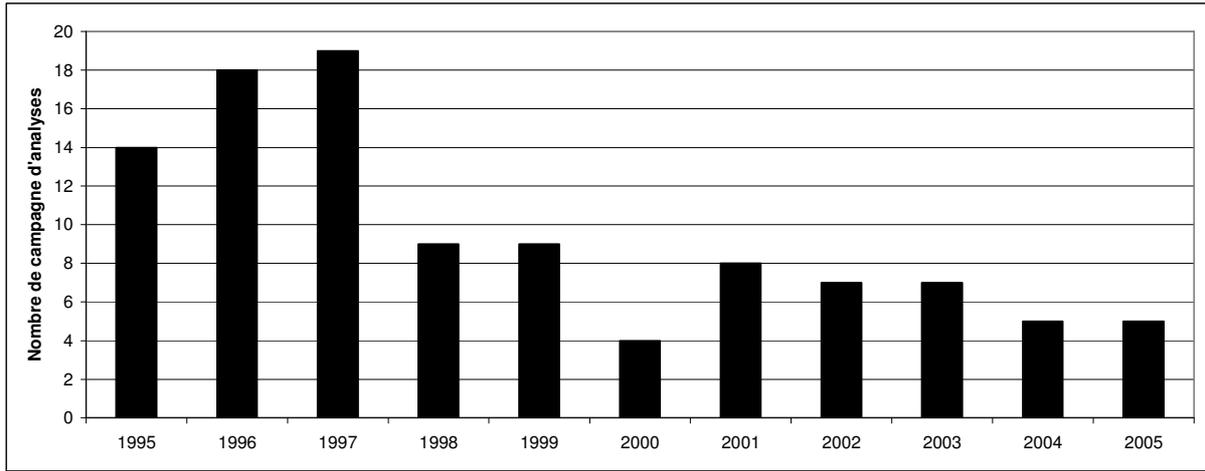


Figure 37 : Répartition du nombre de campagne d'analyses par année pour le site de Fontanes

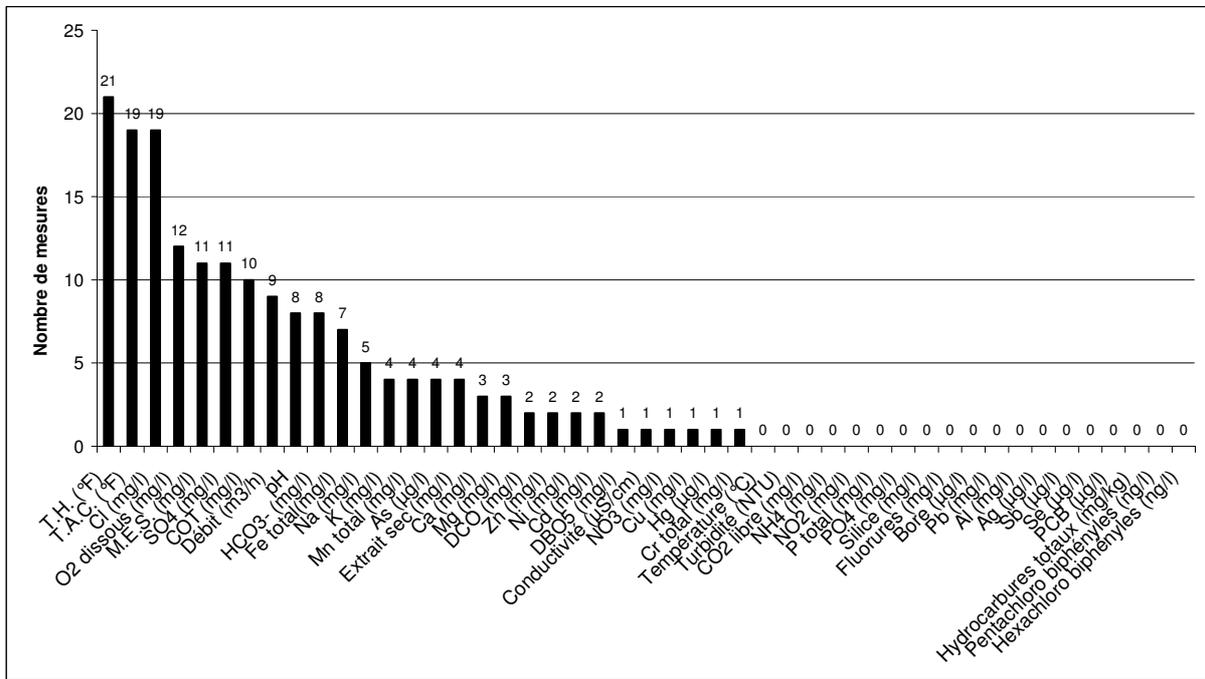


Figure 38 : Nombre de mesure totale par élément pour le site de Silhol entre 1974 et 2001

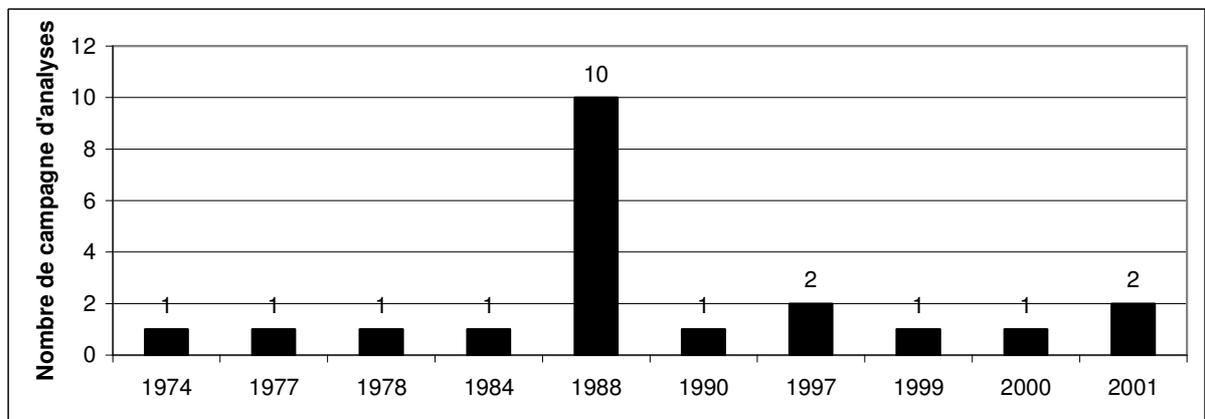


Figure 39 : Répartition des campagnes d'analyses en fonction des années pour le site de prélèvement de Silhol

II.2. Matrice des distributions et des relations entre éléments chimiques et paramètres

Cette représentation (Figure 40) permet de mettre en évidence les relations existantes entre 2 éléments ou paramètres.

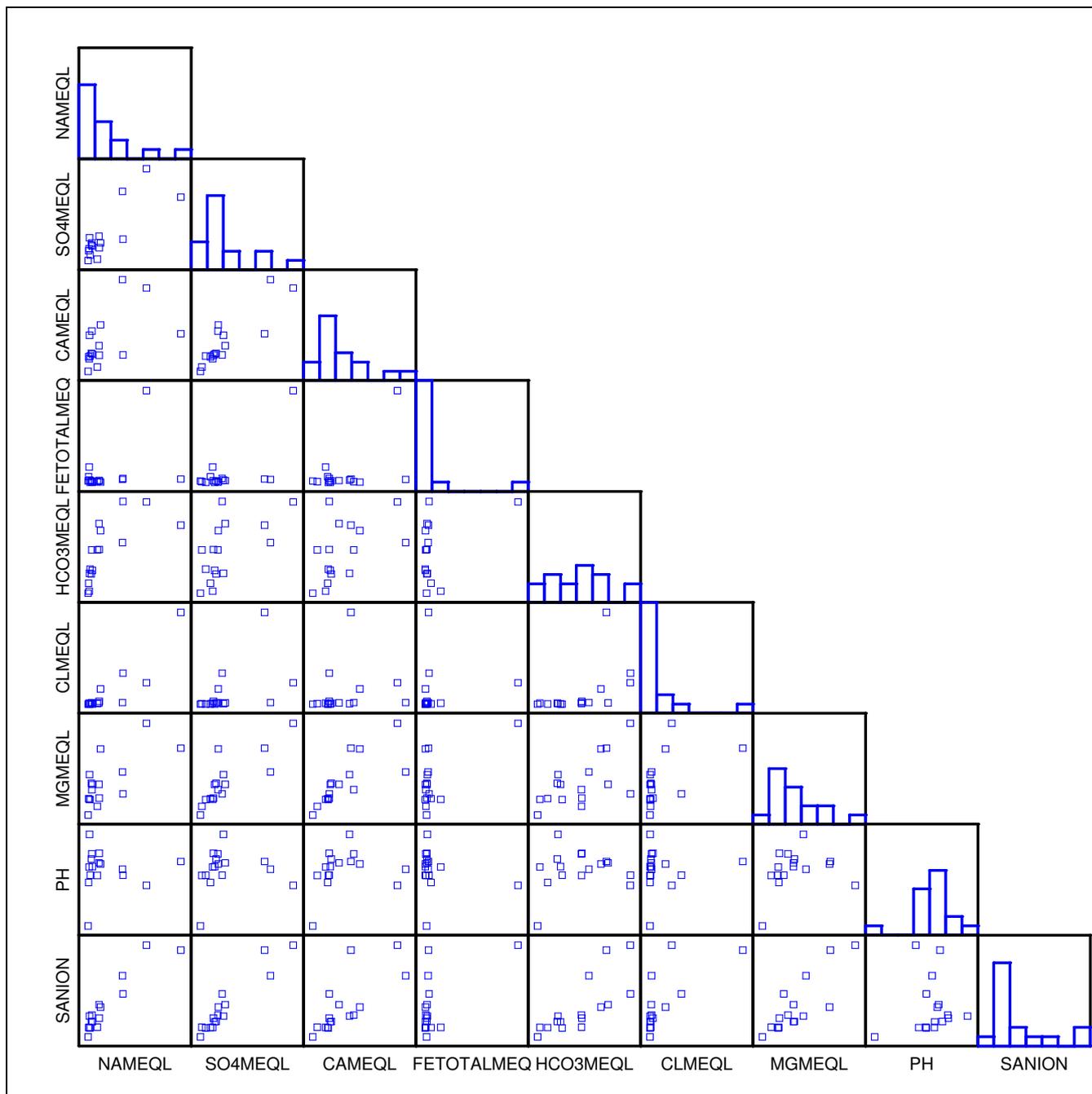


Figure 40 : Matrice des distributions et des relations entre éléments chimiques et paramètres (Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Fe_{total} , HCO_3^{2-} , Cl^- , Mg^{2+} , pH)

Lorsque la case considérée représente un nuage de points repartis dans l'ensemble de la case, les relations entre les 2 éléments considérés ne sont pas marquées. De même, si les points sont alignés horizontalement ou verticalement dans la case, la corrélation entre les 2 éléments représentés n'est pas avérée.

Par contre, si nous obtenons une suite de points ordonnés (non verticalement et non horizontalement) une relation existe entre les deux éléments considérés. Ce type de représentation nous permet de discerner globalement des paires d'éléments dont nous affinerons la nature des liens avec les analyses suivantes (ACP, diagrammes de Schoeller-Berkalov et de Piper).

Les histogrammes représentent les effectifs de l'élément ou du paramètre considéré par classes de concentrations ou de valeurs.

Les éléments majeurs bien corrélés sont Na^+/Cl^- , $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$, $\text{Mg}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$, $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$, somme des anions/ Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , HCO_3^{2-} , Mg^{2+} .

Pour mieux définir l'origine des sulfates à travers les couples $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ et $\text{Mg}/\text{SO}_4^{2-}$, nous utiliserons une méthode permettant de faire apparaître les liens dominants entre éléments tel que l'ACP et donc de retrouver les équations en jeu pour la production des sulfates.

Le couple Na^+/Cl^- présente une bonne corrélation, l'équation définissant leur lien est l'équation (5). Nous vérifierons si d'autres réactions moins prépondérantes n'entrent pas en jeu pour la formation du Na^+ à travers les ACP.

II.3. Analyses statistiques

Les concentrations en éléments dans les eaux souterraines n'évoluent pas de façon indépendante les unes des autres. Bien au contraire, elles sont souvent plus ou moins corrélées ne serait ce que pour des raisons chimiques ou physiques (Blum et al., 2001 p143). Les éléments mesurés dans l'eau décrivent le faciès de l'eau et au moins une partie de son parcours dans les terrains où les phénomènes suivant peuvent se produire :

- la dissolution (réactions (3), (5) et (8))
- l'oxydation et la réduction (réaction (1a et b))
- l'hydrolyse (réactions (6) et (7))
- la précipitation

Pour faire apparaître des liens entre les différents paramètres (concentrations chimiques et paramètres physiques), un traitement statistique permet dans un premier temps de classer les données.

Les sulfates ont au moins deux origines possibles : la dissolution du gypse et l'oxydation de la pyrite. Nous allons représenter les éléments constituant les équations chimiques conduisant à la production de sulfates, dans les ACP, pour connaître les liens entre eux.

De même, le sodium et les chlorures peuvent avoir comme origine la dissolution de la halite et l'hydrolyse de certains minéraux alumino-silicatés, comme précédemment nous allons représenter les éléments produits dans les équations conduisant à la formation de Na^+ et Cl^- afin de déterminer l'origine dominante de ces éléments dans l'eau.

II.3.1. Analyse en composantes principales (ACP)

II.3.1.1. Description de la méthode

L'analyse en composantes principales est une méthode statistique dont le but est de comprendre et de visualiser comment des variables a priori indépendantes se combinent. Cette méthode mathématique d'analyses de données consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre n variables aléatoires (source wikipedia). Pour chaque individu, un certain nombre de variables est disponible et nous souhaitons connaître les liens entre ces différentes variables pour un même individu. Cette méthode a deux intérêts : faire apparaître un lien, s'il existe, entre les variables et mettre en évidence une

évolution entre celles-ci, dans le même sens ou à l'opposé. De plus, le lien peut être quantifié à travers un coefficient de corrélation. Le résultat se présente sous une forme graphique représentant le maximum de l'information contenu dans une table de données à analyser et la répartition des individus qui se ressemblent ou non. Le tableau de données représenté par ACP est constitué par des individus (lignes du tableau) qui sont dans notre cas (Tableau 17) 16 émergences minières et des variables, c'est-à-dire les paramètres physico-chimiques dans les colonnes du tableau (Philippeau, 1986).

D'après Philippeau (1986), *'si le tableau de données comporte p variables quantitatives, alors les individus peuvent être représentés dans un espace à 'p dimensions'... 'Le but de l'ACP est de trouver des espaces de dimensions plus petites à 1 ou 2 dimensions. Les droites et les plans issus d'une ACP ne sont pas réalisés avec les variables initiales mais avec des 'indices synthétiques' obtenus par ce que les statisticiens appellent des 'combinaisons linéaires' de ces variables initiales. L'ACP recherche l'indice qui permet de voir au mieux les individus, c'est-à-dire pour lequel la variance des individus est maximale : cet indice est appelé première composante principale ou premier axe principal. Le deuxième axe fournit la plus grande information possible complémentaire de la première.*

Sur chaque axe de l'ACP, un pourcentage représentant la part de toute l'information initiale 'visible' sur chaque axe est noté.

Pour expliquer le calcul conduisant à ces pourcentages il faut noter qu'une valeur propre représente la variance des individus sur l'axe correspondant. Chaque variance (aussi appelée valeur propre) va être exprimée en valeur relative (dans notre cas c'est un pourcentage) de la variance totale (somme des valeurs propres).

Dans une ACP sur des données centrées réduites ce qui est notre cas, chaque variable initiale a, par définition, une variance égale à 1 ; donc la somme des variances est égale au nombre de ces variables initiales.

Par conséquent, le rapport de chaque valeur propre (λ_i) à la somme de toutes les valeurs propres ($\sum \lambda_i = p$) fournit la part de toute l'information initiale « visible » sur chaque axe.

Pour cette étude, nous avons utilisé le logiciel Statbox 6 qui s'applique sur des données centrées-réduites.

II.3.1.2. Résultats des ACP sur les paramètres communs à toutes les émergences

Cette première série d'ACP utilise comme individus les 16 émergences sélectionnées et comme variables les valeurs moyennes de 10 paramètres physico-chimiques (Tableau 17) sélectionnés sur la zone d'étude. Le choix des variables selon les ACP peut être différent et permet d'obtenir des résultats différents.

Plusieurs résultats sont observables :

- l'origine des sulfates
- l'influence de l'équilibre redox et de la dissolution ;
- la part entre l'hydrolyse et le pôle dissolution ;
- les variables liées au fer ;

Les données utilisées se trouvent dans le Tableau 17. Nous avons choisi de faire les ACP à partir d'une valeur moyenne de chaque élément par émergence. La moyenne nous paraît plus représentative. Aucune date de prélèvement n'étant commune à l'ensemble des émergences, nous n'aurions pu retrouver les mêmes conditions climatiques lors de l'échantillonnage.

Tableau 17 : Valeurs moyennes par élément et par émergence utilisées pour l'ACP

MOYENNE	Na⁺ (meq/l)	SO₄²⁻ (meq/l)	Ca²⁺ (meq/l)	Fe total (meq/l)	HCO₃⁻ (meq/l)	Cl⁻ (meq/l)	Mg²⁺ (meq/l)	pH	H⁺ (meq/l)	Mn²⁺ (meq/l)
Chalmeton	2,4	12	11,1	1,1.10 ⁻²	7,8	0,6	5,9	7,6	2,7.10 ⁻⁵	0,01
Cornas	5,6	2	1,8	1,3.10 ⁻²	7,8	0,4	2,6	6,9	1,2.10 ⁻⁴	0,01
Corniche	0,4	7,4	4,4	10,4.10 ⁻²	2,2	0,3	4,1	6,7	1,9.10 ⁻⁴	0,05
Fontanes	34,6	58,4	22,3	1,7	16	5,6	18,9	6,7	2,3.10 ⁻⁴	0,3
Galerie Crouzette	0,9	15,4	10	4.10 ⁻²	3,9	0,3	8,8	8,1	7,4.10 ⁻⁶	0,02
La Fontaine	0,8	8,7	3,9	27,9.10 ⁻²	0,9	0,5	3,9	7,2	6,6.10 ⁻⁵	0,08
Laval	20,4	44,3	24,4	5,4.10 ⁻²	9,1	0,6	9,3	7,1	7,7.10 ⁻⁵	0,06
Les Estérais	6,7	16,5	7,3	3,5.10 ⁻²	12,2	0,6	6,9	7,3	5.10 ⁻⁵	0,02
Lumières	2,7	10,1	5,1	0,3.10 ⁻²	4,3	0,3	6,9	7,2	6,5.10 ⁻⁵	0,00
Mas Blanc	7,4	12,2	12,7	0,7.10 ⁻²	11,1	4	13,9	7,3	5,4.10 ⁻⁵	0,01
Palmesalade	0,2	1,3	0,6	2,6.10 ⁻²	0,5	0,3	0,9	5,5	3,4.10 ⁻³	0,02
Silhol	54,9	40,7	10,4	6.10 ⁻²	12	23	14	7,3	4,6.10 ⁻⁵	0,02
Ste Barbe	6,8	9,2	4,8	3,2.10 ⁻²	7,9	0,9	4,2	7,6	2,6.10 ⁻⁵	0,01
TB Larrieux	2	10,8	5,3	2,8.10 ⁻²	3,8	0,5	7,1	7,4	3,9.10 ⁻⁵	0,00
Thérond	1,4	4,6	4,6	0,2.10 ⁻²	4,6	0,3	3,9	6,9	1,1.10 ⁻⁴	0,00
Verrerie	20,7	14,6	4,9	7.10 ⁻²	16	7,9	5	7,2	6,3.10 ⁻⁵	0,02

L'émergence « La verrerie » présente une exception car sur l'ensemble des campagnes de mesures faites sur ce site une seule est complète, les valeurs correspondante dans ce tableau ne sont pas le résultat d'une moyenne.

Une campagne de mesure a été faite en juillet 2008 (Tableau 18) pour clôturer les séries de mesures déjà disponibles; cependant un grand nombre d'émergences est peu accessible (végétation dense, fermeture des accès par des murs) et le nombre d'émergences mesurées a donc été faible. Le tableau ci-dessous présente les valeurs moyennes (sur trois mesures) réalisées sur le terrain pour TB Larrieux, Ste Barbe et Crouzette. Pour TB Larrieux et Ste Barbe, le pH est similaire à la moyenne du Tableau 17. Les dernières mesures de terrain de Crouzette (Tableau 18) sont inférieures à la moyenne du Tableau 17.

Les conductivités sont supérieures à celles de 1997-98 pour Larrieux et Crouzette.

Tableau 18 : Moyennes des relevés de terrain de Juillet 2008

Nom de l'émergence	Conductivité moyenne en Juillet 2008 (µS/cm)	pH (t°)	Oxygène dissous (mg/l)
TB Larrieux	1749 (1400 en 07/97)	7,02 (16,1)	8
Ste Barbe	1145 (1400 en 07/97)	7,44 (16,3)	2,6
Crouzette	1936 (1300 en 04/98)	6,53 (20)	4

II.3.1.2.1. ACP n°1 : Variables (ions majeurs, fer total, pH et somme des anions) sur 15 émergences

Dans un premier temps, nous avons utilisé en variable, les ions dont les concentrations sont les plus élevés sur l'ensemble des émergences (sauf Verrerie) afin de voir si des liens existent entre eux.

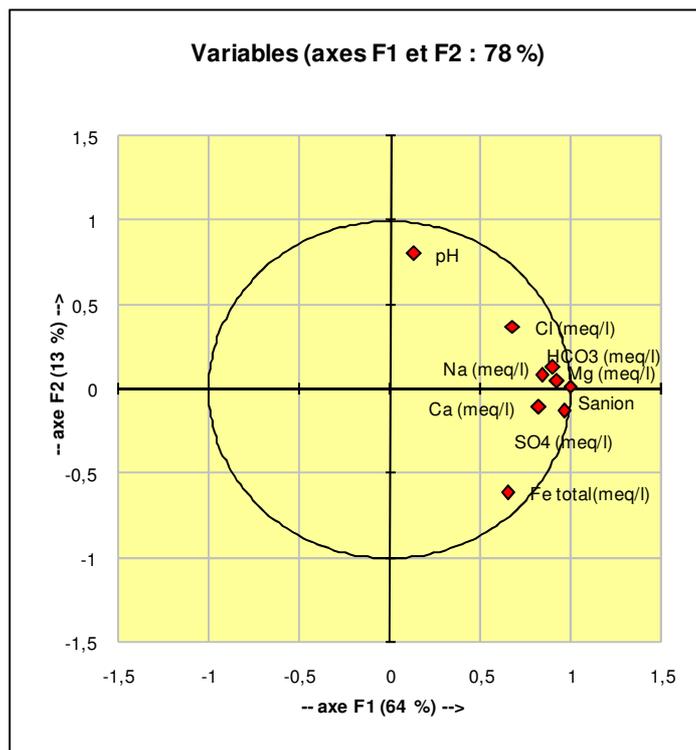


Figure 41 : Représentation de la répartition des variables (SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^{2-} , Na^+ , Fe total, pH et la somme des anions) pour les 15 émergences de l'ACP n°1

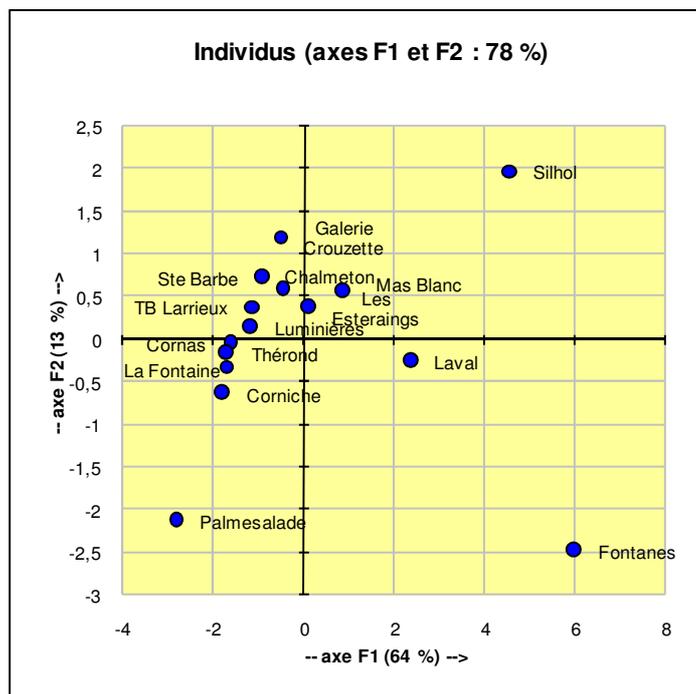


Figure 42 : Représentation de la répartition des individus (16 émergences) de l'ACP n°1 utilisant les variables SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^{2-} , Na^+ , Fe total, pH et la somme des anions

Tableau 19 : Matrice de corrélation

	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Fe total	HCO ₃ ²⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	pH	Sanion
Na ⁺	1	0,83	0,55	0,43	0,69	0,89	0,73	0,02	0,93
SO ₄ ²⁻	0,83	1	0,88	0,67	0,71	0,53	0,83	0,07	0,97
Ca ²⁺	0,55	0,88	1	0,53	0,66	0,23	0,77	0,18	0,80
Fe total	0,43	0,67	0,53	1	0,49	0,14	0,62	-0,22	0,60
HCO ₃ ²⁻	0,69	0,71	0,66	0,49	1	0,48	0,77	0,20	0,81
Cl ⁻	0,89	0,53	0,23	0,14	0,48	1	0,57	0,08	0,71
Mg ²⁺	0,73	0,83	0,77	0,62	0,77	0,57	1	0,23	0,87
pH	0,02	0,07	0,18	-0,22	0,20	0,08	0,23	1	0,10
Sanion	0,93	0,97	0,80	0,60	0,81	0,71	0,87	0,10	1

L'axe F1 représente 64% de l'information et l'axe F2, 13%. La somme de l'information totale accessible sur ces deux axes est de 78%.

Les variables sont proches sur la Figure 41 (sauf pH et Fe total), il est difficile de voir les liens dominants. Nous affinerons les groupes de variables analysées sur les ACP par la suite. Sur la Figure 42, trois émergences se distinguent : les émergences de Silhol et Fontanes qui sont les émergences présentant le plus d'extraits secs et l'émergence de Palmesalade qui a le moins d'extraits secs sur l'ensemble des émergences de la zone d'étude.

II.3.1.2.2. ACP n°2 : Variables (SO₄²⁻, Ca²⁺ + Mg²⁺, Fe_{total} et somme des cations et des anions) sur 16 émergences

Nous pouvons noter que les sulfates sont présents en fortes concentrations dans certaines émergences. Les Figure 43 et Figure 44 représentent les ACP qui tiennent compte des variables pouvant intervenir dans la formation de sulfates soit par dissolution du gypse (SO₄²⁻ et Ca²⁺) et l'oxydation de la pyrite avec Fe²⁺ et SO₄²⁻.

Tableau 20 : Matrice de corrélation

	SO ₄ ²⁻	Fe total	Somme cation+ anion	Ca ²⁺ +Mg ²⁺
SO ₄ ²⁻	1	0,67	0,95	0,91
Fe total	0,67	1	0,57	0,60
Somme cation+ anion	0,95	0,57	1	0,85
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	0,91	0,60	0,85	1

L'ACP n°2 utilise comme variables, les éléments associés aux réactions chimiques induisant la formation des sulfates présents en fortes quantités dans certaines des eaux analysées (SO₄²⁻, Fe_{total}, la somme de Ca²⁺ et Mg²⁺, et la somme des cations et des anions) et les individus sont les 16 émergences sélectionnées.

L'axe F1 représente 82% de l'information et l'axe F2, 13%. La somme de l'information totale accessible sur ces deux axes est de 95%.

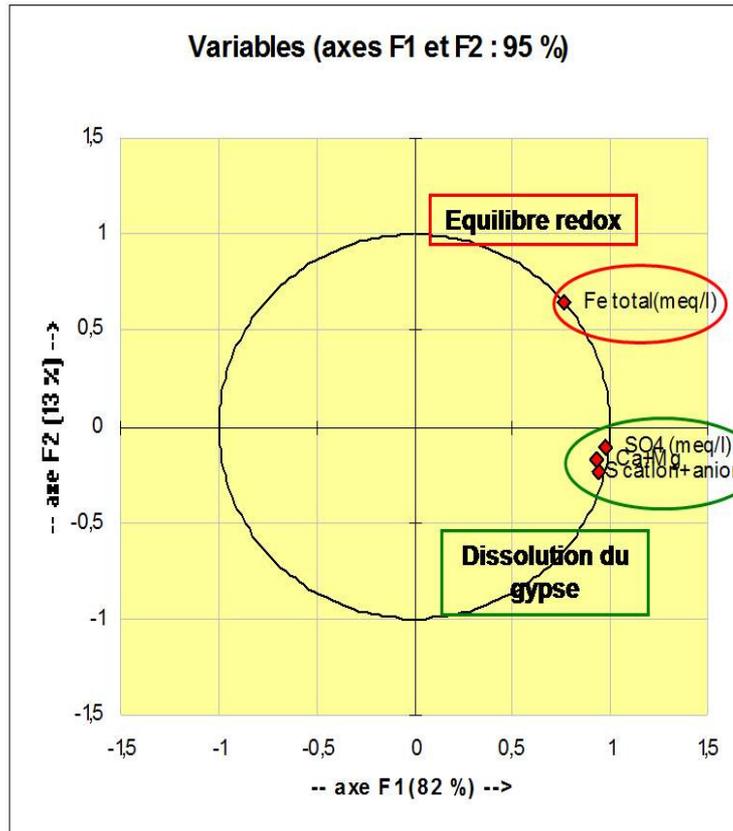


Figure 43 : Représentation de la répartition des variables (SO_4^{2-} , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$ et Fe^{2+} et la somme des cations et des anions) de l'ACP pour les 16 émergences de l'ACP n°2

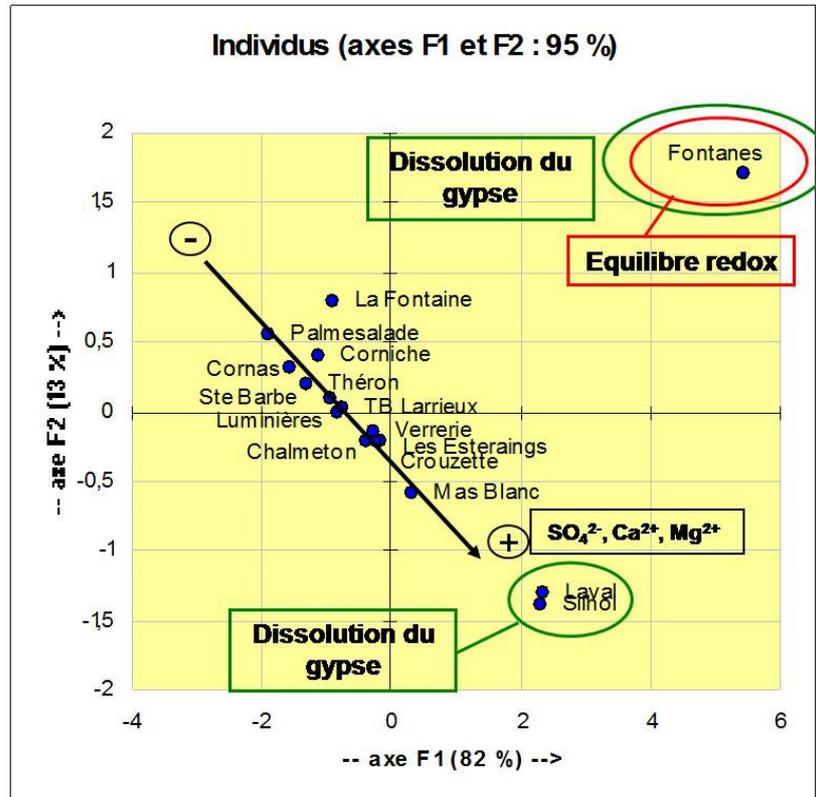


Figure 44 : Représentation de la répartition des individus (16 émergences) de l'ACP n°2 utilisant les variables SO_4^{2-} , $\text{Ca}^{2+}+\text{Mg}^{2+}$, Fe^{2+} et la somme des cations et des anions.

Les variables SO_4^{2-} , $\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$ sont fortement liées (Tableau 20) sur cette ACP n°2 tandis que le fer se retrouve isolé (Figure 44). En général, pour les émergences, les sulfates et la somme de Mg^{2+} et Ca^{2+} sont proches, ce qui indique que les sulfates proviennent de la dissolution de gypse dans les terrains triasiques de la zone étudiée. Le fer est éloigné des sulfates ce qui nous indique que l'oxydation de la pyrite (pôle redox) est moins dominante que la dissolution du gypse (pôle dissolution) pour la création de sulfates. De plus, le lien avec l'élément Mg^{2+} provient de la présence de dolomie dans les terrains triasiques. Les terrains autres que le charbon en contact avec le réservoir minier ont donc une influence sur la qualité des eaux à l'émergence minière.

L'émergence de Fontanes, est à la fois influencée par l'équilibre redox dont elle est le point le plus proche mais sa contribution à l'axe 1 est également importante ce qui semble signifier que la part de dissolution du gypse dans cette émergence est également importante, nous pouvons dire que la dissolution joue aussi un rôle pour l'origine pour les sulfates (la distance entre l'équilibre redox et les autres émergences est beaucoup plus importante).

L'équilibre redox est défini par la présence de fer dans les eaux sachant que celui-ci est produit par oxydoréduction de la pyrite.

Deux pôles se distinguent sur cette ACP (dont les individus sont les 16 émergences sélectionnées) un pôle équilibre redox qui influence fortement l'émergence de Fontanes et, à moindre échelle, celle de la Fontaine tandis que les autres émergences suivent une évolution selon un axe dirigé vers le pôle dissolution (entre le plus et le moins) (Figure 44).

Les émergences Silhol et Laval sont proches et se retrouvent dans la zone représentant une forte influence du pôle dissolution du gypse et de la dolomie (SO_4^{2-} , $\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$) tandis que Fontanes est très proche de la variable fer et du pôle que nous pourrions nommer équilibre redox (Figure 43).

II.3.1.2.3. ACP n°3 : Variables (SO_4^{2-} , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ et Fe^{2+} et la somme des cations et des anions) sans les émergences de Laval, Fontanes et Silhol

Afin d'affiner le résultat de l'ACP précédente et de mieux observer le groupe contenant la majorité des émergences (Figure 44), nous décidons de reproduire l'ACP n°2 en éliminant les émergences de Laval, Fontanes et Silhol qui sont isolées du groupe principal.

Sur l'ACP n°3, l'axe F1 représente 63% de l'information et l'axe F2, 25%. Au total 88% de l'information est accessible sur ces deux axes.

En éliminant les émergences aux extrêmes du groupe principal de l'ACP n°2 (Fontanes, Silhol, Laval), la répartition des émergences montre que La Fontaine se trouve plus proche du pôle équilibre redox (Figure 45 et Figure 46) tandis que les autres émergences se répartissent en fonction de SO_4^{2-} et $\text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$ (0,72 de corrélation - Tableau 21) appelés pôle dissolution du gypse (axe représenté par une flèche de la Figure 46). Ces trois derniers ions se retrouvent dans la même zone de l'ACP ce qui dénote d'un lien dans l'origine de leur formation et leur fluctuation.

Tableau 21 : Matrice de corrélation

	SO_4^{2-}	Fe total	Somme cation+ anion	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$
SO_4^{2-}	1	0,01	0,82	0,72
Fe total	0,01	1	-0,19	-0,23
Somme cation+ anion	0,82	-0,19	1	0,70
$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	0,72	-0,23	0,70	1

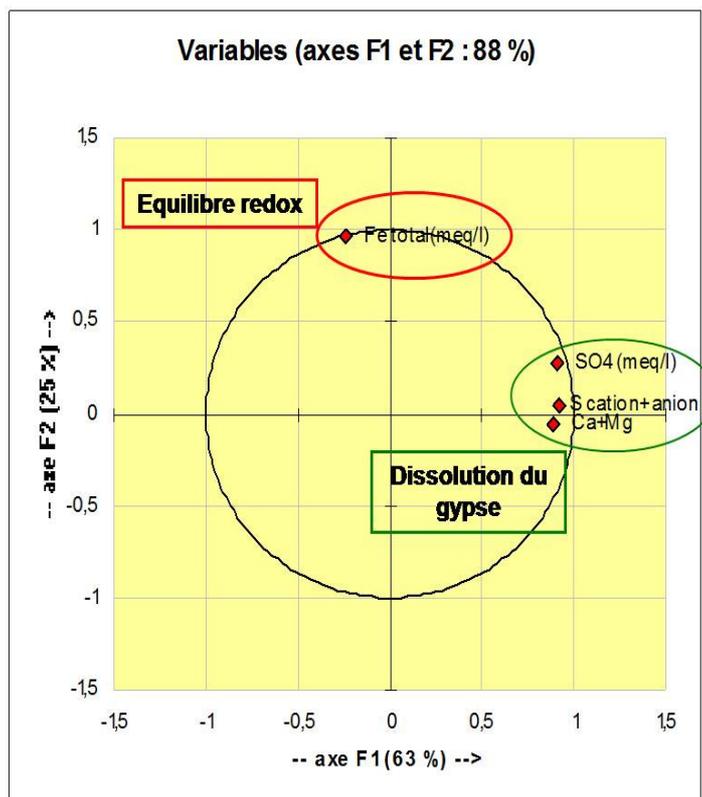


Figure 45 : Représentation de la répartition des variables (SO_4^{2-} , $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ et Fe^{2+} et la somme des cations et des anions) de l'ACP n°3 sans les émergences de Fontanes, Laval et Silhol.

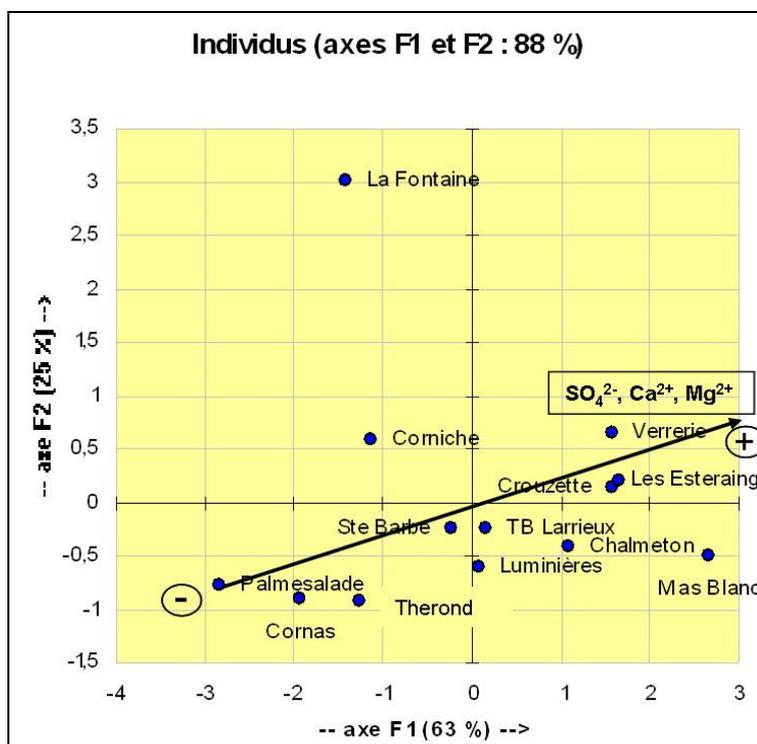


Figure 46 : Représentation de la répartition des individus (sans les émergences de Fontanes, Laval et Silhol) de l'ACP n°3 utilisant les variables SO_4^{2-} , $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, Fe^{2+} et la somme des cations et des anions.

II.3.1.2.4. ACP n°4 : Variables (Cl⁻, Na⁺, HCO₃⁻, Mg²⁺+Ca²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ et SO₄²⁻) sur 16 émergences

Les analyses moyennes présentent de fortes valeurs en Na²⁺ dont l'origine peut être la dissolution de la halite et/ou l'hydrolyse de minéraux alumino-silicatés et en HCO₃²⁻. La répartition entre le phénomène d'hydrolyse et de dissolution du gypse apparaît sur cette ACP constituée à partir des variables Cl⁻, Na⁺, HCO₃⁻, Mg²⁺+Ca²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ et SO₄²⁻ et les 16 émergences du Tableau 17 représentant les individus.

Sur cette ACP, l'axe F1 représente 72% de l'information et l'axe F2, 17%. Au total 89% de l'information est accessible sur ces deux axes.

Tableau 22 : Matrice de corrélation

	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Mg ²⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺
Na ⁺	1	0,81	0,51	0,69	0,90	0,69	0,62
SO ₄ ²⁻	0,81	1	0,87	0,62	0,51	0,83	0,91
Ca ²⁺	0,51	0,87	1	0,52	0,19	0,78	0,96
HCO ₃ ⁻	0,69	0,62	0,52	1	0,52	0,62	0,60
Cl ⁻	0,90	0,51	0,19	0,52	1	0,53	0,35
Mg ²⁺	0,69	0,83	0,78	0,62	0,53	1	0,92
Ca ²⁺ +Mg ²⁺	0,62	0,91	0,96	0,60	0,35	0,92	1

La proximité des variables HCO₃⁻ et Na⁺ (0,7 de corrélation - Tableau 22) peut s'expliquer par des réactions d'hydrolyse sur les minéraux alumino-silicatés. SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ sont rassemblés sur un autre pôle, celui représentant la dissolution du gypse (Figure 47) et leur coefficient de corrélation est de 0,91. Ca²⁺ et Mg²⁺ ne sont pas trop éloignés de HCO₃²⁻, ce qui peut signifier que l'on observe aussi un phénomène de dissolution des carbonates. Nous observons aussi une bonne corrélation entre les ions Na⁺ et Cl⁻ résultant de la dissolution de la halite contenue dans les terrains triasiques.

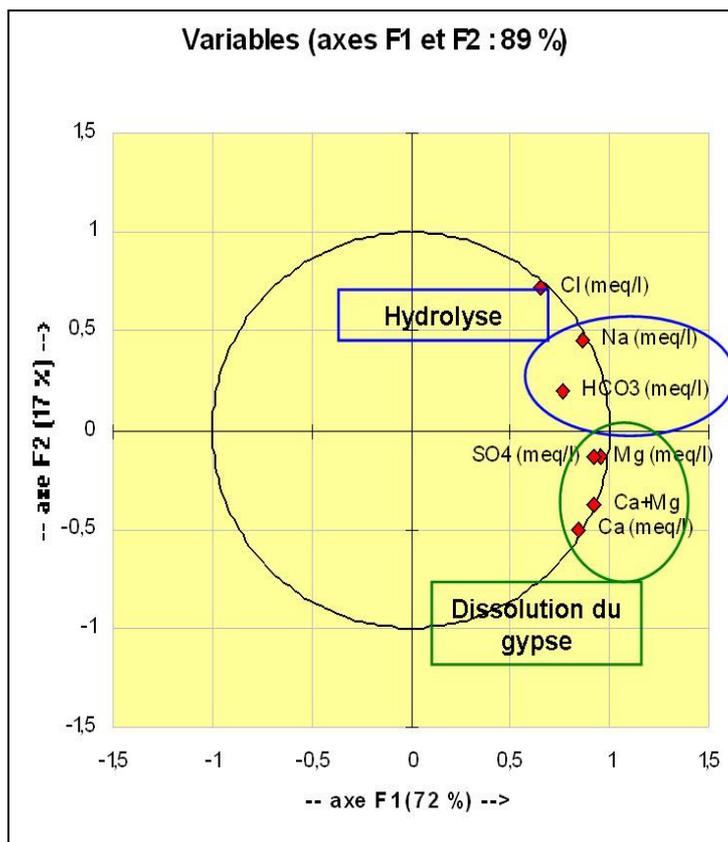


Figure 47 : Représentation de la répartition des variables (SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, Na^+ , HCO_3^- et Cl^-) de l'ACP n°4 sur 16 émergences

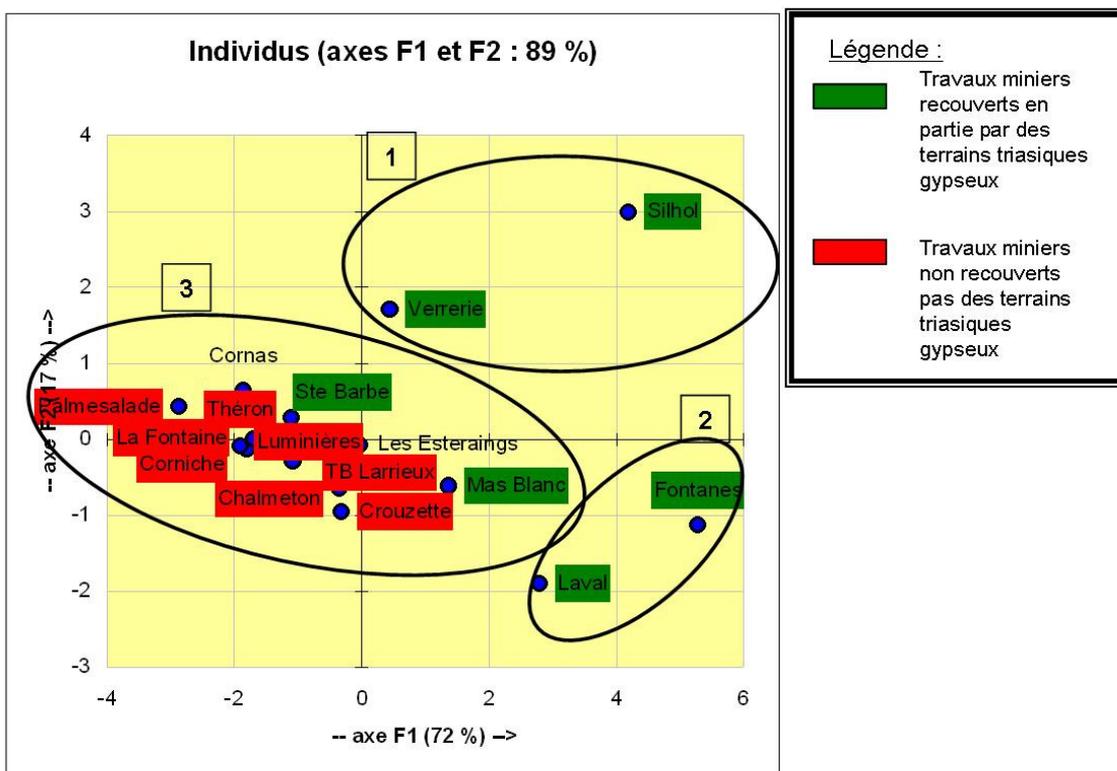


Figure 48 : Représentation de la répartition des individus (16 émergences) de l'ACP n°4 utilisant les variables SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , $Ca^{2+}+Mg^{2+}$, Na^+ , HCO_3^- et Cl^- .

La classification que nous allons présenter tient compte des débits des émergences, cependant nous n'avons pas pu retenir ce paramètre comme une variable dans l'ACP n°4 car les données ne sont pas assez importantes pour toutes les émergences.

La répartition des individus peut donner lieu à une subdivision en 3 groupes (Figure 48) :

- **groupe 1 :**

Il est constitué par les émergences de Silhol et de la Verrerie. Leur positionnement est fortement influencé par les variables HCO_3^- et Na^+ (pôle hydrolyse des minéraux aluminosilicatés dans les couches stériles) et Na^+ et Cl^- (dissolution de la halite) mais ces deux émergences présentent aussi des débits faibles (Silhol = 10 m³/h et Verrerie = 60 m³/h en moyenne). Elles sont aussi recouvertes par du Trias contenant entre autre du gypse et de la dolomie et de la halite.

- **groupe 2 :**

Les émergences de Fontanes et Laval appartiennent à ce groupe et sont proches du pôle dissolution et ces deux émergences sont recouvertes par des terrains triasiques contenant des minéraux solubles (gypse, halite). Une autre de leur particularité est d'avoir un débit important (Fontanes = 250 m³/h et Laval = 125 m³/h en moyenne).

- **groupe 3 :**

Ce groupe rassemble la majorité des émergences. Elles ont en règle générale des débits supérieurs au groupe 1 et inférieurs au groupe 2 (entre 60 et 125 m³/h) et ne sont pas recouvertes par des terrains triasiques.

II.3.1.2.5. ACP n°5 : Variables en lien avec la présence de fer (pH, Fe total et Mn²⁺) pour les 16 émergences

Sur cette ACP - dont les variables sont le pH, Fe total et le Mn et les individus, les 16 émergences du Tableau 1 - l'axe F1 représente 69% de l'information et l'axe F2, 30%. Au total 99% de l'information est accessible sur ces deux axes.

Tableau 23 : Matrice de corrélation

	Fe total	pH	Mn ²⁺
Fe total	1	-0,22	0,97
pH	-0,22	1	-0,22
Mn ²⁺	0,97	-0,22	1

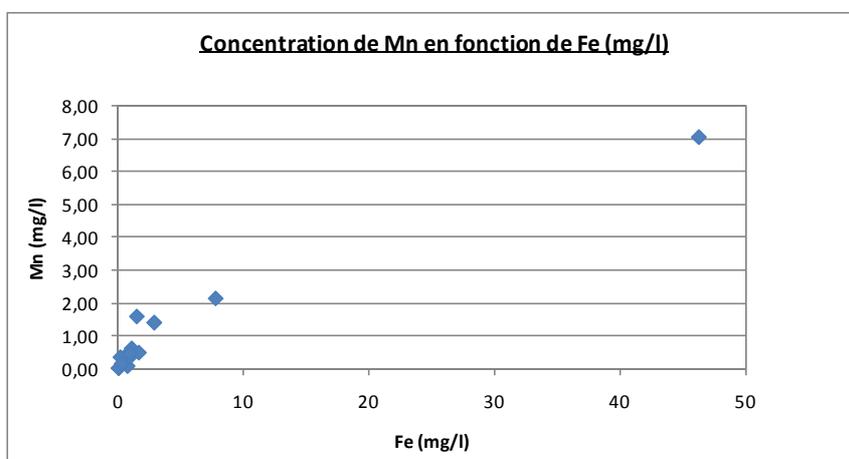


Figure 49 : Représentation de la corrélation entre la concentration en manganèse et en fer d'après les valeurs moyennes de chaque émergence

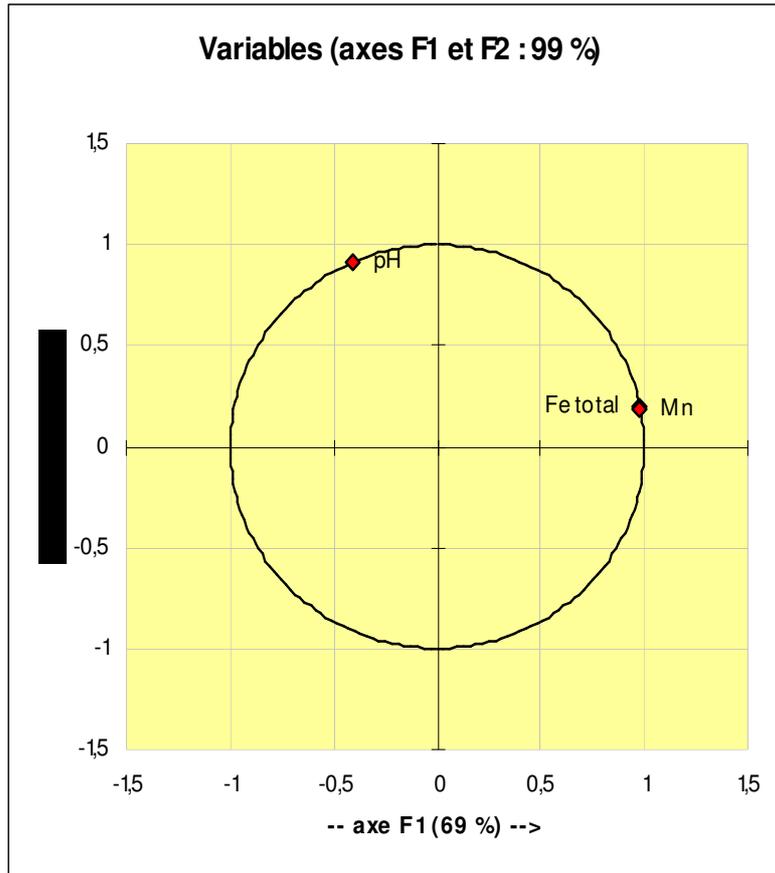


Figure 50 : Représentation de la répartition des variables (pH, Fe²⁺, Mn²⁺) de l'ACP n°5 sur 16 émergences

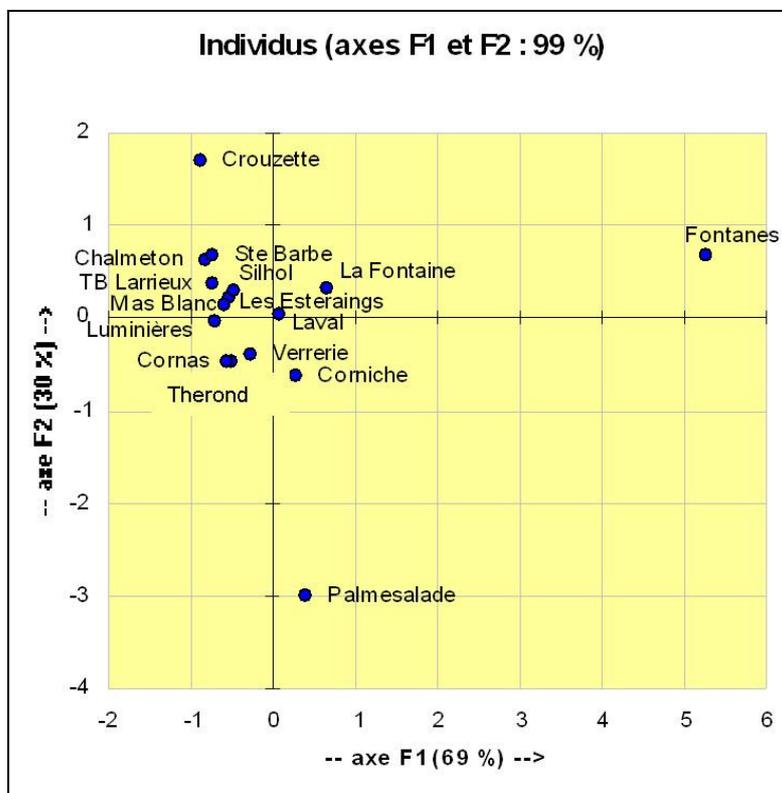


Figure 51 : Représentation de la répartition des individus (16 émergences) de l'ACP n°5 utilisant les variables pH, Fe²⁺, Mn²⁺

Les valeurs moyennes du fer et du manganèse sont liés pour les 16 émergences (97% de corrélation- Tableau 23) mais le lien est très marqué pour les émergences de Fontanes et La Fontaine (Figure 50 et Figure 51). Les autres émergences sont plutôt éloignées de ce pôle. Il faut noter que le manganèse est en concentration très faible par rapport aux autres éléments pour l'ensemble des émergences.

Palmesalade se retrouve éloigné du groupe principal des émergences du fait de son faible pH et non pour des quantités particulières de Mn^{2+} et Fe total (Figure 51). De plus, fer et manganèse sont fréquemment associés dans les analyses chimiques car ils ont la propriété de co-précipiter (site internet du pays de la Loire)

II.3.2. Conclusion

Par l'intermédiaire des ACP nous sommes parvenus à distinguer 3 pôles de réactions chimiques pour expliquer l'origine de certains éléments principaux dans les eaux d'émergences minières : un pôle dissolution du gypse, un pôle hydrolyse et un pôle d'oxydoréduction de la pyrite moins marqué.

La répartition des émergences en fonction de ces trois pôles nous a permis de déterminer les influences dominantes des réactions chimiques sur la répartition des émergences ainsi :

- les sulfates ont une source marquée par la dissolution du gypse des terrains triasiques et en proportion plus faible par l'oxydation de la pyrite (Figure 44). Trois émergences sont fortement influencées par le pôle dissolution : Fontanes, Laval et Silhol (Figure 44)
- le pôle d'équilibre redox influence fortement les émergences de Fontanes et la Fontaine. Fontanes est un cas particulier qui est influencé à la fois par le pôle d'équilibre redox et le pôle dissolution du gypse (Figure 43 et Figure 44).
- Le pôle hydrolyse est noté par la proximité des variables HCO_3^- et Na^+ dont l'origine s'explique par l'hydrolyse de minéraux alumino-silicatés. Silhol et Verrerie se trouvent proches de ce pôle (Figure 48).

Silhol est proche à la fois du pôle dissolution du gypse qui explique ses fortes concentrations en sulfates et proche du pôle hydrolyse, qui explique son excédent en Na^+ (Figure 69). Les émergences non citées dans ces trois groupes n'ont pas de proximité marquée avec l'un des trois groupes.

Les émergences appartenant à un même groupe ne présentent pas de proximité géographique (Figure 132).

Une autre classification apparaît grâce aux ACP, qui est la répartition des émergences concernant les travaux miniers recouverts ou non par des terrains gypseux triasiques (Figure 48) et selon le débit de l'émergence. Trois groupes sont définis :

- groupe 1 : émergences proches du pôle hydrolyse, avec un faible débit et une couverture triasique : Silhol et Verrerie
- groupe 2 : Il concerne les émergences de Fontanes et Laval qui sont proches du pôle dissolution, dont la couverture est triasique et le débit important.
- groupe 3 : Il contient la majorité des émergences dont le débit est intermédiaire entre le groupe 1 et 2. Les travaux miniers sont non recouverts par des terrains triasiques.

Cette méthode nous a permis de classer les émergences selon certains paramètres cependant il est intéressant d'avoir une vision plus globale du type d'eau des émergences pour essayer de les classer. Pour cela, nous allons utiliser un autre type de représentation que sont les diagrammes de Schoeller-Berkalov.

II.4. Diagramme semi-logarithmique de Schoeller-Berkalov

II.4.1. Description du diagramme

Ce diagramme permet de représenter le faciès des eaux tout en rendant compte de la quantité de chaque élément chimique. Sur l'axe des abscisses sont représentés les différents ions. Pour chacun d'entre eux (ou des groupements $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ et $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$) la teneur réelle en milliéquivalent par litre (meq/l) est reportée sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites et l'allure du graphique permet de visualiser le faciès de l'eau concernée. Si les lignes sont parallèles, nous sommes en présence de deux faciès proches ; par contre, si les lignes se croisent, nous observons deux faciès différents.

L'avantage de ce diagramme est la préservation des unités de mesures des éléments (mg/l ou meq/l) et de traiter des concentrations différentes sur le même graphique.

Les données utilisées pour ces diagrammes se trouvent en annexe 6.

II.4.2. Résultats et interprétation

Le diagramme de Schoeller de la Figure 52 utilise les valeurs moyennes par émergence présentées dans le Tableau 17 sauf les émergences de la Verrerie et du Mas Blanc car les données nécessaires à la représentation de Schoeller ne sont pas complètes. Il laisse apparaître un groupe plutôt homogène d'émergence (surlignée en rouge en excluant Palmesalade) et des exceptions (Palmesalade, Laval, Fontanes, Silhol). Deux groupes se distinguent alors : le groupe majoritaire définissant le faciès général des eaux de mines de la zone étudiée (que nous appellerons groupe aux faibles concentrations) définit par une couverture non triasique et les émergences aux fortes concentrations (possédant une couverture triasique).

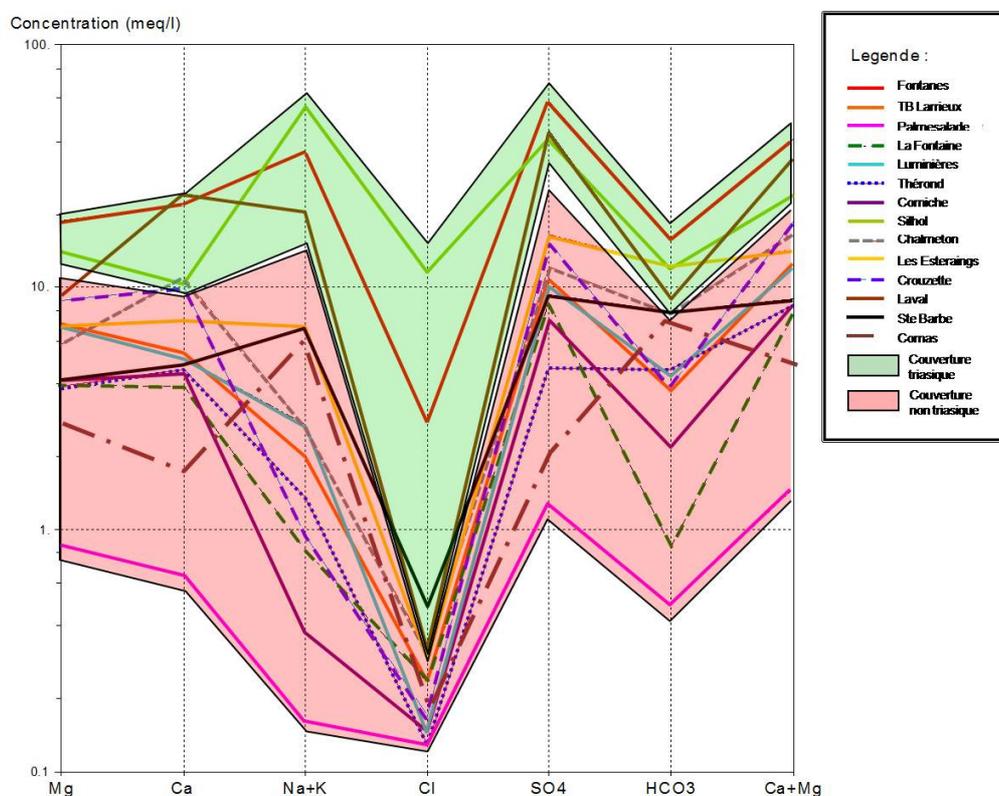


Figure 52 : Diagramme de Schoeller-Berkalov représentant les 14 émergences (à partir des moyennes par élément pour chaque émergence)

Ce diagramme de Schoeller (Figure 52) représente les deux types d'émergences décrits par la Figure 48. La zone représentée en vert contient les émergences présentant une couverture triasique gypseuse et la zone rouge contient les émergences (sauf Ste Barbe) avec de faibles concentrations ; logiquement ces dernières se retrouvent dans la partie inférieure du graphique.

La répartition de la majorité des analyses est assez homogène et comprise entre :

- 0,15 et 11 meq/l pour les chlorures
- 1,3 et 50 meq/l pour les sulfates
- 0,17 et 50 meq/l pour $\text{Na}^+ + \text{K}^+$
- 0,70 et 20 meq/l pour le calcium
- 0,85 et 20 meq/l pour le magnésium
- 0,5 et 15 meq/l pour le HCO_3^-

II.4.2.1. Groupe des émergences avec de faibles concentrations et ne possédant pas de couverture triasique (sauf Ste Barbe)

Le groupe des émergences possédant de faibles concentrations (zone rouge sur la Figure 52) comprend 11 points : La Fontaine, Corniche, TB Larrieux, Lumières, Théron, Crouzette, Chalmeton, les Estérais, Cornas, Ste Barbe et Palmesalade. Ces émergences ne possèdent pas de couverture triasique. Elles correspondent au groupe sans couverture triasique du diagramme de Piper présenté ensuite. D'autre part, elles drainent des faisceaux superficiels. Les quatre premières émergences appartiennent au faisceau superficiel des Lumières. Les émergences de Crouzette et TB Larrieux présentent un faciès proche car Crouzette s'est colmatée et ses eaux ont ensuite rejoint le TB Larrieux. Les eaux de Larrieux sont donc le résultat d'un mélange entre les eaux de Crouzette et Larrieux (Tableau 24). De plus, une faible partie des eaux du TB Larrieux transite vers l'émergence de Cornas par l'intermédiaire d'un travers banc.

L'émergence de Théron draine les eaux d'une exploitation de charbon à ciel ouvert (Serre des Andats) d'origine superficielle. De même, la galerie Ste Barbe draine une partie des eaux de l'exploitation à ciel ouvert de Grand' Baume qui ne draine pas de terrains triasiques.

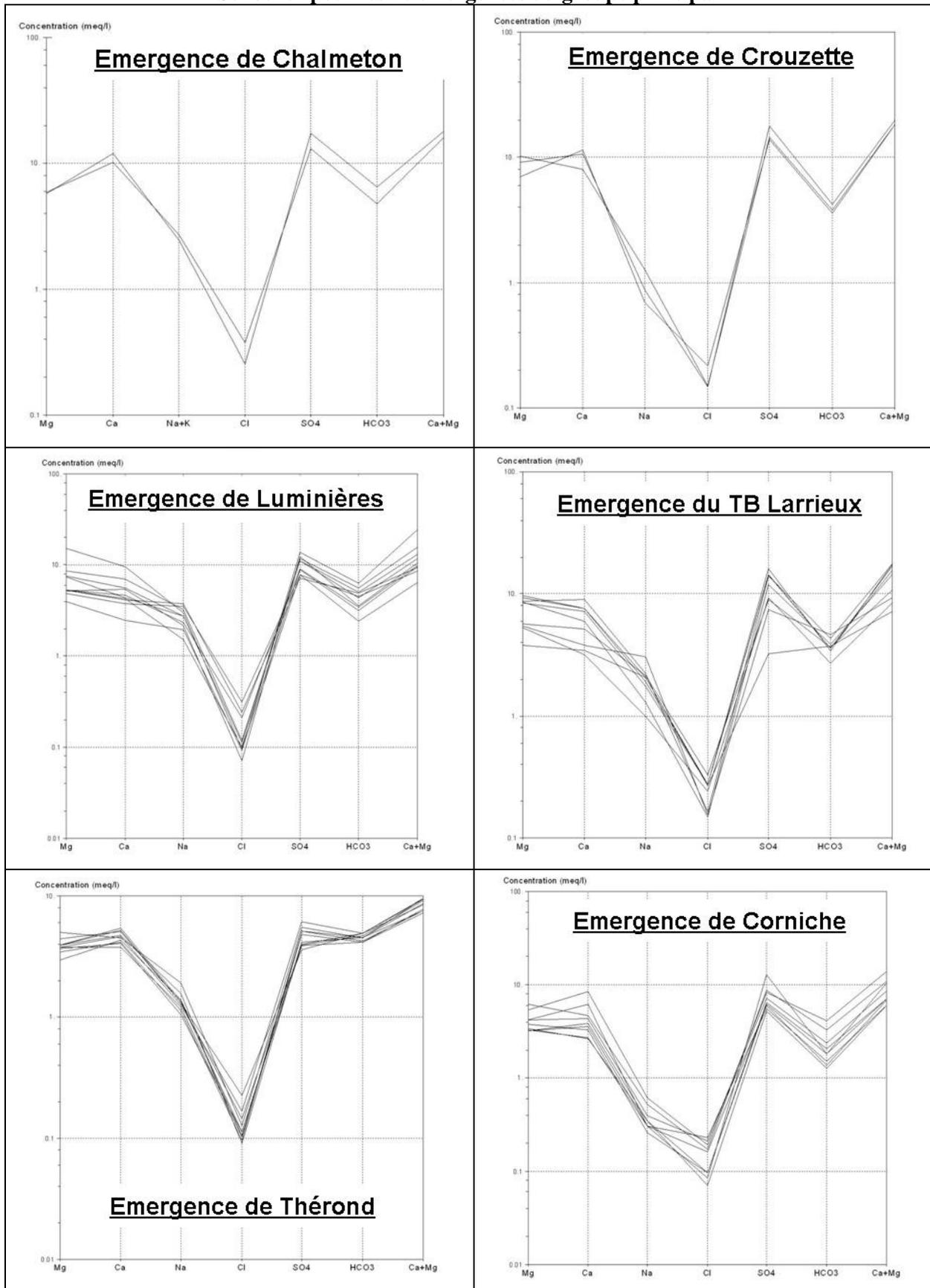
Chalmeton appartient à une autre concession mais présente aussi la particularité de drainer des faisceaux superficiels ce qui explique qu'il soit proche des eaux des faisceaux superficiels des Lumières.

Palmesalade draine aussi des faisceaux superficiels et présente des concentrations beaucoup plus faibles que les autres émergences du groupe des faibles concentrations.

Les caractéristiques des émergences à faibles concentrations sont :

- une quantité de Mg^{2+} légèrement supérieure à celle de Ca^{2+} comprise entre 4 et 9 meq/l pour le Mg^{2+} et 4 et 10 meq/l pour le Ca^{2+} .
- la concentration en $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ est comprise entre 0,4 et 8 meq/l
- les chlorures sont en très faible quantité dans l'ensemble de ces eaux d'émergences et sont comprises entre 0,15 et 0,6 meq/l ce qui peut simplement traduire le fond chimique naturel issu des eaux de pluie.
- les sulfates présentent de forte concentration entre 4 et 10,5 meq/l.
- l'hydrogencarbonate présente des valeurs comprises entre 1 et 4 meq/l.

Tableau 24 : Ensemble des campagnes d'analyses complètes représentées sur des diagrammes de Schoeller pour les 10 émergences du groupe principal



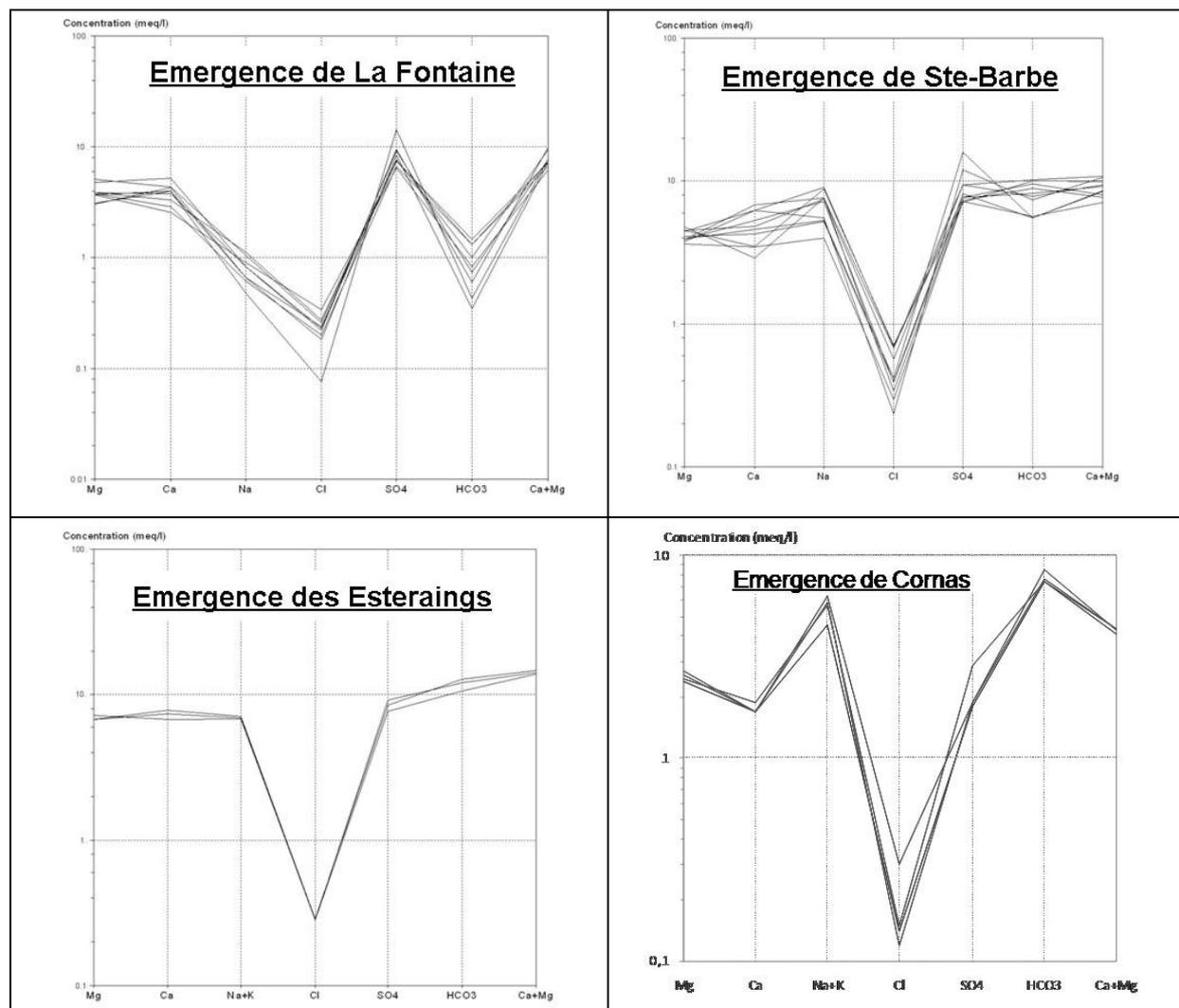


Tableau 25 : Dates d'ouverture et de fermeture des exploitations associées aux émergences étudiées

Nom de l'émergence	Date d'ouverture de l'exploitation associée	Date de fermeture de l'exploitation associée
Crouzette	-	1924
St-Illyde	-	1956
Les Estéraings	-	1959
Palmesalade	-	1959
Mas Blanc	1930	1963
Ste-Barbe	1902	1963
Lumières	1935	1963
TB Larrieux	-	1963
Corniche	-	1963
Thérond	1841	1965
La Fontaine	1883	1965
Silhol	-	1966
Chalmeton	-	1966
Laval	1880	1971
Fontanes	1884	1985
Cornas	-	-

La date de fermeture de ces exploitations (Tableau 25) ne permet pas d'expliquer leur classification selon le diagramme de Schoeller.

L'émergence de Palmesalade représente une exception dans ce groupe d'émergences à faibles concentrations car ses valeurs sont inférieures pour tous les éléments par rapport à notre groupe référence; ceci peut s'expliquer par le fait qu'elle ne soit pas en contact avec un encaissant soluble; cependant elle possède un faciès caractéristique des autres mines mais plus dilué (Figure 52). Le temps de transit des eaux peut aussi jouer un rôle mais nous n'avons pas de détail.

Les sulfates et l'hydrogénocarbonate dominant et les teneurs en chlorures sont très faibles. Le magnésium est légèrement supérieur au calcium (Figure 53) et le pH est faible (5,47).

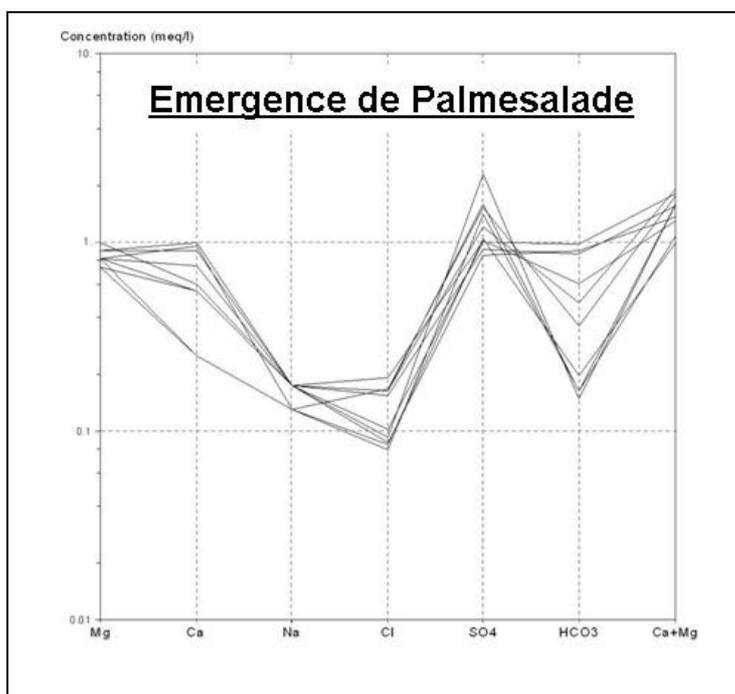


Figure 53 : Ensemble des diagrammes de Schoeller pour l'émergence de Palmesalade

II.4.2.2. Groupe des émergences à fortes concentrations possédant une couverture triasique (sauf Ste Barbe)

Le groupe des émergences à fortes concentrations (en vert sur la Figure 52 sauf Ste Barbe qui est dans la zone rouge) comprend Laval, Fontanes, Silhol. Ces émergences appartiennent aussi au groupe des émergences avec une couverture triasique du diagramme de Piper (Figure 59). Même si l'émergence de Ste-Barbe est décrite dans le groupe précédent, nous pouvons l'intégrer à ce groupe car elle a une couverture triasique et de fortes concentrations (les plus fortes du groupe des faibles concentrations).

II.4.2.2.1. Emergence de Laval

Laval présente un faciès différent du groupe de référence (Figure 54). Cette exploitation est assez ancienne, l'eau a eu le temps de s'équilibrer avec l'encaissant ; cependant de l'eau drainée par des découvertes (exploitations de charbon à ciel ouvert) plus récentes se vidange gravitairement dans les travaux de Laval. Le débit de cette émergence est compris entre 80 et 250 m³/h. De plus, elle est recouverte en partie par des terrains triasiques contenant du gypse

et de la halite, pouvant expliquer les quantités plus importantes en Na^+ , SO_4^{2-} et Ca^{2+} . Cependant les faibles teneurs en chlorures ne sont pas compatibles avec la dissolution de la halite et l'origine de Na^+ est certainement plus liée à l'hydrolyse de minéraux aluminosilicatés.

La moyenne des teneurs de cette émergence (Figure 52) se trouve dans le Tableau 17 et à compléter par :

- environ 20 meq/l de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$
- 30 meq/l de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$

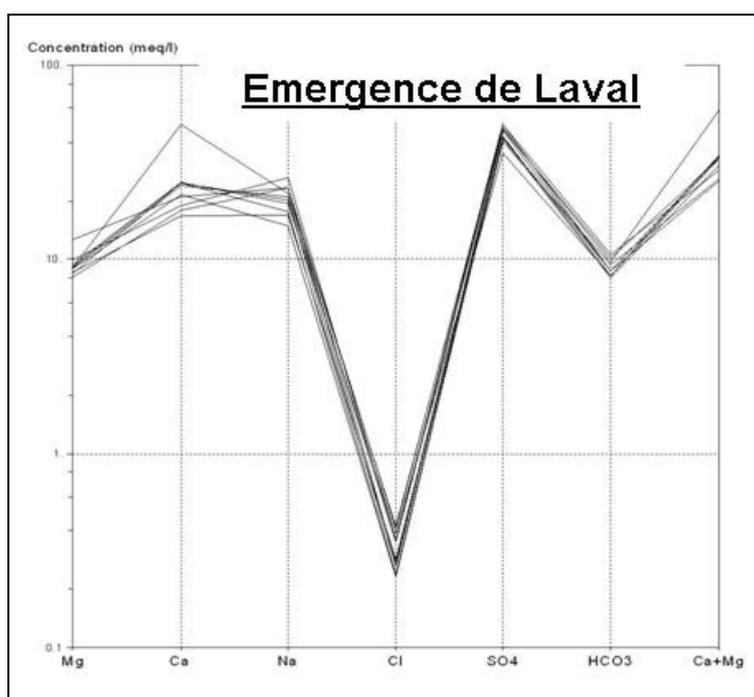


Figure 54 : Ensemble des diagrammes de Schoeller pour l'émergence de Laval

II.4.2.2.2. Emergence de Fontanes

Cette émergence présente des concentrations supérieures au groupe de référence. La quantité de chlorures (3 meq/l) et celle des sulfates (60 meq/l) est très élevée pour les émergences de la région (Figure 55).

Le HCO_3^- a une concentration de 15 meq/l, la plus élevée de la zone d'étude.

La quantité de Mg^{2+} est de 20 meq/l et celle du Ca^{2+} est légèrement supérieure à 20 meq/l.

Le $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ est proche de 30 meq/l. Cette émergence est recouverte par des terrains triasiques contenant du gypse et la halite et des anciennes exploitations de pyrite expliquant la forte teneur en Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ .

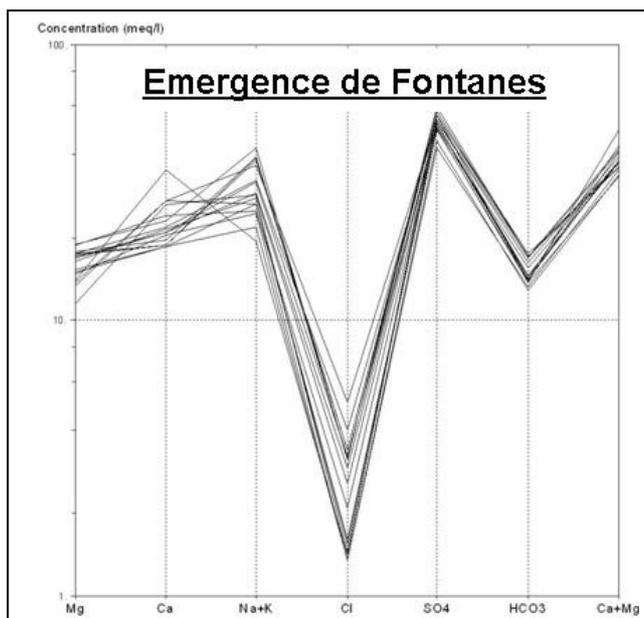


Figure 55 : Ensemble des diagrammes de Schoeller pour l'émergence de Fontanes

II.4.2.2.3. Emergence de Silhol

Cette émergence a un faciès particulier (Figure 56):

- la concentration en Na^+ est proche de 60 meq/l et celle de Cl^- est très élevée par rapport à toutes les émergences de la zone d'étude (11 meq/l). Cette émergence est recouverte par des terrains triasiques contenant entre autre la halite et pouvant expliquer cette concentration dans les eaux de mines.
- Mg^{2+} et Ca^{2+} (15 meq/l) ont des concentrations qui se rapprochent des valeurs du groupe de référence.
- SO_4^{2-} (40 meq/l) et HCO_3^- (13 meq/l) sont supérieurs aux valeurs moyennes des émergences de la zone étudiée.

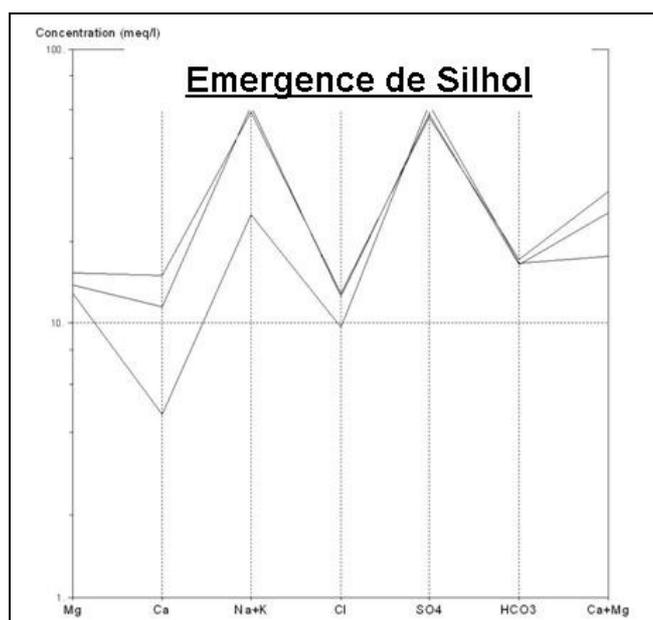


Figure 56 : Ensemble des diagrammes de Schoeller pour l'émergence de Silhol

II.4.3. Conclusion

Nous pouvons définir deux groupes à partir des diagrammes de Schoeller :

- Le premier groupe est défini par la zone avec les plus faibles concentrations et est constitué par des émergences possédant une couverture non triasique mais qui par ailleurs, drainent des faisceaux superficiels ou des travaux profonds connectés à des travaux à ciel ouvert.

L'émergence de Palmesalade contenant le moins d'extrait sec (Figure 77) se situe en partie inférieure de la zone des plus faibles concentrations (zone présentant les faciès dominants de l'étude). Ce groupe contient les mêmes émergences que le groupe 3 défini par l'ACP n°4 de la Figure 48 et qui contient les émergences non recouvertes par des terrains triasiques gypseux.

La Figure 52 peut être mise en parallèle avec la Figure 77 qui représente la répartition de la valeur moyenne des extraits secs pour les émergences étudiées.

- Le deuxième groupe est défini par les faciès de la zone avec les plus fortes concentrations (en vert sur la Figure 52) et qui sont aussi ceux contenant le plus d'extraits secs. Ces émergences sont recouvertes par des terrains triasiques comme le montre aussi les groupes 1 et 2, de l'ACP n°4, sur la Figure 48.

II.5. Identification des faciès géochimiques (Diagramme de Piper)

II.5.1. Description du diagramme de Piper

L'intérêt de ce diagramme est de représenter sur une même figure plusieurs échantillons d'eau présentant des faciès chimiques différents (Figure 57). Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total des ions (DNEMT, 1996).

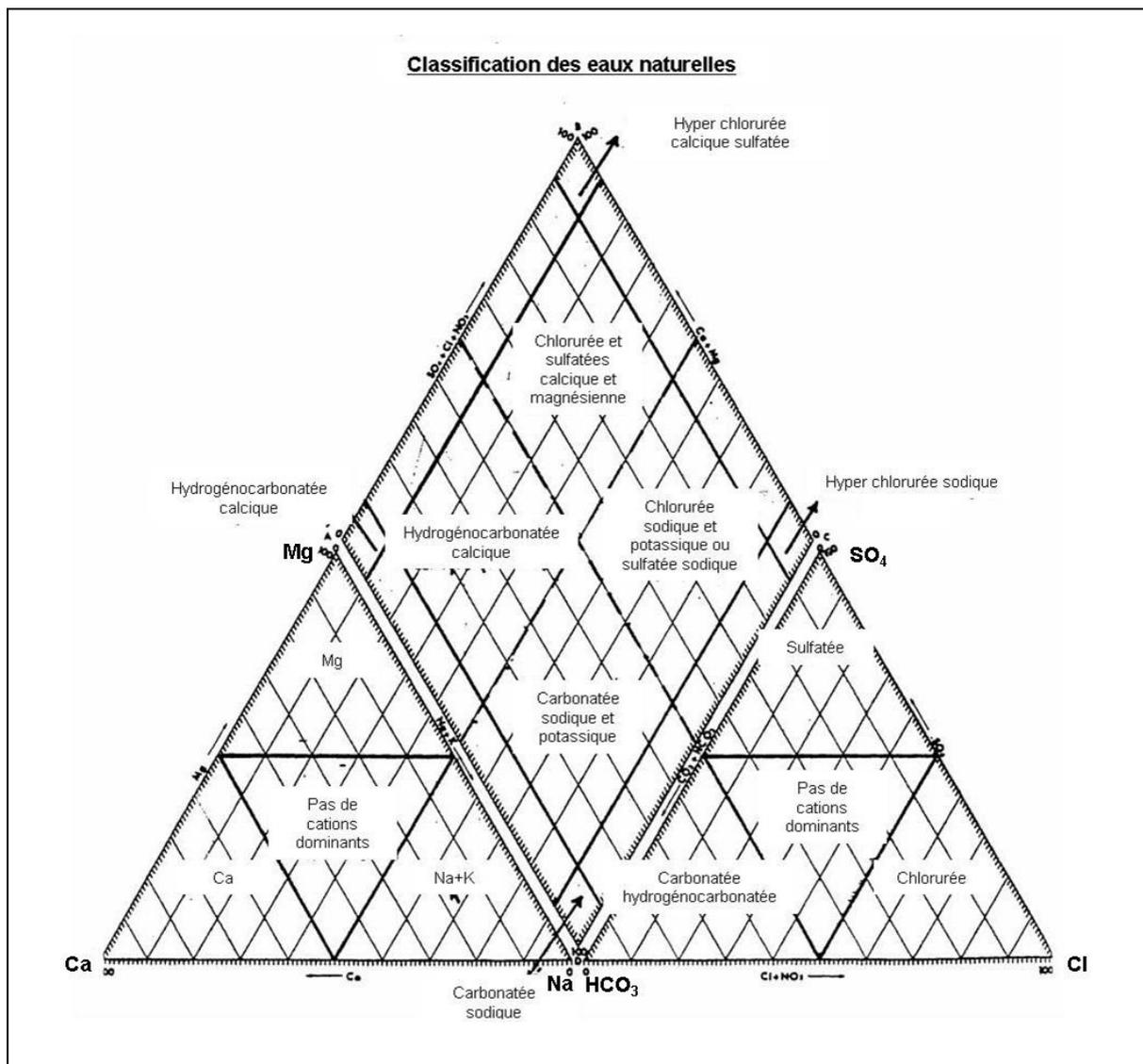


Figure 57 : Classification de Piper d'après (Piper, 1944)

II.5.2. Résultats et interprétations

Les eaux de mines de la région étudiée présentent un faciès marqué par les sulfates et se situent dans la zone du diagramme dont le faciès décrit des eaux sulfatées calciques et magnésiennes (Figure 58 et Figure 59).

Nous utilisons les données du Tableau 17 pour ce diagramme sauf l'émergence de la Verrerie qui n'apparaît pas sur les prochains graphiques car elle ne possède pas assez d'analyse et celle de Cornas qui est hors zone d'étude.

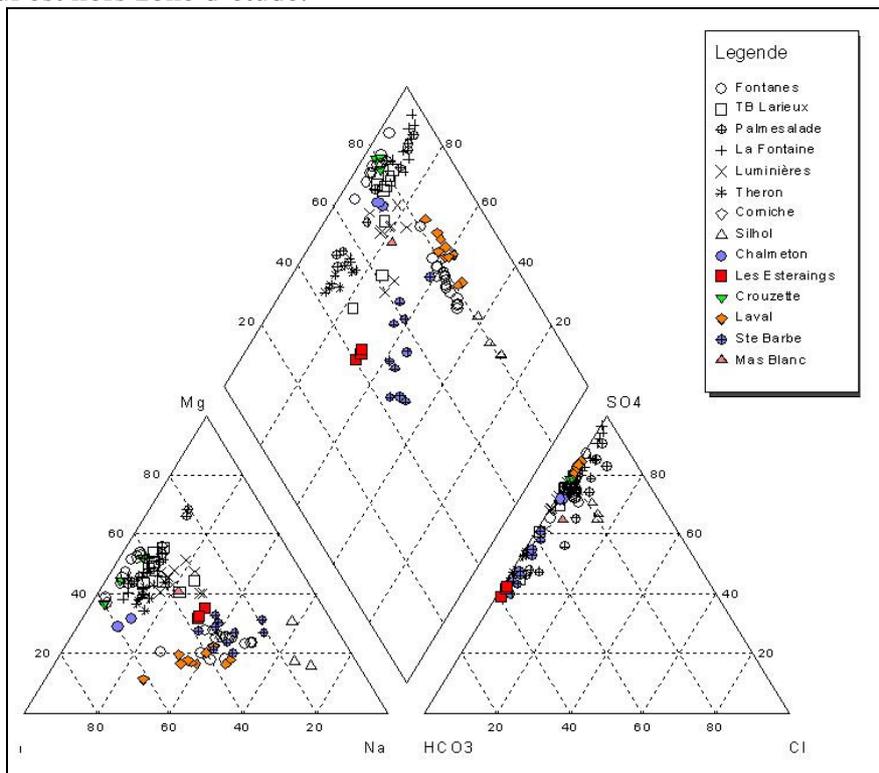


Figure 58 : Diagramme de Piper représentant l'ensemble des analyses complètes pour les émergences de la zone d'étude (voir Annexe 7)

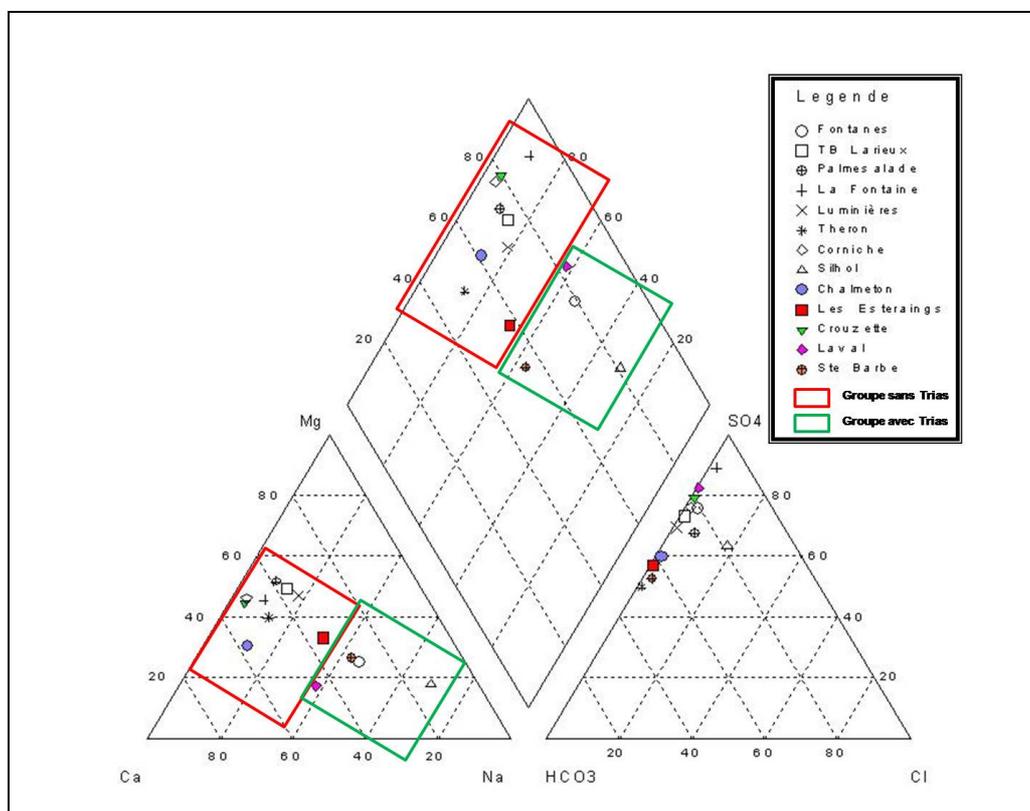


Figure 59 : Diagramme de Piper représentant la moyenne des mesures pour les émergences de la zone d'étude (voir Annexe 7)

Les éléments influençant le plus le faciès des eaux aux émergences de mines sont le SO_4^{2-} et le HCO_3^- . Les chlorures sont en très faible proportion. Les quantités de Na^+ et Ca^{2+} fluctuent selon les émergences, par contre le rapport entre Mg^{2+} et Ca^{2+} est quasiment stable à environ 50 %.

Notons que la distinction entre les émergences est plus marquée au niveau des cations que des anions.

Deux groupements d'émergences se distinguent sur ce graphique et sont décrits par le Tableau 26.

Tableau 26 : Répartition des éléments pour les deux groupes définis

Eléments	Groupe sans Trias		Groupe avec Trias	
	Min (%)	Max (%)	Min (%)	Max (%)
Ca	10	50	40	60
Na	30	70	0	50
Mg	15	40	30	60
Cl	0	20	50	90
SO4	50	85	50	90
HCO3	20	45	10	50

II.5.2.1. Groupe d'émergences avec couverture triasique (Laval, Fontanes, Ste Barbe et Silhol)

Il est caractérisé par des eaux sulfatées et calcosodiques. La proportion de sulfates est très élevée pour ce groupe. La proportion de calcium est moins importante que pour le groupe sans couverture triasique mais celle de Na^+ augmente.

Silhol présente aussi une quantité plus importante en Cl^- que les autres émergences. Le point commun de ces émergences est la couverture triasique au dessus du réservoir minier.

II.5.2.2. Groupe d'émergences sans couverture triasique (La Fontaine, Crouzette, Corniche, Palmesalade, Chalmeton, TB Larrieux, Les Estéraisings, Therond et Luminières)

Les eaux à l'intérieur de ce groupe sont sulfatées calciques et magnésiennes. Les sulfates et le calcium sont fortement dominants par rapport à Na^+ et Cl^- . Ce groupe contient les émergences du groupe rouge des diagrammes de Schoeller sauf les émergences des Estéraisings et de Ste-Barbe, ces deux dernières étant recouvertes de terrains triasiques et sont donc dans le groupe avec couverture triasique des diagrammes de Piper.

L'hydrogénocarbonate a des proportions fluctuantes selon l'émergence considérée.

Le point commun de ces émergences est de ne pas être recouvert par des terrains triasiques et l'eau de ces émergences circule dans des faisceaux superficiels des anciennes exploitations de charbon.

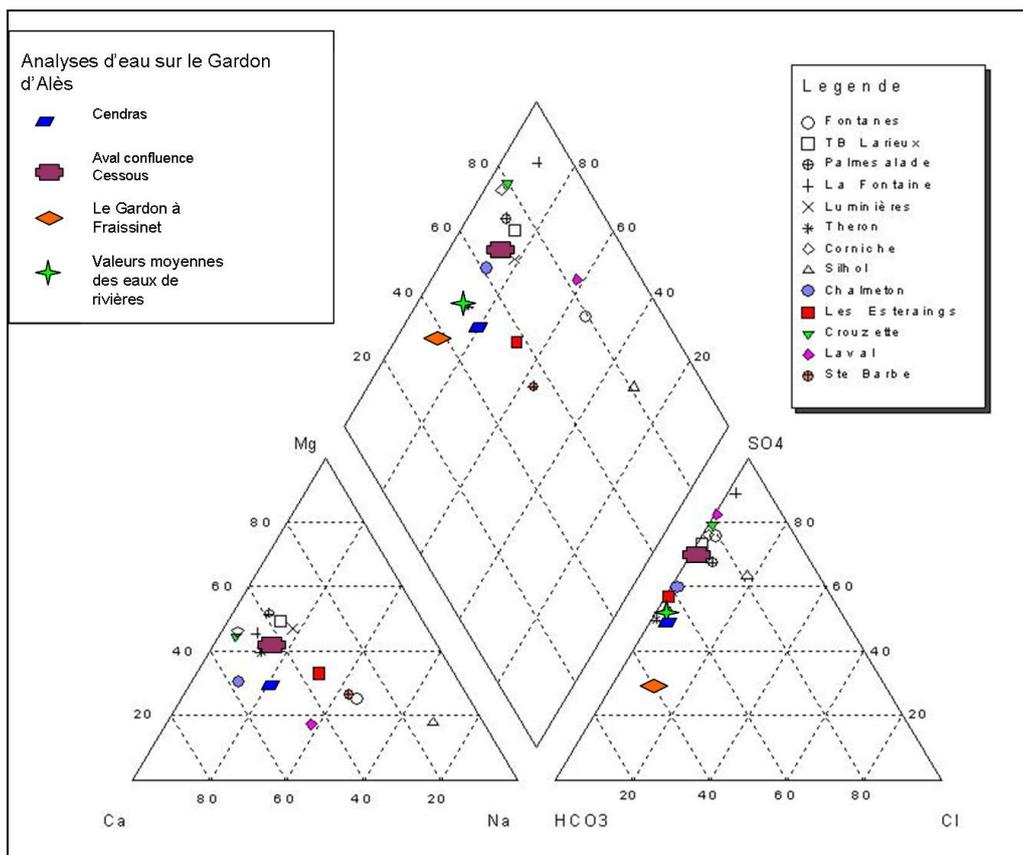


Figure 60 : Diagramme de Piper avec les représentations du faciès des eaux du Gardon en différents points et les eaux d'émergences minières

Le faciès des eaux de surface de la région est proche de celui que nous trouvons pour les eaux d'émergences minières du groupe sans couverture triasique (Figure 60).

II.5.3. Conclusion

Deux types d'eaux ressortent des diagrammes de Piper :

- Des eaux sulfatées et calcosodiques. Ce groupe d'émergences avec une couverture triasique contient les émergences présentant les courbes avec les quatre plus fortes concentrations du diagramme de Schoeller (sauf Ste Barbe qui appartient au groupe des émergences à faibles concentrations).
- Des eaux sulfatées calciques et magnésiennes étant proche du faciès des eaux dans les cours d'eau de la région (Figure 60). Ces eaux de surface étant fortement influencée par les émergences minières, il est logique que les types d'eau soit proches. Ce groupe d'émergence au faciès sulfaté calcique et magnésien contient les mêmes émergences que le groupe des émergences sans couverture triasique de Schoeller (sauf l'émergence de Cornas qui n'a pu être représentée sur le diagramme de Piper par manque de données).

II.6. Les évolutions spatiales

Le faciès dominant d'après les diagrammes de Piper et Schoeller est sulfaté, nous allons regarder plus précisément la répartition spatiale des quantités de sulfates et des autres éléments chimiques analysés.

Les premières constatations après l'observation du Tableau 17 est la présence d'une forte concentration en fer pour l'émergence de Fontanes par rapport aux autres. En règle générale, les chlorures sont faiblement représentés, sauf à Fontanes et à Silhol. Les quantités de Sodium sont élevées pour les émergences de Fontanes, la Verrerie et Laval.

Les pH sont proches de 7, en général, sauf pour l'émergence de Palmesalade (5,47) qui possède aussi les plus faibles concentrations de la zone et Crouzette (8,13).

II.6.1. Le fer

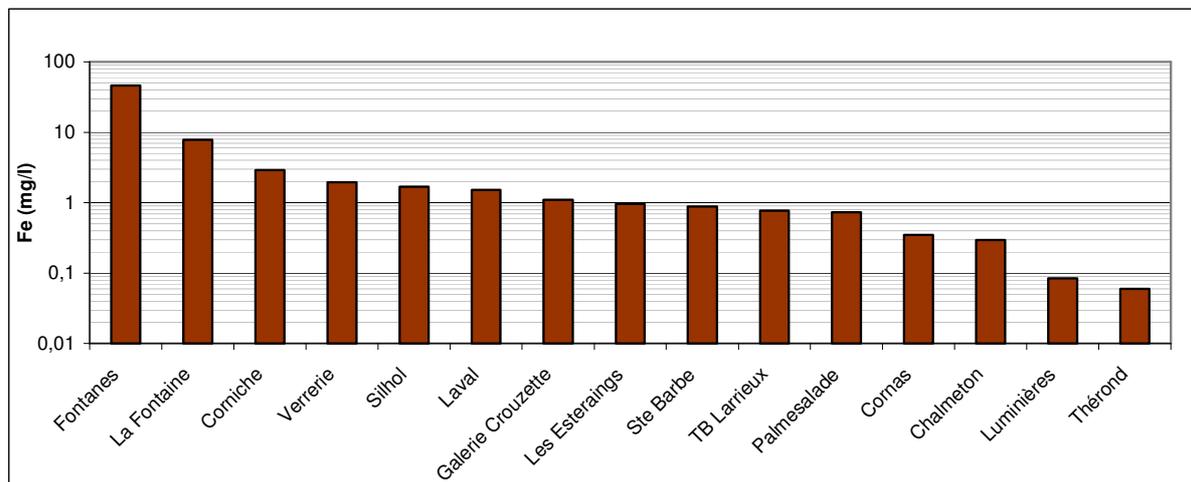


Figure 61 : Moyenne des concentrations en fer total par émergence

L'émergence de Fontanes présente des concentrations largement supérieures aux autres sites avec environ 40 mg/l de fer total (Figure 61).

Une des origines de sa présence est dans un premier temps la superposition d'anciennes exploitations de fer au-dessus des anciennes exploitations de charbon (Figure 62) qui se nomment :

- le Vallat Pellet, Montaut et Trepeloup
- St Félix
- Le Soulié

D'autres exploitations de fer sont connues dans la région à proximité d'anciennes mines de charbon mais leur extension est moins marquée et de ce fait n'influence probablement pas les concentrations des émergences proches (Figure 63).

Les autres émergences présentent une moyenne inférieure à 9 mg/l. D'après les références sur le fond géochimique, ces valeurs sont représentatives d'eau en contact avec des charbons et des schistes.

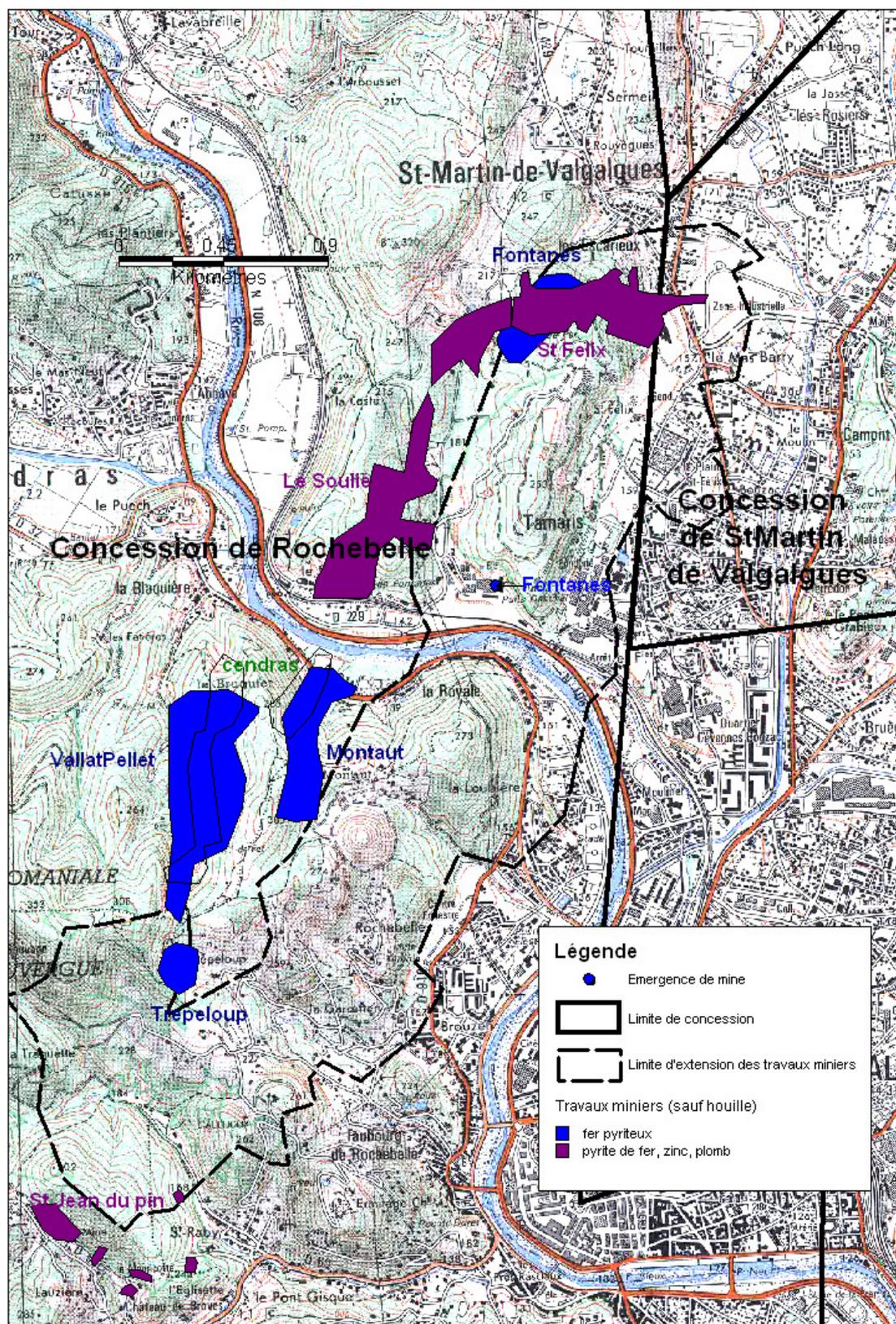
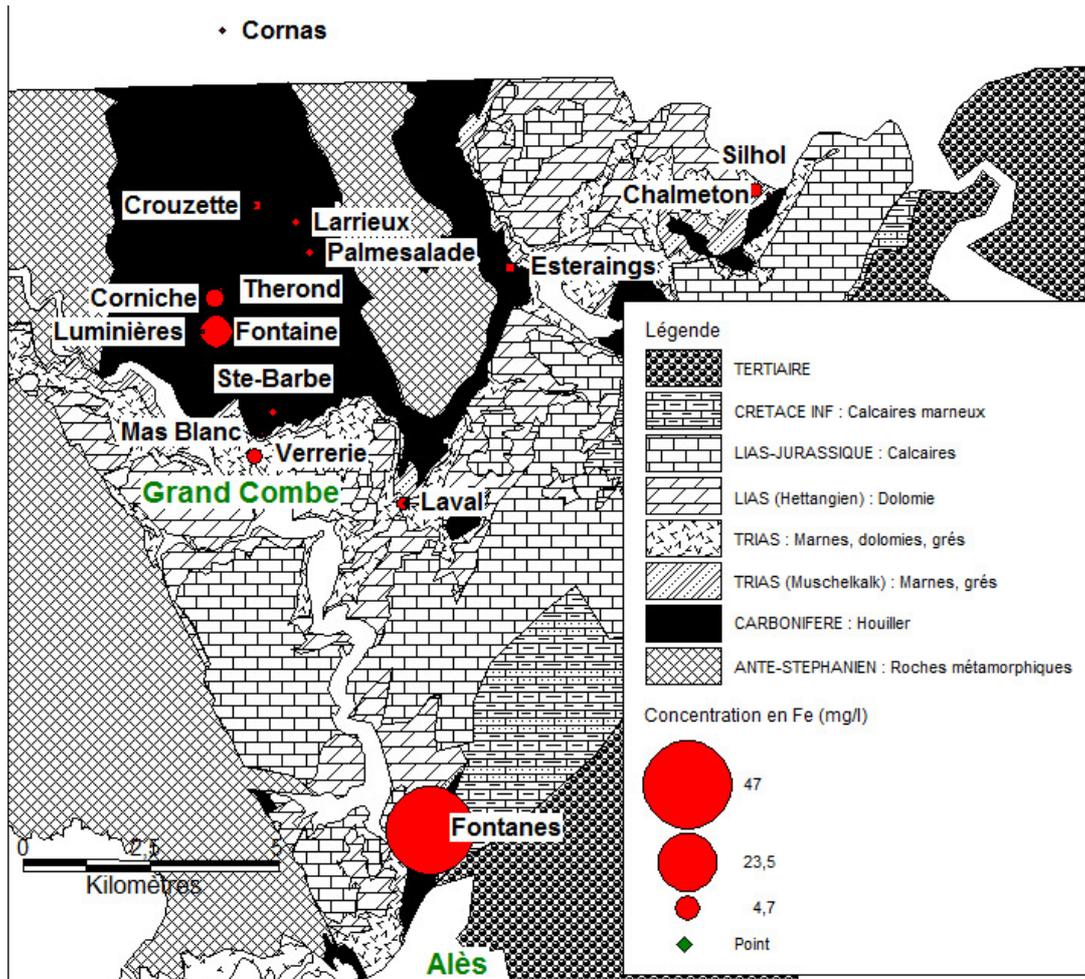
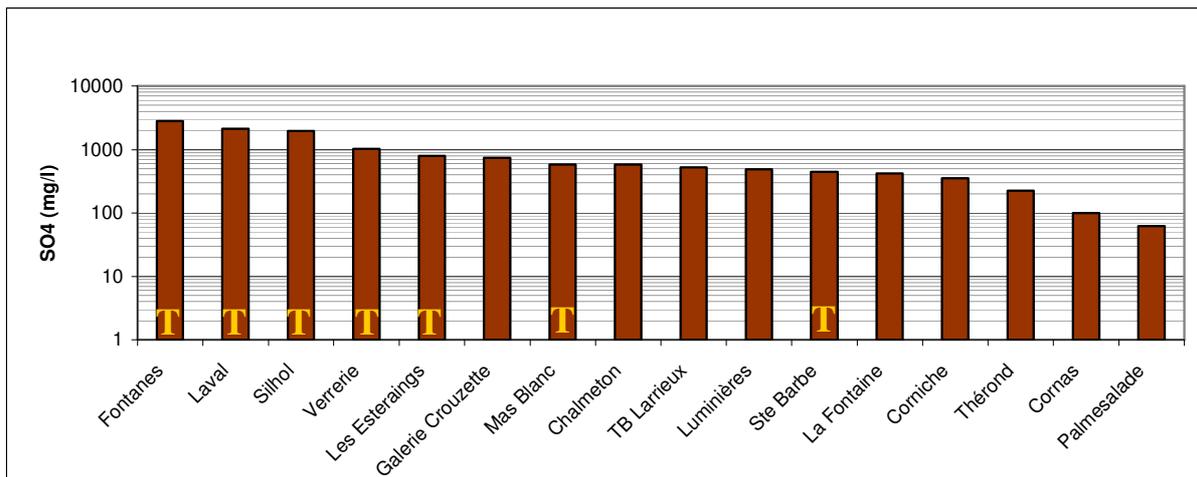


Figure 62 : Représentation d'anciennes mines à proximité de l'émergence de Fontanes (carte IGN)



II.6.2. Les sulfates



Fontanes présente une moyenne proche de 3000 mg/l (Figure 64), largement supérieure à la concentration dans d'autres émergences de mine de charbon et même supérieure à certaines eaux issues de terrains gypseux.

Nous savons que le réservoir minier de Rochebelle-St Martin est en lien avec les terrains triasiques qui le surmontent vers St Raby (Figure 131)

Les 5 premières émergences présentant les concentrations les plus élevées sont toutes recouvertes partiellement de terrains triasiques. Chalmeton présente la particularité d'être liée à une exploitation plus profonde et donc moins influencée par des échanges avec des eaux influencées par la géologie de surface (Cesame, 2002). La Figure 65 se base sur la carte géologique détaillée d'Alès pour mieux situer les terrains triasiques à l'origine des sulfates.

Le fait que Ste Barbe soit recouverte de Trias mais présente des teneurs plus faibles s'explique par une dilution avec une partie des eaux des travaux de l'exploitation à ciel ouvert de Grand Baume. Les eaux de Grand Baume transitent via un travers banc en direction de l'émergence de Ste Barbe (Cesame, 1999).

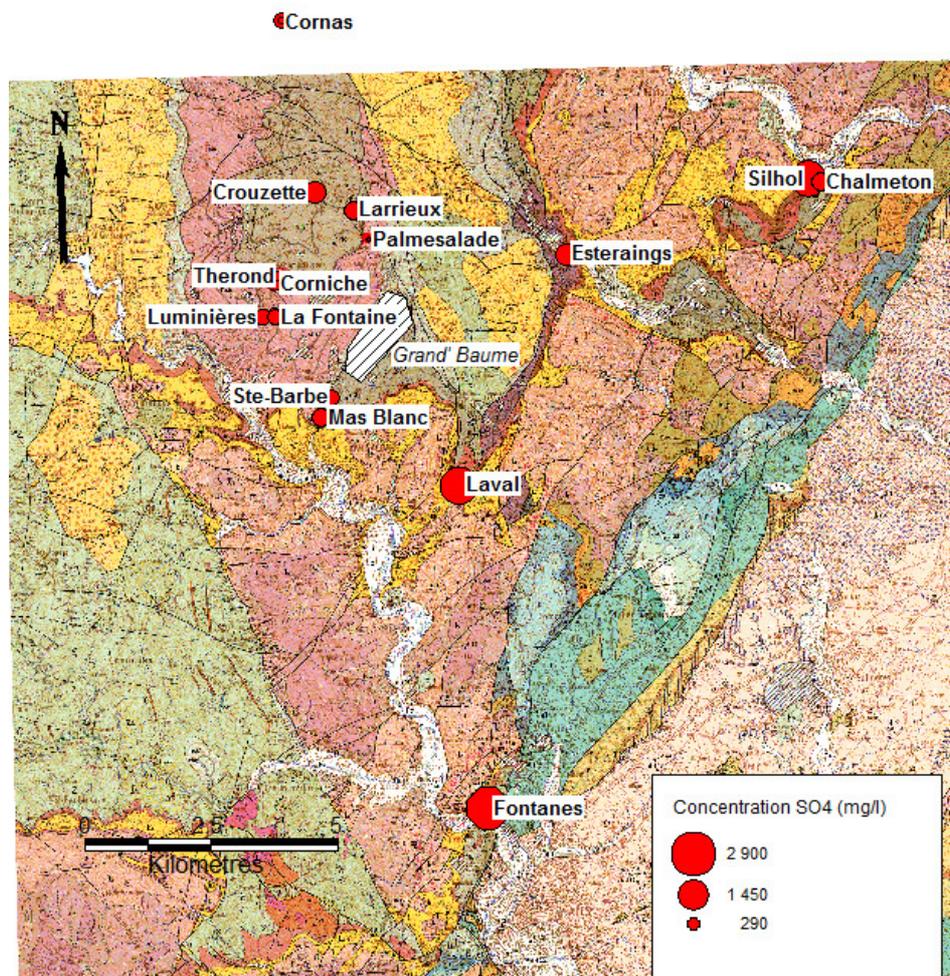


Figure 65 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en sulfates à partir de Berger et al (1978)

II.6.3. Le calcium

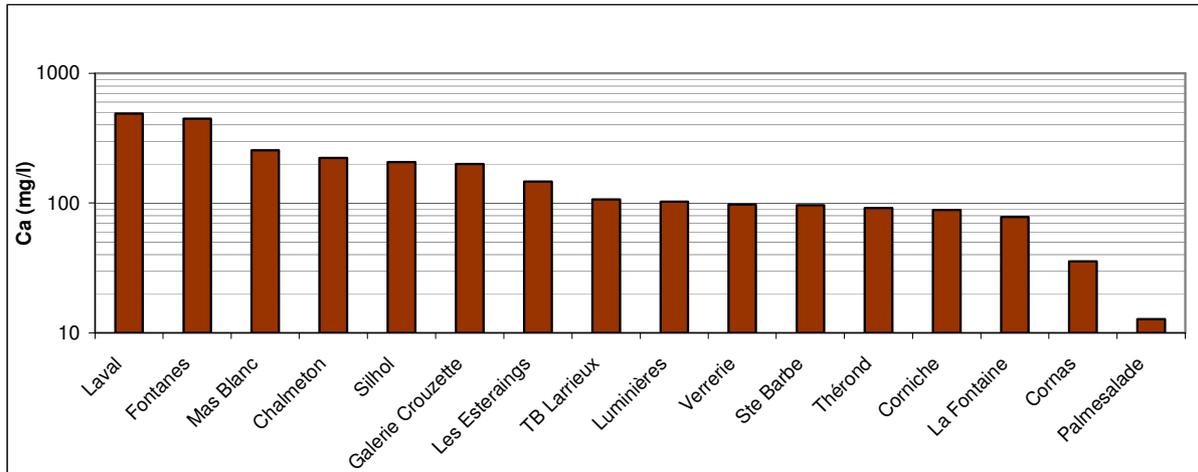


Figure 66 : Moyenne des concentrations en calcium par émergence

L'origine du calcium dans les eaux souterraines provient de la dissolution de différents minéraux (Sigg et al., 2000) voir équations (8), (3) et (10).

Les eaux issues de travaux miniers ont des teneurs variables en calcium comme le montre le Tableau 6. Elles varient de 40 à 420 mg/l sur les exemples cités. Les 5 premières émergences présentant la quantité la plus élevée en Ca^{2+} ont une couverture de surface composée de terrain triasique contenant du gypse, du calcaire et de la dolomie, qui sont les 3 sources potentielles de Ca^{2+} dans la région (Figure 66 et Figure 67).

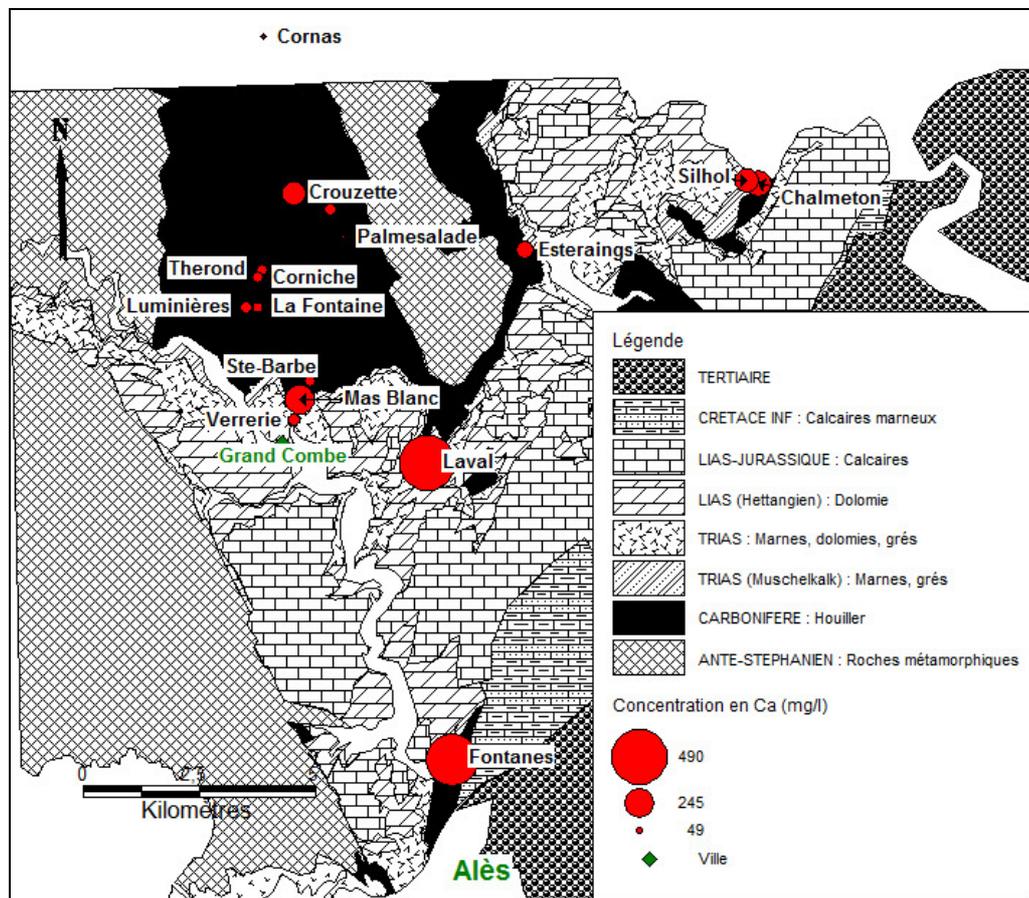


Figure 67 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en calcium

II.6.4. Le sodium

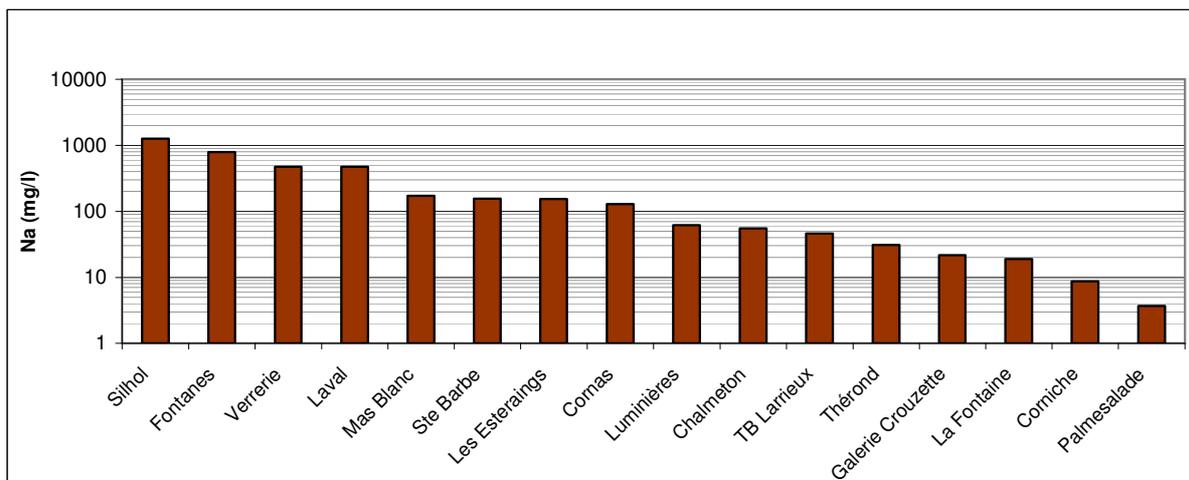


Figure 68 : Moyenne des concentrations en sodium par émergence (sauf émergence de la Verrerie par manque de données)

Sur la zone étudiée, 4 sites présentent des concentrations supérieures à 300 mg/l (Fontanes, Silhol, Verrerie et Laval). Ces concentrations ne sont pas exceptionnelles en France si on regarde le Tableau 6 ainsi les Rieux (42), Faulquemont (57) présentent aussi des concentrations élevées en sodium.

Le classement décroissant des concentrations (Figure 68 et Figure 70) place en tête 5 émergences présentant une couverture partielle de l'exploitation d'origine triasique contenant entre autre de la halite qui se dissout facilement dans l'eau (équation (5)). Ce phénomène de dissolution peut être appliqué aux émergences de Silhol, Fontanes et Verrerie du fait de leurs fortes concentrations en Cl^- (Figure 71). Les autres émergences présentent des concentrations élevées en Na^+ et faible en Cl^-

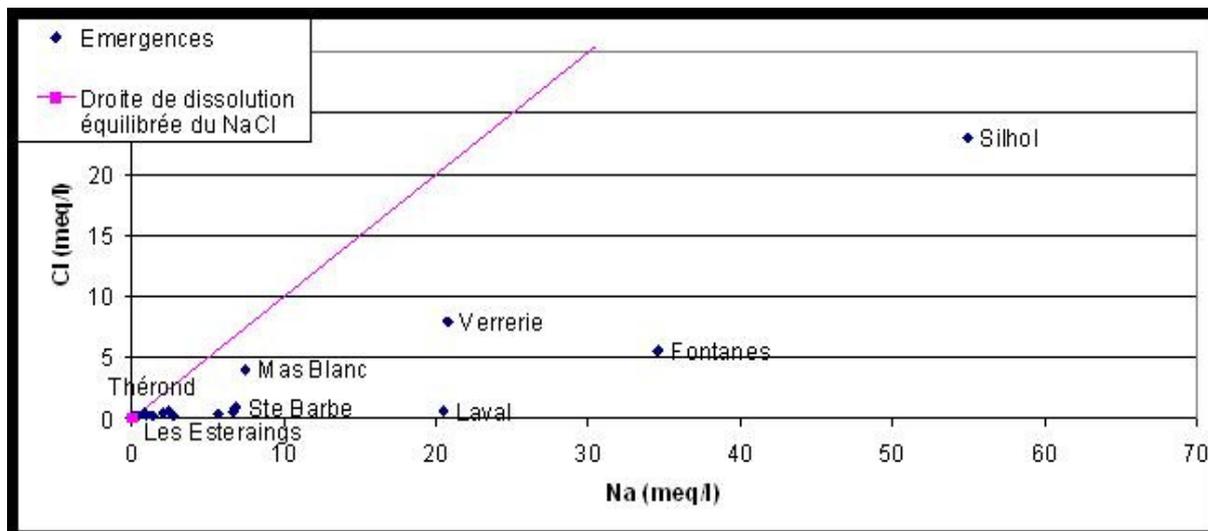
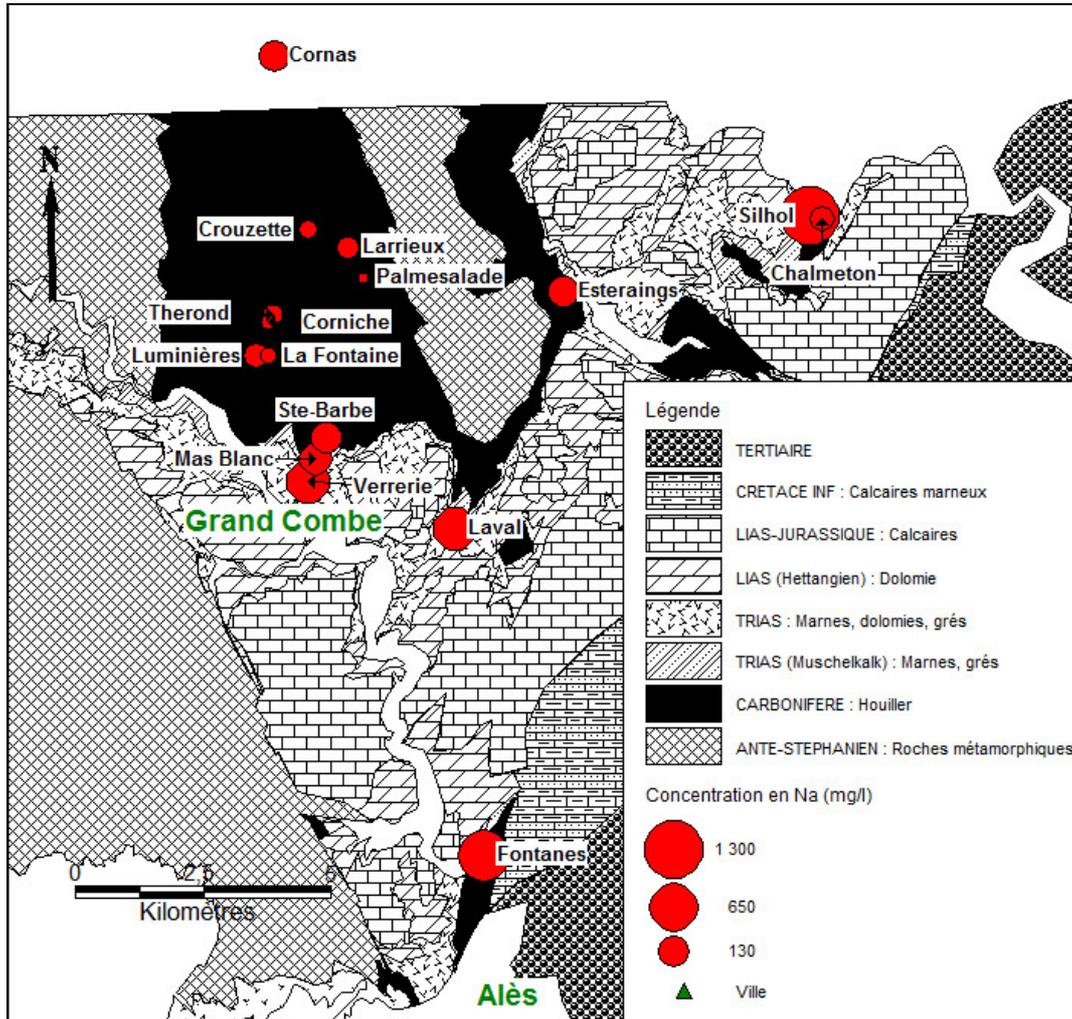


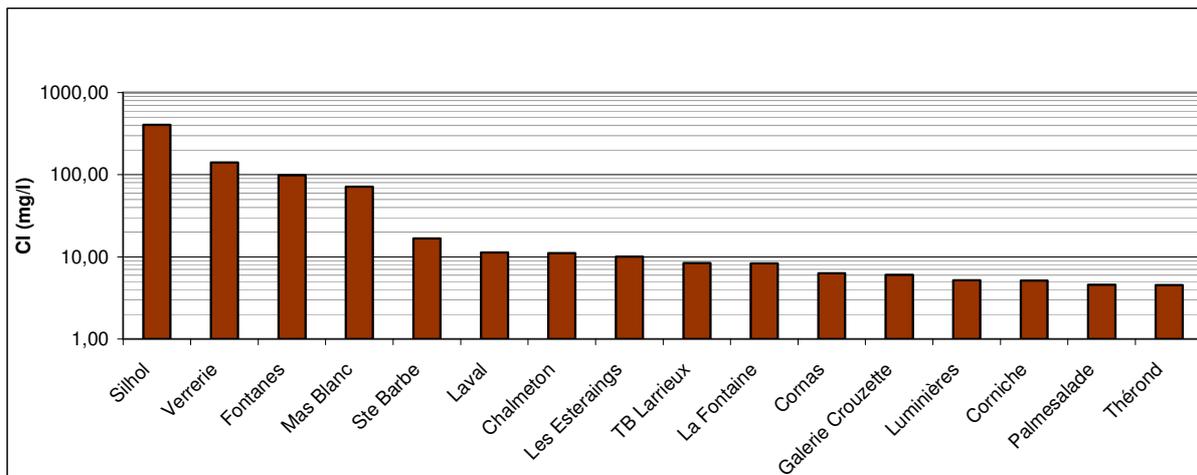
Figure 69 : Représentation de la concentration en Cl (meq/l) en fonction du Na (meq/l) pour les émergences analysées et la droite de dissolution du NaCl dans l'eau.

Les émergences dont l'origine dominante du Na^+ est la dissolution de la halite doivent se trouver à proximité de la droite de dissolution de NaCl dans l'eau (Figure 69). Lorsque le rapport Na/Cl est inférieur à la droite dissolution équilibrée, une autre source de Na existe

dont l'origine possible est l'hydrolyse de minéraux aluminosilicatés contenus dans les couches stériles des terrains carbonifères.



II.6.5. Les chlorures



La teneur en chlorures dans les précipitations de la région est approximativement de 3 mg/l. Cependant, les eaux de rivières de la région contiennent entre 3 et 10 mg/l. L'émergence de Silhol est au-delà de ces valeurs avec environ 400 mg/l (Figure 71 et Figure 72) ; les échanges avec les terrains triasiques qui surmontent les terrains primaires peuvent expliquer cette concentration.

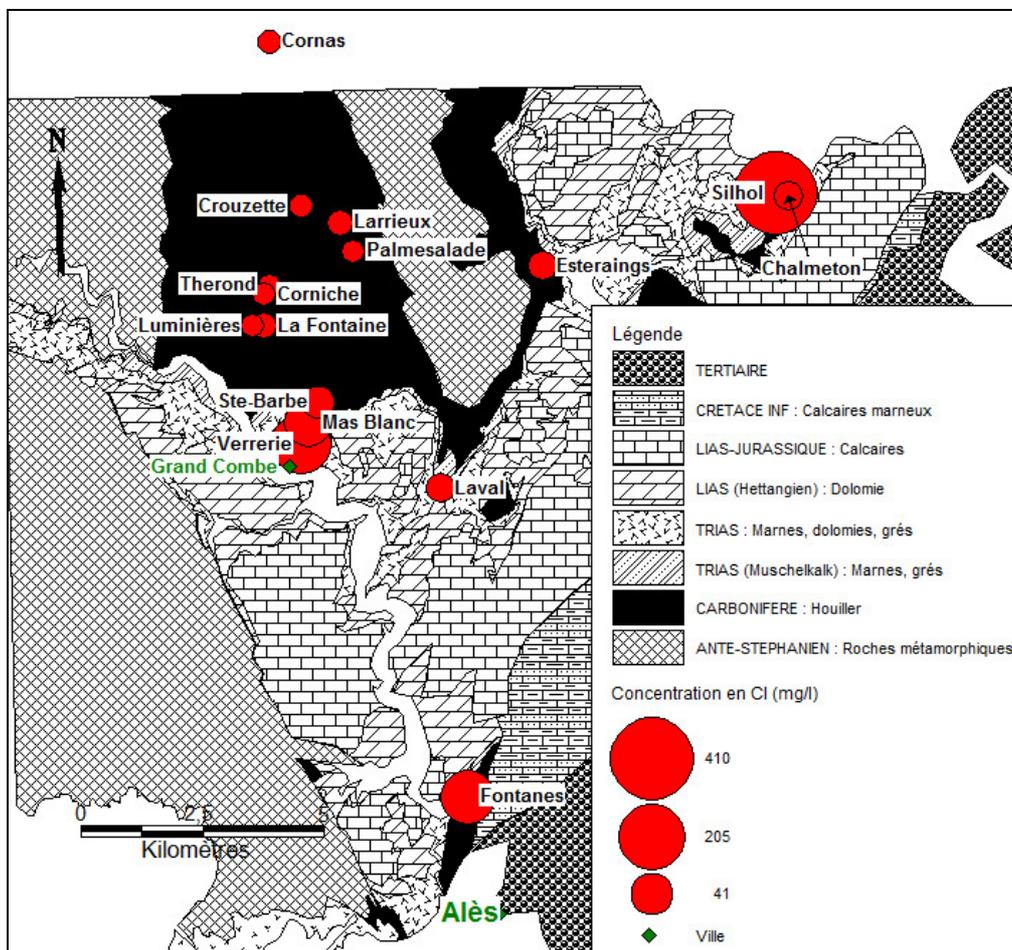


Figure 72 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en chlorures

II.6.6. L'hydrogencarbonate

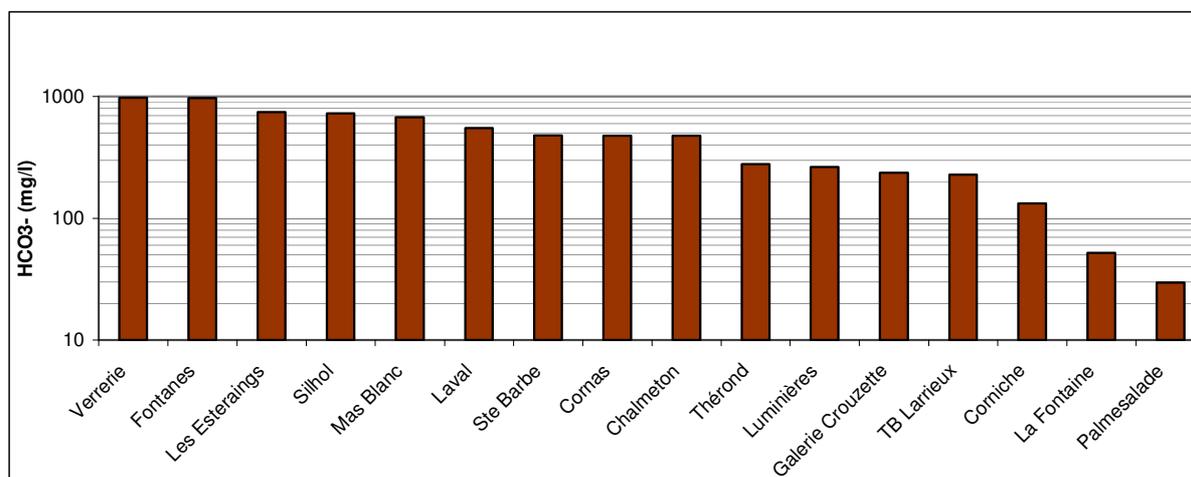


Figure 73 : Moyenne des concentrations en hydrogencarbonate par émergence

Ce sont les eaux souterraines en contact avec des terrains calcaires qui présentent les quantités les plus élevées en HCO_3^- avec environ 400 mg/l (Tableau 2). Les plus fortes concentrations pour les émergences de la zone d'étude présentent plus du triple des concentrations moyennes du fond géochimique en terrains calcaires, avec environ 1000 mg/l (Figure 73 et Figure 74).

Plusieurs origines sont à mettre en parallèle pour expliquer ces fortes concentrations :

- dissolution de carbonate dolomitique de la couverture du réservoir (équation (8))
- dissolution de minéraux silicatés dans les couches stériles du carbonifère (équation (7))
- les mines de la région sont aussi connues pour leur dégagement de CO_2 gazeux. L'ion bicarbonate peut être formé à partir de dioxyde de carbone dans l'eau (équation (9))

Cette même réaction chimique peut être produite par des enzymes, le mécanisme est celui de l'anhydrase carbonique.

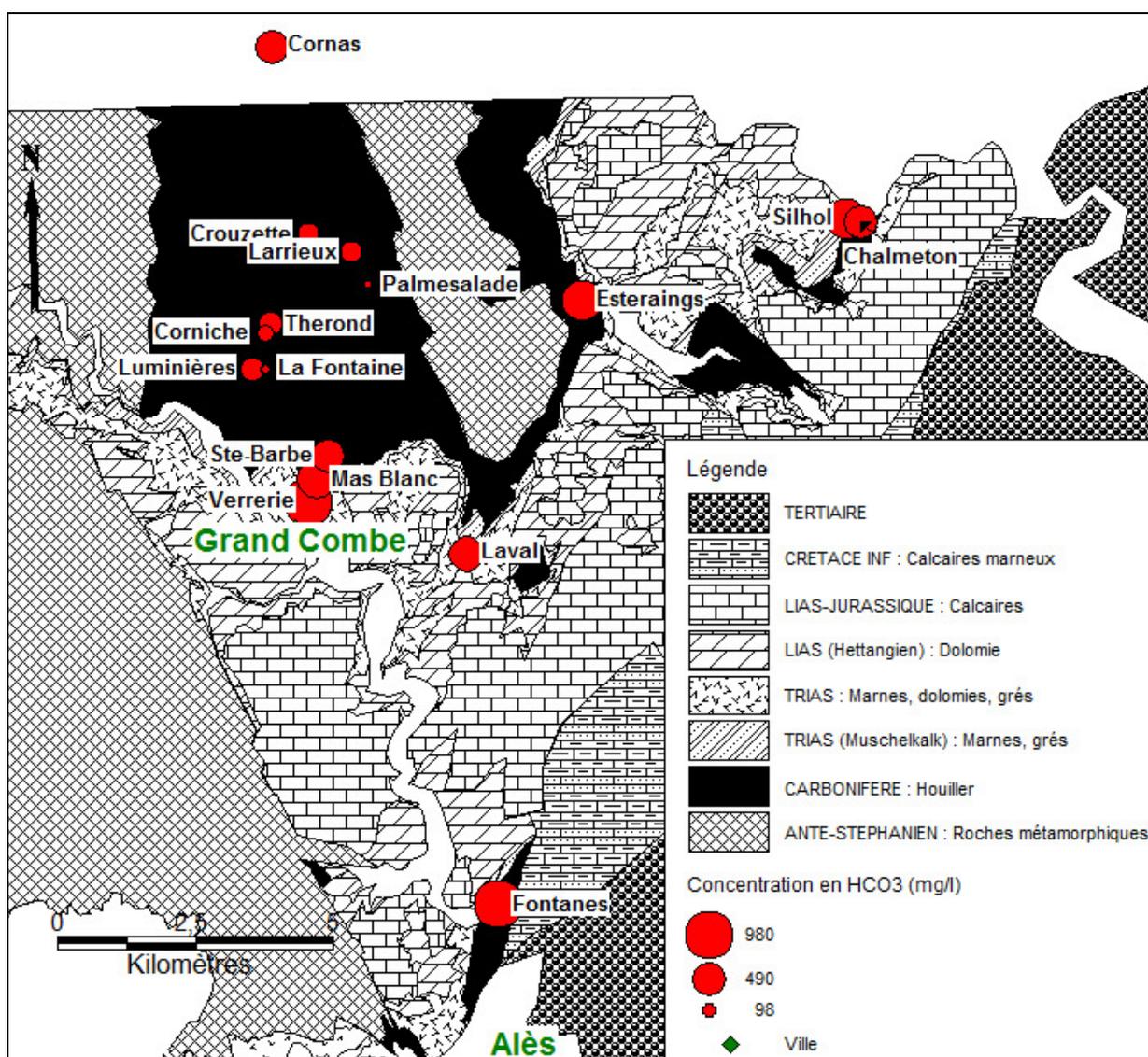


Figure 74 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en hydrogencarbonate

II.6.7. Le magnésium

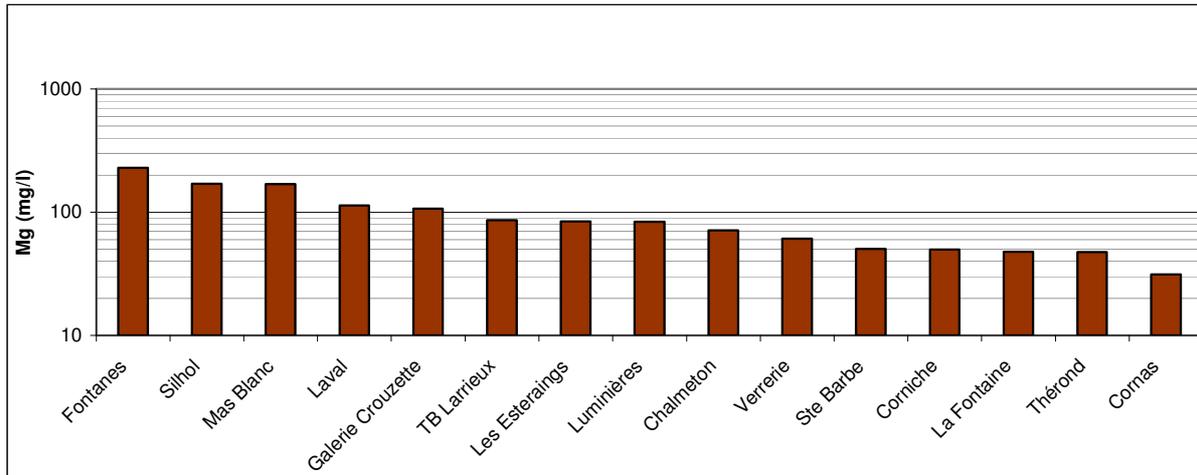


Figure 75 : Moyenne des concentrations en magnésium par émergence

Les eaux en contact avec les charbons (Tableau 6) peuvent avoir une concentration qui va jusqu'à 300 mg/l pour le site de Decazeville. Une partie du magnésium de Fontanes (~200 mg/l - Figure 75) peut provenir de minéraux présent dans les dépôts évaporitiques avec le gypse tel que la dolomite ($\text{Ca, Mg} (\text{CO}_3)_2$) ou par dissolution des dolomies de l'Hettangien qui recouvre le réservoir (Figure 76).

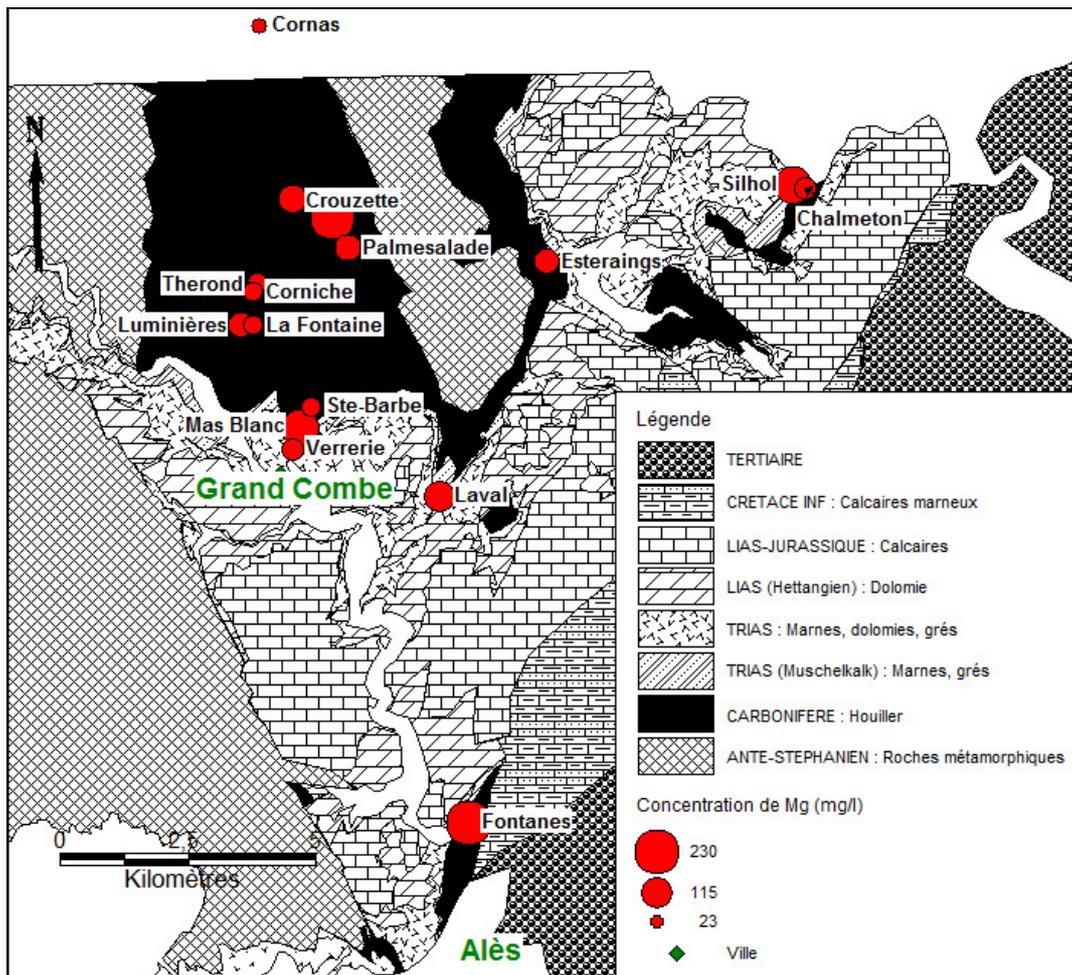


Figure 76 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en magnésium

II.6.8. Les extraits secs

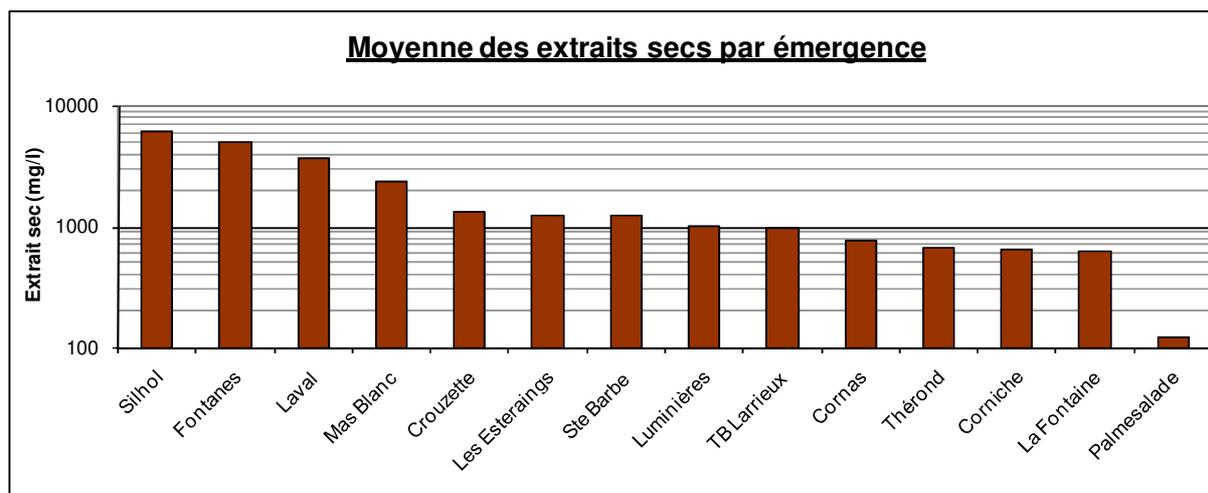


Figure 77 : Moyenne des extraits secs par émergence

Les émergences présentant la plus grande concentration d'extraits secs sont Silhol, Fontanes, Laval, Mas Blanc (Figure 77 et Figure 78). Elles sont toutes les 4 recouvertes par des terrains triasiques gypseux et/ou des dolomies. Les émergences présentant les plus faibles concentrations sont recouvertes par des terrains carbonifères.

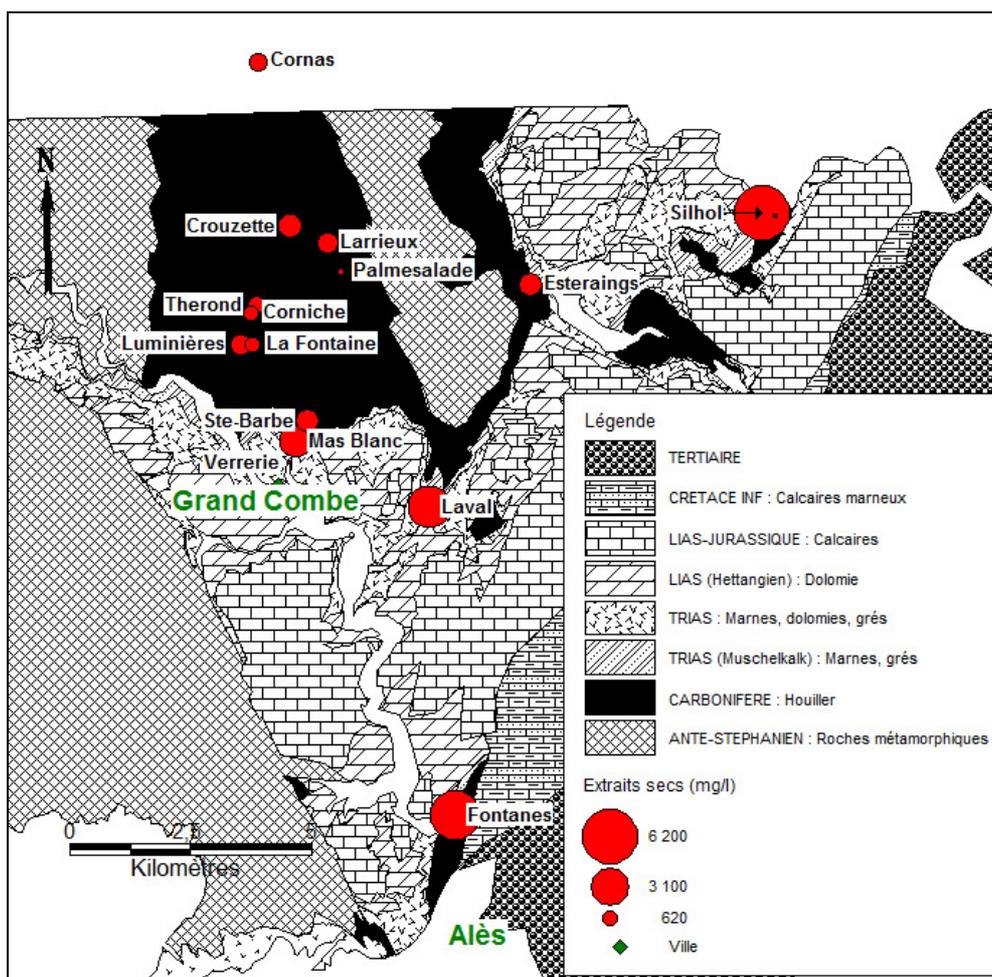


Figure 78 : Représentation des émergences en fonction de leurs concentrations en extraits secs

II.6.9. Conclusion

Sur la zone d'étude, les variations entre minimum et maximum des concentrations en différents éléments sont très grandes et dénotent de la complexité de cette région houillère.

- La moyenne de la teneur en **fer** par émergence varie entre 0,04 et 40 mg/l selon les émergences. Fontanes qui présente la plus forte concentration moyenne (40 mg/l) se situe sous d'anciennes exploitations de fer. Les autres émergences ont des concentrations moyennes inférieure ou égale à 9 mg/l qui sont un ordre de grandeur que nous retrouvons dans d'autres eaux d'anciennes mines de charbon en France.
- La moyenne de la teneur en **sulfates** par émergence varie entre 60 et 3000 mg/l. Fontanes a une concentration moyenne plus forte que les eaux d'anciennes mines de charbon en général. Les plus fortes concentrations sont liées par la présence de couverture triasique gypseuse.
- La moyenne de la teneur en **calcium** par émergence est comprise entre 12 et 50 mg/l. Les émergences présentant les plus fortes concentrations sont recouvertes de terrains triasiques gypseux, de calcaires et de dolomies.
- La moyenne des teneurs en **chlorures** par émergence varient entre 5 et 400 mg/l. Les chlorures contenus dans les précipitations n'expliquent pas les concentrations totales mesurées par émergence. La dissolution de la halite dans les terrains triasiques joue certainement un rôle important sur ces valeurs.
- La moyenne des teneurs en **sodium** par émergence varie entre 4 et 1000 mg/l. Silhol, Fontanes, Verrerie, Laval et Mas Blanc qui présentent les plus fortes valeurs moyennes sont recouvertes par des terrains triasiques. Les autres émergences auraient une concentration en sodium dont l'origine serait l'hydrolyse d'alumino-silicate car la dissolution de la halite n'explique pas tout le sodium au niveau des émergences.
- La concentration moyenne en **hydrogénocarbonate** par émergence varie entre 30 et 1000 mg/l; sa concentration est liée à la présence de dolomie et de calcaire et peut être dû à des dégagements gazeux de CO₂ des charbons.
- Le **magnésium** présente des concentrations moyennes variant entre 30 et 200 mg/l provenant des dolomies.

Les graphiques et cartes obtenues à partir d'un système d'information géographique nous permettent de dire que la répartition spatiale des concentrations en différents éléments sur la zone étudiée est influencée par la couverture géologique puisque les émergences présentant les plus fortes valeurs en extraits secs sont recouvertes, en partie, par des terrains solubles (terrains gypseux et dolomitiques). Les émergences drainant des travaux recouverts par des terrains houillers carbonifères présentent les plus faibles concentrations en extraits secs. La répartition spatiale des concentrations dépend du couvert géologique des exploitations drainées comme l'a montré l'analyse par les diagrammes de Schoeller et de Piper.

II.7. Les variations temporelles

Un réservoir minier évolue dans le temps d'un point de vue chimique. Généralement, la concentration en certains éléments est plus élevée au début du débordement du réservoir car l'interaction eau/roche est plus marquée au cours de l'ennoyage (Figure 15 et Figure 16) et ensuite le réservoir a tendance à se lessiver, 'nettoyer' de certaines concentrations dans les eaux. L'évolution devrait donc dépendre de la date de fermeture (Tableau 25), Cependant cette évolution chimique dépend aussi de la réserve du/des minéraux en contact avec l'eau provoquant de fortes concentrations. Souvent, nous n'avons pas suffisamment de mesures pour mettre en évidence des tendances. Seule l'émergence de Fontanes est analysée régulièrement depuis 1995, puisqu'elle fait l'objet d'un traitement.

II.7.1. Les extraits secs

Les extraits secs nous donnent une évaluation de la tendance générale de la minéralisation des eaux au cours du temps. Pour l'émergence de Fontanes, la décroissance des extraits secs est bien marquée (Figure 79). Notons que l'émergence de Fontanes, correspond à l'exploitation qui a fermé en dernier dans le bassin d'Alès.

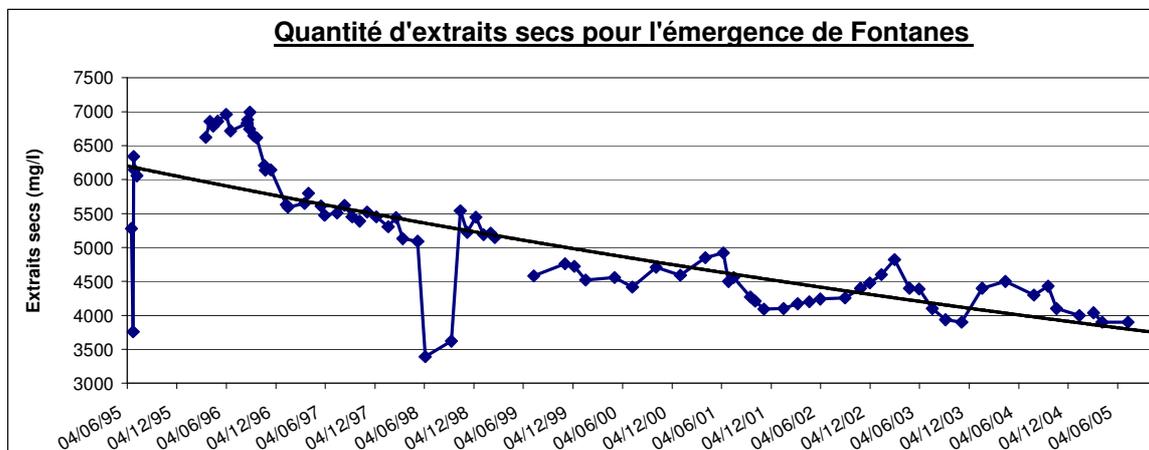


Figure 79 : Evolution temporelle de la concentration en extraits secs pour l'émergence de Fontanes

Pour les autres émergences, sur les deux années de mesures, aucune tendance n'est visible car la plage de mesures est certainement trop courte (Figure 80). Aucune corrélation avec la pluviométrie n'a pu être établie.

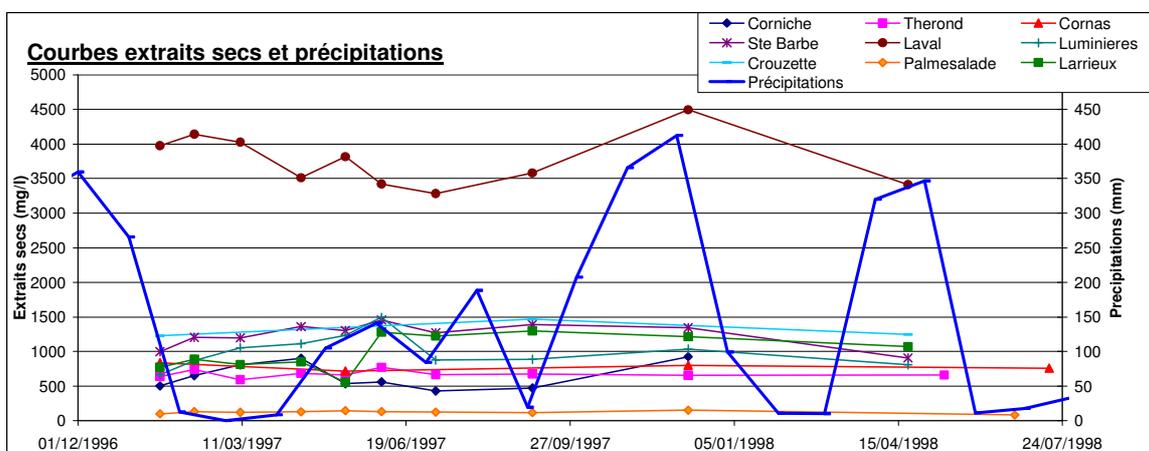


Figure 80 : Evolution temporelle des extraits secs pour les émergences de Corniche, Ste Barbe, Crouzette, Théron, Laval, Palmesalade, Cornas, Lumières et Larrieux.

II.7.2. Les sulfates

L'émergence de Fontanes (Figure 81) présente la plus forte concentration en sulfates de la zone étudiée mais on constate que sur une période d'analyse de 10 ans cette concentration a eu une tendance à décroître entre 1995 et 2000 passant respectivement de ~3500 mg/l à 2500 mg/l. Entre 2000 et aujourd'hui sa concentration fluctue entre 2300 et 2700 mg/l. La valeur stabilisée estimée par Cesame est supérieure aux valeurs mesurées dans les autres émergences d'anciennes mines de charbon françaises (Tableau 6).

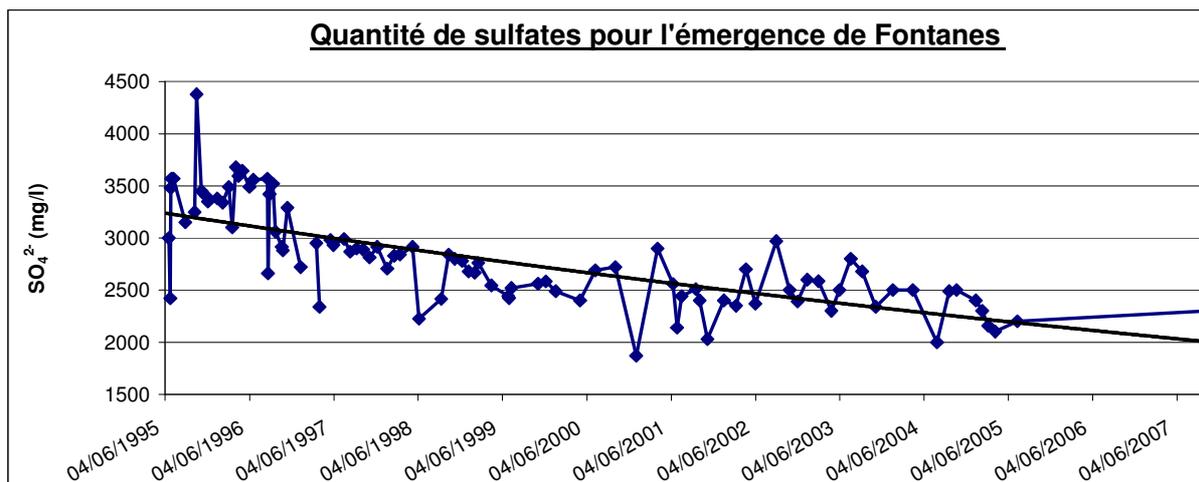


Figure 81 : Evolution temporelle de la concentration en sulfates pour l'émergence de Fontanes

L'émergence de Silhol présente une évolution croissante de 1500 mg/l environ à 3500 mg/l environ avec une stabilisation autour de 3000 mg/l entre 1998 et 2001 (Figure 82). Il n'y a pas de lien évident avec la date de fermeture.

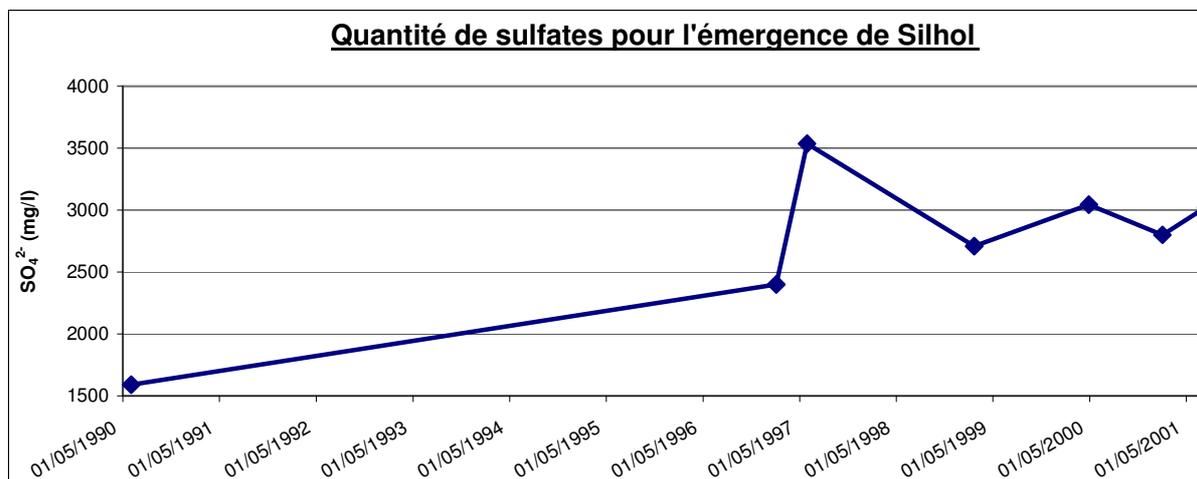


Figure 82 : Evolution de la concentration en sulfates pour l'émergence de Silhol entre 1990 et 2001

Le nombre de points d'analyse est plus réduit que pour l'émergence de Fontanes mais entre 1997 et 2001, la concentration reste stable en moyenne de 2900 mg/l avec une exception pour 1997.

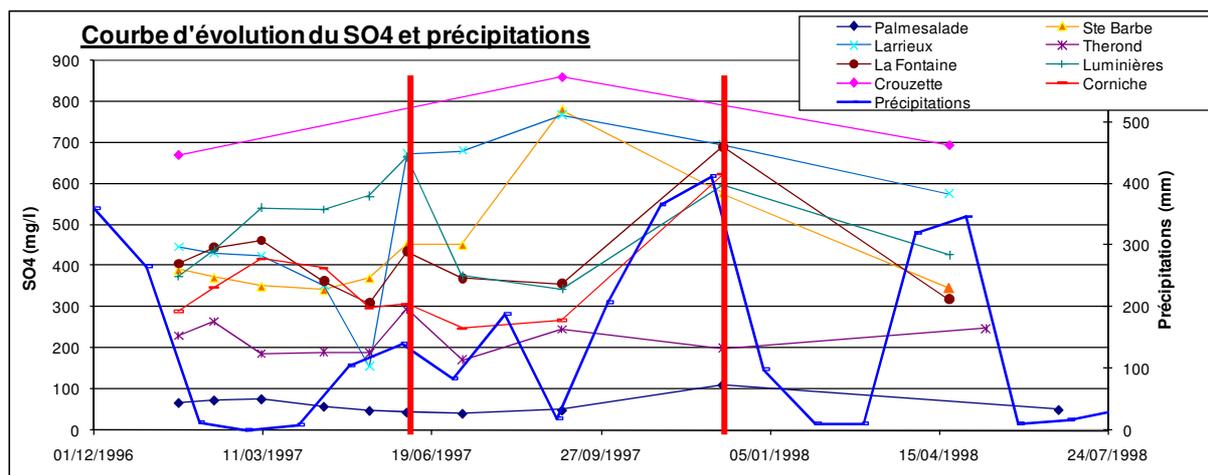


Figure 83 : Evolution temporelle de la concentration en sulfates pour les émergences de Palmesalade, Ste Barbe, Thérond, Lumières, Corniche, Larrieux, La Fontaine, Crouzette ainsi que les précipitations pour l'année 1997

Les émergences représentées sur la Figure 83, n'ont été analysées que sur une seule année (Tableau 16). Il est donc difficile de déterminer une évolution sur le long terme. Il est par contre possible d'observer des fluctuations saisonnières, en particulier des pics de concentrations fin mai 1996 et fin 1997 (traits rouges sur la Figure 83), avec une augmentation de la concentration en sulfates sur les émergences de : Lumières, Larrieux, La Fontaine, Thérond et Ste Barbe. Ces plus fortes concentrations peuvent s'expliquer par une période de faible précipitation en février/mars 1996 et Aout 1997 où des zones sont laissées au contact de l'air (phénomène d'oxydation) et sont ensuite rincées sous l'effet des précipitations du mois d'avril/mai 1996 et septembre/octobre 1997. Annuellement, la concentration de SO_4^{2-} fluctue sans présenter une tendance nette bien marquée.

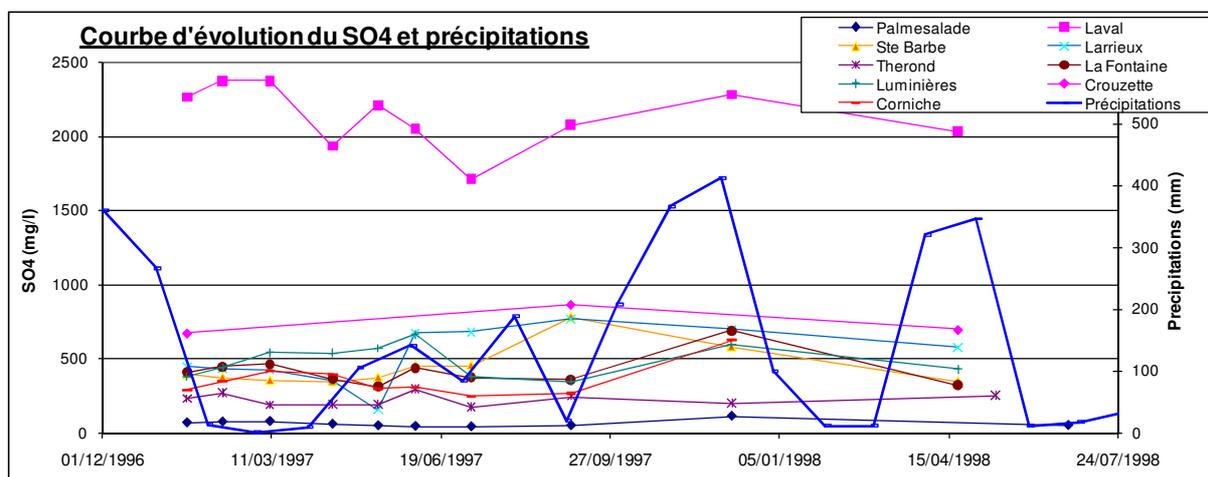


Figure 84 : Evolution temporelle de la concentration en sulfates pour les émergences de Laval, Palmesalade, Ste Barbe, Thérond, Lumières, Corniche, Larrieux, La Fontaine et Crouzette ainsi que les précipitations.

Les émergences de Chalmeton et des Estéraisings présentent peu de données mais, on peut noter une tendance à la décroissance de la teneur en SO_4^{2-} entre 2000 et 600 mg/l pour les Estéraisings et des valeurs stables entre 900 et 800 mg/l pour Chalmeton (Figure 85).

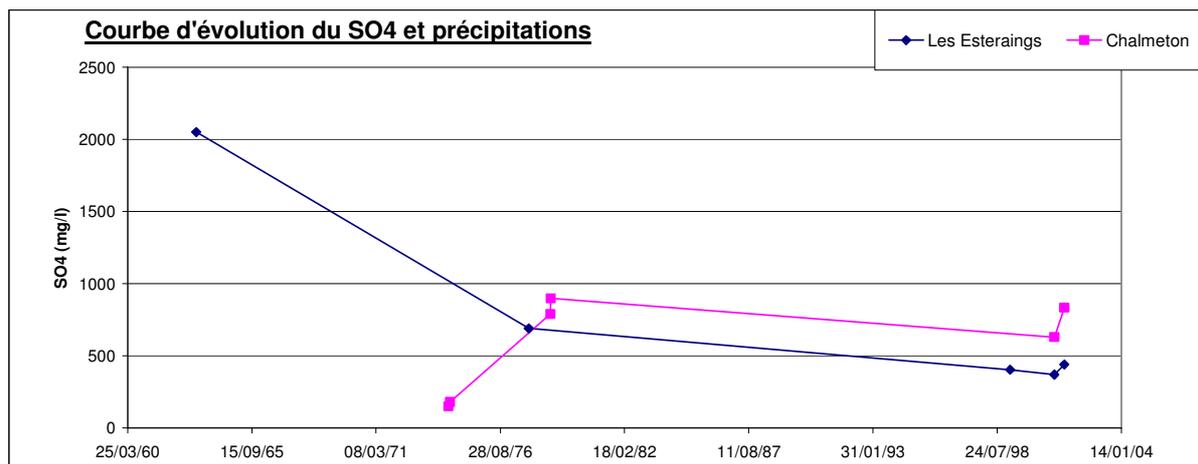


Figure 85 : Courbe d'évolution des sulfates pour les émergences de Chalmeton et des Estéraings

II.7.3. Le fer total

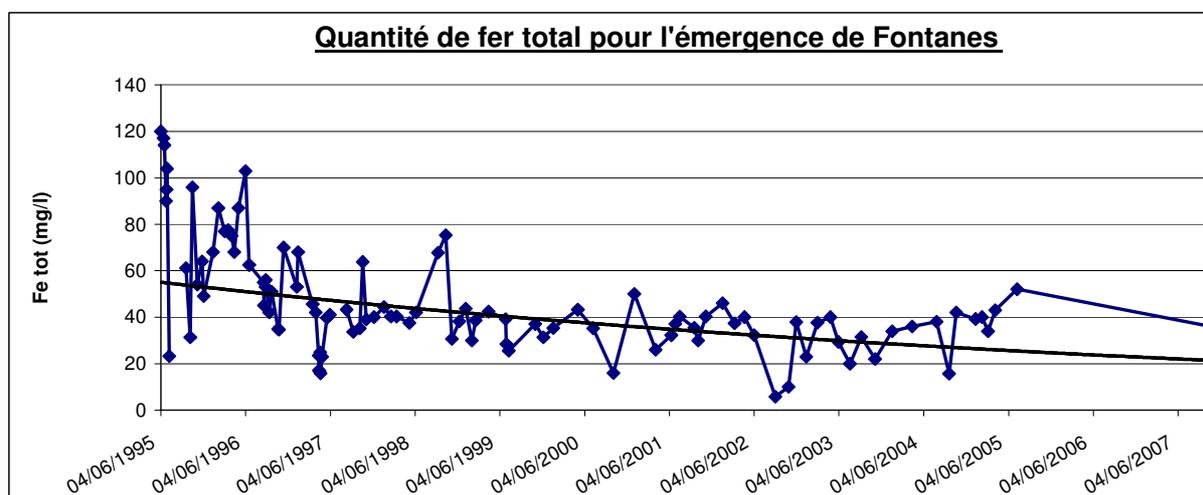


Figure 86 : Evolution temporelle de la concentration en fer pour l'émergence de Fontanes

L'émergence de Fontanes présente la moyenne la plus élevée en fer de la zone d'étude ; cependant nous constatons que cette concentration a tendance à diminuer dans le temps (de 120 à 40 mg/l en 12 ans - Figure 86) voire même à se stabiliser sur les dernières années de prélèvement. Lors de l'ennoyage, les parois sont rincées et les éléments oxydés présents sur les parois sont entraînés dans les eaux ce qui explique les fortes concentrations juste après le début du pompage ; ensuite le lessivage tend à réduire la concentration en Fe total cependant une source constante maintient un niveau stable dans le réservoir car les eaux d'infiltration contiennent de l'oxygène qui continue à entretenir la réaction. La tendance de l'évolution de la concentration en fer est exponentielle décroissante comme le montre la courbe de tendance.

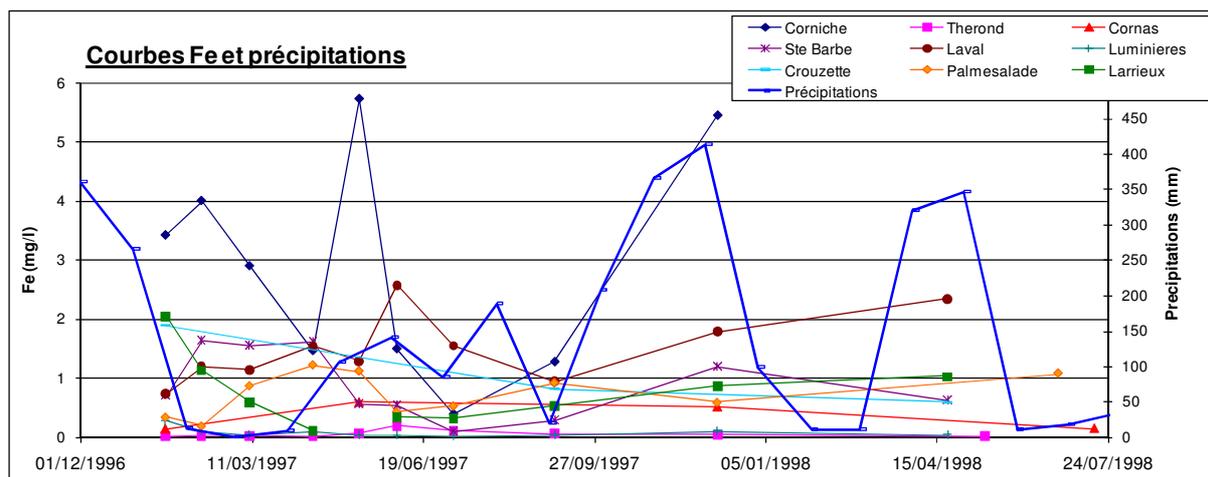


Figure 87 : Evolution temporelle de la concentration en fer pour les émergences de Corniche, Ste Barbe, Crouzette, Théron, Laval, Palmesalade, Cornas, Luminieres, Larrieux ainsi que les précipitations.

L'étude de l'évolution du fer dans le temps devient difficile lorsqu'on considère les émergences autres que Fontanes car les séries de données sont moins complètes. Sur la Figure 87, sont représentées les données pour 9 émergences mais réparties sur une année et demie. Nous avons cherché à voir si les fluctuations observées sur les émergences étaient corrélées avec la pluie mais le lien n'est pas évident et les mesures de concentrations pas assez régulières.

Les émergences de Silhol, les Estérais et Chalmeton présentent peu de points de mesures (Figure 88). Les fluctuations se font entre 0,4 et 2 mg/l entre 1997 et 2001 pour le fer.

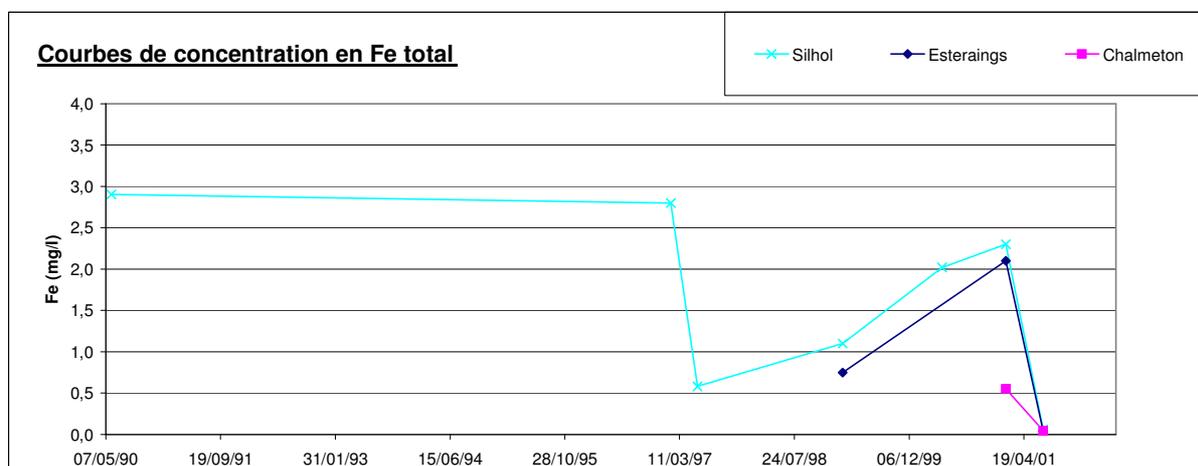


Figure 88 : Représentation des courbes de concentration en Fe total pour les émergences de Silhol, les Estérais et Chalmeton

II.7.4. Les chlorures

L'émergence de Fontanes ne présente pas de tendance pour l'évolution temporelle de la concentration en chlorure mais des fluctuations sont observables entre 40 et 180 mg/l (Figure 89).

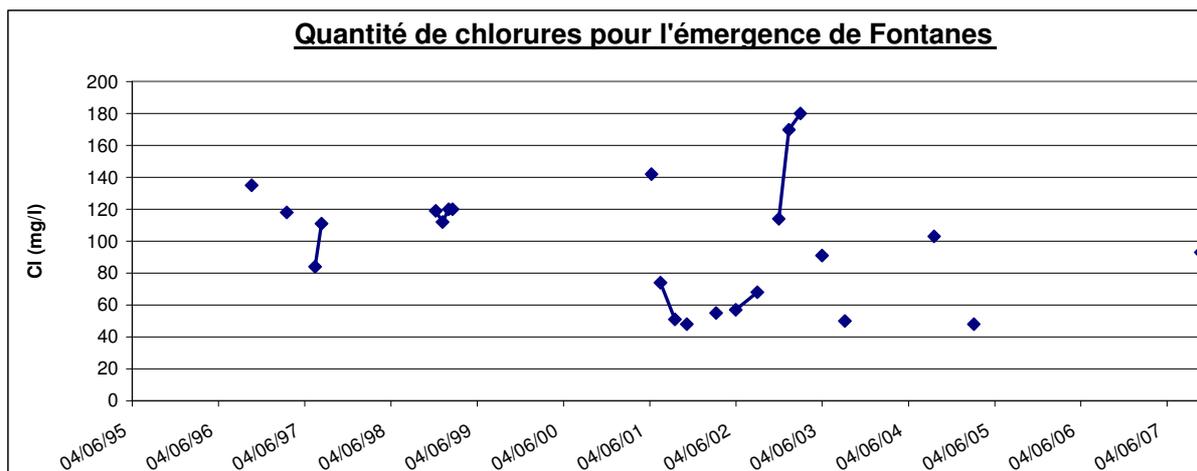


Figure 89 : Evolution temporelle de la concentration en chlorures pour l'émergence de Fontanes

Pour les autres émergences, nous n'arrivons pas à déterminer de tendance générale notamment à cause de la plage de temps réduite pour les campagnes d'analyses (Figure 90). Il est difficile de corréler les précipitations et les fluctuations des concentrations des chlorures.

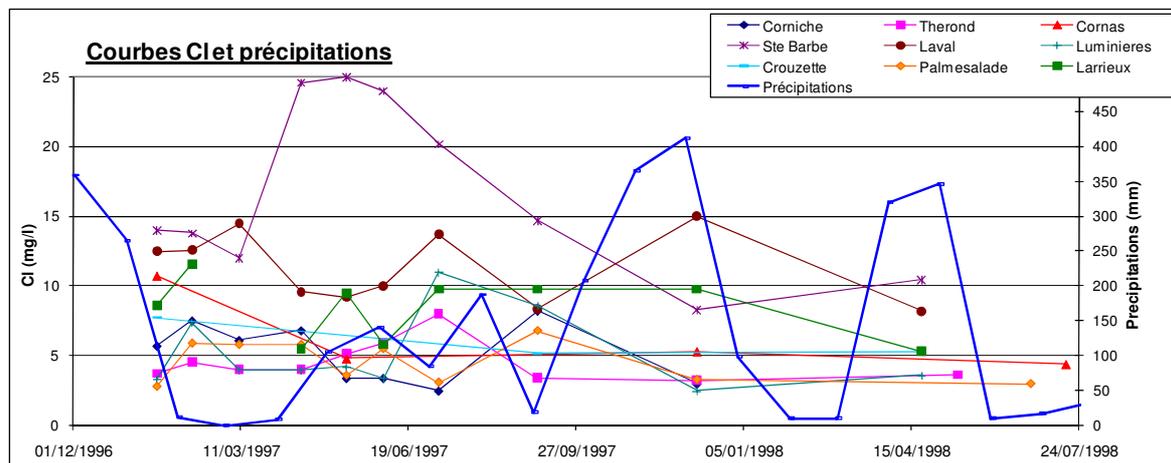


Figure 90 : Evolution temporelle de la concentration en chlorures pour les émergences de Corniche, Ste Barbe, Crouzette, Thérond, Palmesalade, Cornas, Lumières, Larrieux et Laval ainsi que les précipitations.

II.7.5. Le magnésium

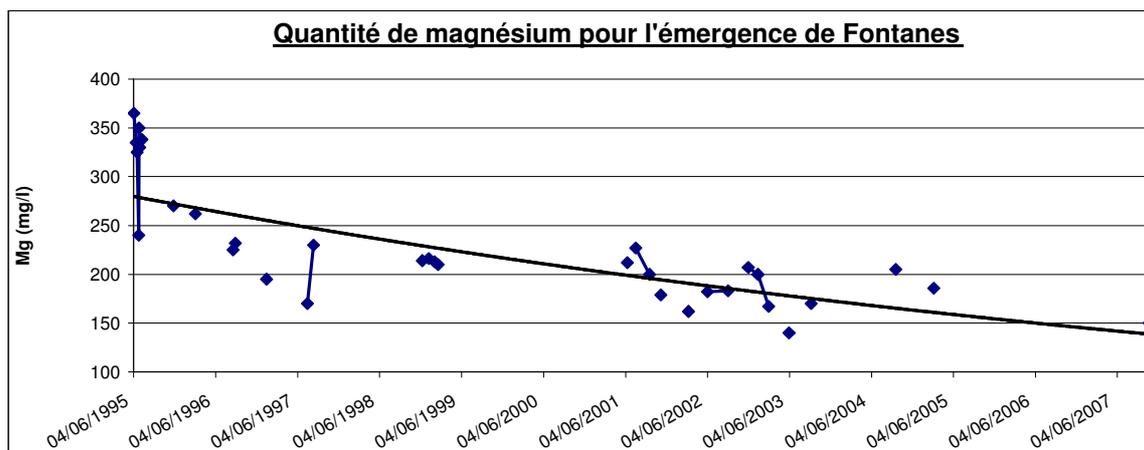


Figure 91 : Evolution temporelle de la concentration en magnésium pour l'émergence de Fontanes

Pour l'émergence de Fontanes, la concentration en Mg^{2+} a une tendance à la décroissance comme le montre la Figure 91 et sa courbe de tendance.

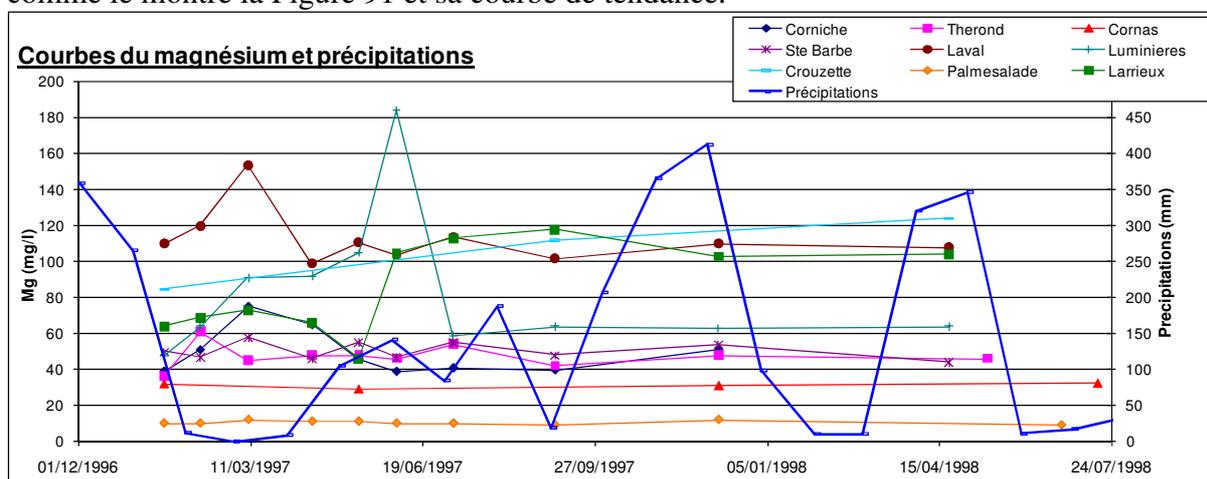


Figure 92 : Evolution temporelle de la concentration en magnésium pour les émergences de Corniche, Ste Barbe, Crouzette, Thérond, Palmesalade, Cornas, Lumières, Larrieux et Laval ainsi que les précipitations

Pour les autres émergences, sur une année d'analyses, aucune tendance n'est visible, seulement des fluctuations sont observables (Figure 92).

II.7.6. Conclusion

Seule l'émergence de Fontanes permet de regarder les évolutions temporelles car les mesures sont disponibles depuis le début de l'émergence des eaux (12 ans).

La quantité d'extraits secs, le fer et les sulfates présentent une décroissance notable pour cette émergence. La teneur en magnésium bien que moins renseignée décroît aussi. Ces courbes décroissantes sont interprétées comme résultant d'un lessivage de l'encaissant.

Il est difficile pour les autres émergences d'observer une évolution temporelle du fait du manque de données sur le long terme.

II.8. Conclusion du chapitre II

Trois facteurs influencent la classification des émergences de la zone d'étude :

- 1- La chimie des eaux varie selon la profondeur du secteur minier drainé par l'émergence : faisceau superficiel, drainage d'ancienne exploitation en découverte ou galerie plus profonde comme le montre le diagramme de Schoeller-Berkalov (Figure 52).
- 2- La chimie est influencée par les roches et minéraux en contact avec l'eau à l'intérieur du réservoir et par la nature lithologique de la couverture au-dessus du réservoir minier et susceptible d'apporter une certaine minéralisation aux eaux d'émergences par percolation comme le montre le résultat des ACP, les diagrammes de Piper et la comparaison des moyennes par émergence. Le phénomène dominant pour la classification est la dissolution des terrains triasiques gypseux marquée par une forte production de SO_4^{2-} , Na^+ , Cl^- et dans un deuxième temps par la dissolution de la couverture calcaire et dolomitique (production de Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^-) et l'oxydation de la pyrite.
- 3- Le débit des émergences qui influencent le lessivage des secteurs traversés (d'après les ACP) et donc les concentrations en éléments dans l'eau.

Deux faciès sont définis suite à l'analyse par les diagrammes de Piper :

- Des eaux sulfatées et calcosodiques issues d'anciennes exploitations recouvertes par des terrains triasiques.
- Des eaux sulfatées calciques et magnésiennes étant proche du faciès des eaux dans les cours d'eau de la région. Les émergences présentant ce faciès drainent des exploitations non recouvertes par des terrains triasiques.

CHAPITRE III :

MODELISATION DU RESERVOIR MINIER DE ROCHEBELLE ST- MARTIN DE VALGALGUES

L'origine de la présence de certains éléments chimiques dans l'eau fait partie de la première étape de connaissance d'un système minier cependant ces masses d'eau doivent être aussi définies par des paramètres hydrodynamiques. En effet, ces paramètres nous permettront de mieux évaluer le comportement de la masse d'eau dans des conditions naturelles et lorsqu'elle est soumise à des agents extérieurs (pompage). Connaître le comportement hydrodynamique de la masse d'eau sera d'autant plus important que celle-ci est fortement chargée chimiquement et donc peut avoir un impact sur l'environnement. Nous avons choisi de modéliser le réservoir minier de Rochebelle-St-Martin de Valgalgues car nous possédons pour ce site plus d'information que sur le reste de la zone d'étude.

Le réservoir minier que nous allons modéliser est mal connu d'un point de vue hydrogéologique.

A partir de la diminution du niveau au niveau du piézomètre de St-Raby (en 3 paliers), Cesame (2006) a établi que le stockage dans le réservoir minier de Rochebelle-St-Martin est de 50 000 m³ par mètre de rabattement ; cependant nous ne connaissons pas l'état des galeries (obstruction, remblayage, foudroyage).

Afin de mieux connaître le fonctionnement hydrogéologique de notre réservoir minier, nous voulons estimer les écoulements qui s'y produisent, en déterminant les paramètres perméabilité et épaisseur. Pour cela, nous avons essayé de reconstituer le niveau piézométrique du puits de Fontanes, sur l'ancienne exploitation de Rochebelle-St-Martin de Valgalgues et du piézomètre de St-Raby.

Nous avons à notre disposition des informations nous permettant de réaliser une modélisation tenant compte du contexte réel autour du réservoir minier :

- la géologie aux limites : substratum constitué de micaschiste semi-imperméable, limites Est et Ouest créées par des failles imperméables. Le houiller affleure à l'est et au Sud de l'exploitation.
- la piézométrie en deux points du réservoir minier
- les données de températures de l'air et de précipitations qui influencent le volume d'eau du réservoir minier.

Une meilleure connaissance du réservoir permettra une bonne exploitation de la ressource si elle est envisagée (géothermie, soutien d'étiage).

Nous décrirons, dans un premier temps, le modèle choisi ; ensuite la surface et la partie souterraine de l'aquifère minier modélisé. Dans un troisième temps, nous décrirons les principes qui reproduisent les circulations dans le réservoir à l'aide d'un modèle à machines séquentielles et enfin nous présenterons les résultats obtenus.

III.1. Notre choix : Modèle à événements discrets basé sur des machines séquentielles

Plusieurs modèles ont été développés pour modéliser les réservoirs miniers (paragraphe I.7) mais nous allons nous attacher à décrire le modèle choisi et ses avantages. Notre choix s'est aussi porté vers un modèle à événements discrets du fait du peu d'information disponible pour décrire le réservoir minier étudié et la facilité d'adapter ce modèle à notre site car il a été développé à l'Ecole des Mines d'Alès. Seuls deux piézomètres existent sur la zone d'étude ce qui réduit la connaissance précise des fluctuations piézométriques de l'ensemble de la nappe. Nous ne possédons pas beaucoup d'information sur les paramètres décrivant l'aquifère tels que la perméabilité, l'étanchéité des limites connues et les échanges entre la rivière et la nappe. La quantité de précipitation atteignant la nappe est hétérogène du fait de la couverture géologique et végétale variée.

Le modèle à structure séquentielle permet de caler ces paramètres et surtout de décomposer notre réservoir minier en plus petites unités (parcelles) nous permettant de décrire ce milieu hétérogène.

III.2. Bilan hydrologique sur la zone d'étude

Le bilan hydrologique prend en compte les phénomènes se produisant au niveau du sol, de la sub-surface et de l'aquifère (Figure 93). Les précipitations qui atteignent la surface du sol peuvent soit retourner vers l'atmosphère par évapotranspiration (ETR), soit ruisseler en surface, soit ruisseler en subsurface (écoulement hypodermique) soit s'infiltrer vers le réservoir minier. Les proportions entre ces différents types d'écoulement dépendent de caractéristiques atmosphériques, de surface du sol et du sous-sol. Nous avons décidé dans le modèle que l'eau qui ruisselle (en surface et subsurface) est une fraction de l'eau disponible (notée $k \cdot ER$). L'eau qui reste s'infiltré (notée $(1-k) \cdot ER$) avec « k » qui dépend de la nature du sol et de la saturation. « ER » est égal à l'eau disponible à laquelle on soustrait la variation de la RFU et l'ETR.

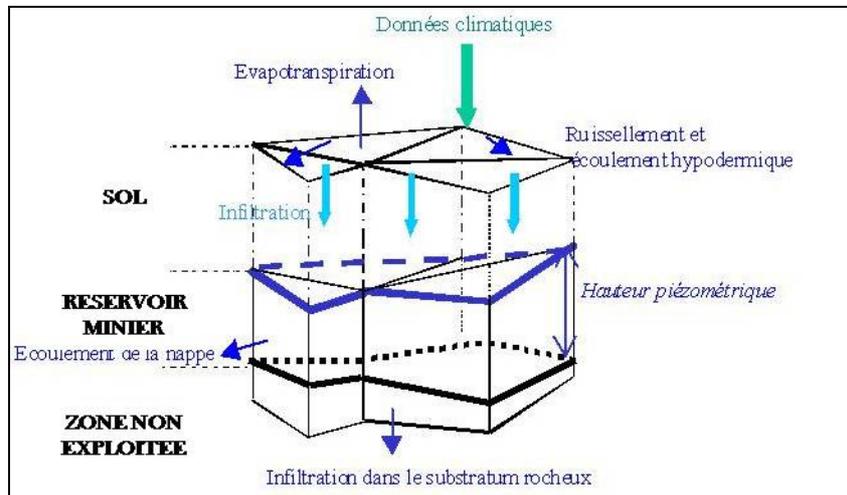


Figure 93 : Phénomènes de surface et souterrain intervenant dans le bilan hydrologique (Courbis et al., 2007)

III.2.1. Evapotranspiration réelle

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la réponse, en termes de vapeur d'eau, d'un milieu donné à la demande exercée par l'évapotranspiration potentielle (ETP) compte tenu de la quantité d'eau disponible.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau susceptible d'être évaporée par une surface d'eau libre ou par un couvert végétal dont l'alimentation en eau n'est pas le facteur limitant (source internet ensmp). Elle est évaluée, dans notre modélisation par l'équation de Thornthwaite (Oudin, 2006) qui a l'avantage de n'utiliser que la température et les précipitations.

Cette formule a été établie en 1944 :

$$(ETP) = C t^a$$

ETP : évapotranspiration mensuelle en cm

t : température moyenne en °C par mois considéré

C et a sont des fonctions de l'indice thermique mensuel donné par :

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \text{ et } a = \frac{1,6}{100} I + 0,5$$

I est l'indice annuel égal à la somme des 12 indices mensuels.

Le terme C est un facteur correctif qui introduit la variation de la durée du jour en fonction de la latitude et de la période de l'année. L'équation peut s'écrire (Thornthwaite, 1957) :

$$(ETP) = 1.6 \left(10 \frac{t}{I}\right)^a$$

L'eau qui est dirigée vers un écoulement de sub-surface (écoulement hypodermique) va servir en partie à la recharge en eau de la réserve facilement utilisable.

L'unité de base de notre système est la parcelle. Chaque parcelle est homogène en végétation, en type de sol, en surface et est liée avec les autres parcelles comme présenté dans le paragraphe III.3.3.

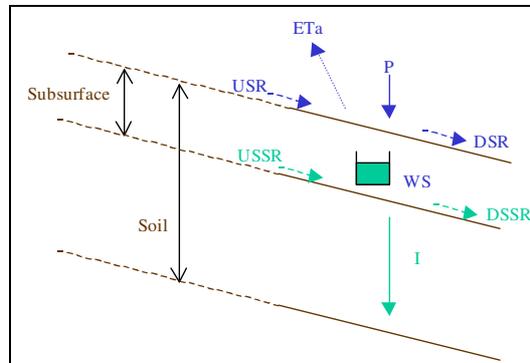


Figure 94 : Représentation des phénomènes de base inclus dans le bilan hydrologique (précipitations (P), Evapotranspiration réelle (Eta), écoulement de surface amont (USR), écoulement de surface vers l'aval (DSR), réserve facilement utilisable (WS), Infiltration (I), eau de subsurface amont (USSR) et écoulement de subsurface vers l'aval (DSSR) (Courbis et al., 2007)

La surface du sol est décrite par 4 variables : les précipitations (P), l'évapotranspiration réelle (Eta), l'écoulement amont de surface (USR) qui provient d'une surface adjacente située en amont de celle décrite et l'écoulement qui se dirige vers l'aval (DSR) de la surface décrite et qui sort du système. La subsurface qui se situe sous la surface du sol est décrite par la réserve facilement utilisable (Water Storage), l'eau de subsurface qui provient de l'amont (USSR) et l'eau qui sort du système au niveau de la subsurface (DSSR). Enfin l'eau qui n'est pas utilisée à la surface ou à la subsurface s'infiltré (I) et se dirige vers la zone saturée (Figure 94).

III.2.2. La zone saturée

La zone saturée reçoit l'eau d'infiltration du sol et de la subsurface. Ces apports d'eau vont alimenter le réservoir minier et en faire varier le volume d'eau donc son niveau piézométrique (Figure 93). La particularité du réservoir minier que nous étudions est la présence d'un pompage encore actif qui va influencer le niveau piézométrique.

Les fluctuations du niveau piézométrique dans le réservoir sont décrites par les équations de Theis et Jacob (Freeze et al., 1979 et Banton et al., 1997) détaillées ci-après.

Le réservoir minier est subdivisé en deux nappes. La limite entre les deux est la rivière et le puits de Fontanes (Figure 97). La nappe Nord s'écoule vers le Sud et la nappe Sud s'écoule vers le Nord en direction du puits de Fontanes.

III.2.3. Pendant le pompage

Le rabattement a pour équation : $s(r) = \frac{Q}{4\pi T}(W(u))$ et $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

s: rabattement en m, mesuré dans un piézomètre
 r : distance r (en m) du puits de pompage
 Q: débit des pompes, m³ /jour
 S: coefficient d'emmagasinement, sans dimension
 T: transmissivité de l'aquifère, m²/jour
 t: temps en jour depuis le début du pompage

Si $1 < u < \infty$:

Une approximation de W(u) est fournie par la relation :

$$W(u) = \frac{1}{ue^u} \left(\frac{d_0 + d_1 u + u^2}{f_0 + f_1 u + u^2} \right) + \varepsilon(x)$$

avec $d_0 = 0,250621$
 $d_1 = 2,334733$
 $f_0 = 1,681534$
 $f_1 = 3,330657$
 et l'erreur $\varepsilon(x) < 5.10^{-5}/(ue^u)$

Si $1 > u$:

Une approximation de W(u) est fournie par la relation :

$$W(u) = -\ln(u) + a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + a_4 u^4 + a_5 u^5 + \varepsilon(x)$$

avec $a_0 =$ constante d'Euler = 0,5772
 $a_1 = 0,99999193$
 $a_2 = -0,24991055$
 $a_3 = 0,05519968$
 $a_4 = -0,00976004$
 $a_5 = 0,00107857$
 et où $|\varepsilon(x)| < 2.10^{-7}$

III.2.4. A l'arrêt du pompage

Le rabattement est appelé rabattement résiduel lorsque le pompage est arrêté et s'écrit :

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} [W(u) - W(u')] \text{ et } u' = \frac{r^2 S}{4Tt'}$$

avec t' = le temps depuis l'arrêt du pompage

$W(u)$ suit les mêmes règles que pendant le pompage, son approximation est différente selon la valeur de u .

Si $1 < u' < \infty$:

$$W(u') = \frac{1}{u' e^{u'}} \left(\frac{d_0 + d_1 u' + u'^2}{f_0 + f_1 u' + u'^2} \right) + \varepsilon(x)$$

avec $d_0 = 0,250621$

$d_1 = 2,334733$

$f_0 = 1,681534$

$f_1 = 3,330657$

et l'erreur $\varepsilon(x) < 5.10^{-5}/(u' e^{u'})$

Si $1 > u'$:

$$W(u') = -\ln(u') + a_0 + a_1 u' + a_2 u'^2 + a_3 u'^3 + a_4 u'^4 + a_5 u'^5 + \varepsilon(x)$$

avec $a_0 =$ constante d'Euler = 0,5772

$a_1 = 0,99999193$

$a_2 = -0,24991055$

$a_3 = 0,05519968$

$a_4 = -0,00976004$

$a_5 = 0,00107857$

et ou $|\varepsilon(x)| < 2.10^{-7}$

III.3.Principe de modélisation

Les écoulements de surface et de subsurface se dirigent vers le Gardon et ne contribuent pas à l'alimentation de la nappe souterraine. Nous allons nous intéresser dans notre modélisation uniquement au comportement de la zone saturée en observant les fluctuations de niveau piézométrique.

Selon l'échelle à laquelle nous considérons le réservoir minier à modéliser (échelle globale, du versant ou de la parcelle) des informations sont rassemblées dans des fichiers sous formes de tableaux afin que le modèle puisse récupérer les données qui lui sont nécessaires pour faire les calculs qui seront détaillés ensuite. La structure de base du modèle est décrite Figure 95. Nous cherchons à modéliser un bassin versant, qui est représenté par 2 versants, traversé par une rivière (le Gardon) et possédant une nappe souterraine subdivisée en deux parties. Chaque versant est divisé en parcelles (Figure 95) qui sont décrites par leur géologie et leur végétation homogène qui influencent l'infiltration en direction de la nappe souterraine.

III.3.2. Echelle du versant

Le bassin versant pourrait être décomposé en 2 ou 3 versants selon le contexte (Figure 95). Ici le réservoir minier est subdivisé en deux versants.

La ligne passant par le puits de Fontanes est définie comme une limite à flux nul. Au niveau de cette limite, les eaux se dirigent vers le pompage.

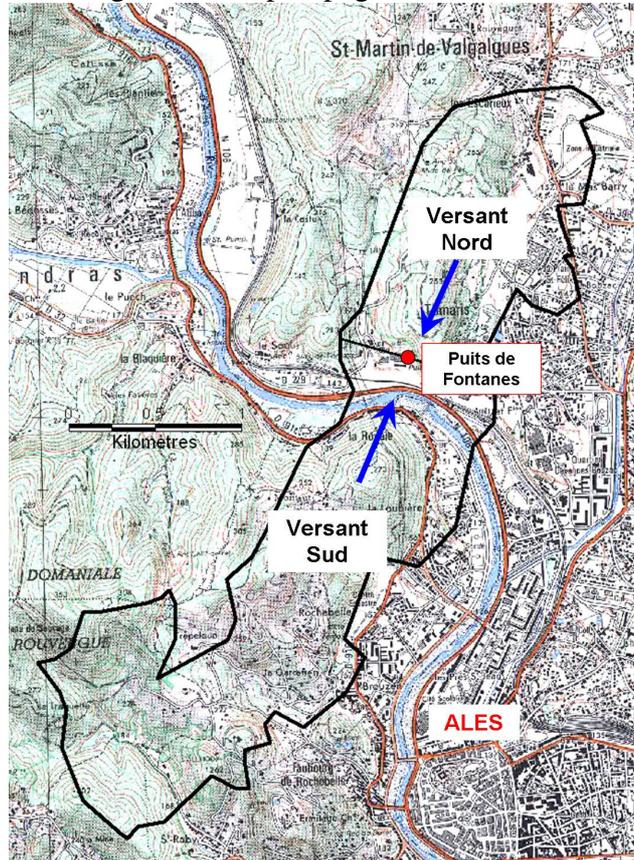


Figure 97 : Réservoir minier subdivisé en deux bassins versants (carte IGN)

Le Tableau 34 (annexe 8) contient les informations relatives à ces deux versants dont :

- la surface
- le périmètre
- la longueur et la largeur du versant
- le nom de la nappe associée au versant
- la perméabilité qui peut être modifiée à partir de la fenêtre de modélisation
- le coefficient d’emmagasinement
- l’épaisseur de la nappe

Le Tableau 35 reprend les informations du Tableau 34 et la dernière colonne (catchment) informe sur l’appartenance des deux versants au réservoir de Fontanes.

Chacun des versants contient une nappe définie dans le Tableau 36 (annexe 8) décrivant une seule masse d’eau. Pour chaque nappe, ce tableau contient le niveau piézométrique à $t=0$ (généralement le premier jour de la simulation) pour le puits de Fontanes (niveau le plus bas de la nappe, ce niveau piézométrique est noté H2). H1 correspond au niveau piézométrique au point le plus haut de la nappe à $t=0$.

III.3.3. Echelle de la parcelle

Chaque versant est découpé en plusieurs parcelles homogènes définies selon la géologie et la végétation qui le recouvre. Plus les terrains décrits sont hétérogènes, plus le nombre de parcelles sera important. Pour cette étude, le versant Nord est constitué de 4 parcelles et le versant Sud de 10 parcelles (Figure 98). Les connexions entre les parcelles peuvent être complexes ainsi prenons l'exemple de P_{1N}, P_{2N} et P_{3N} (Figure 98). Pour les eaux de surface et de subsurface, la parcelle P_{1N} se déverse dans la rivière et est alimenté par la parcelle P_{2N} et P_{3N}. L'infiltration, elle, alimente la nappe. La parcelle P_{3N} s'écoulant aussi en partie en direction de la rivière. La complexité des écoulements naturels est prise en compte.

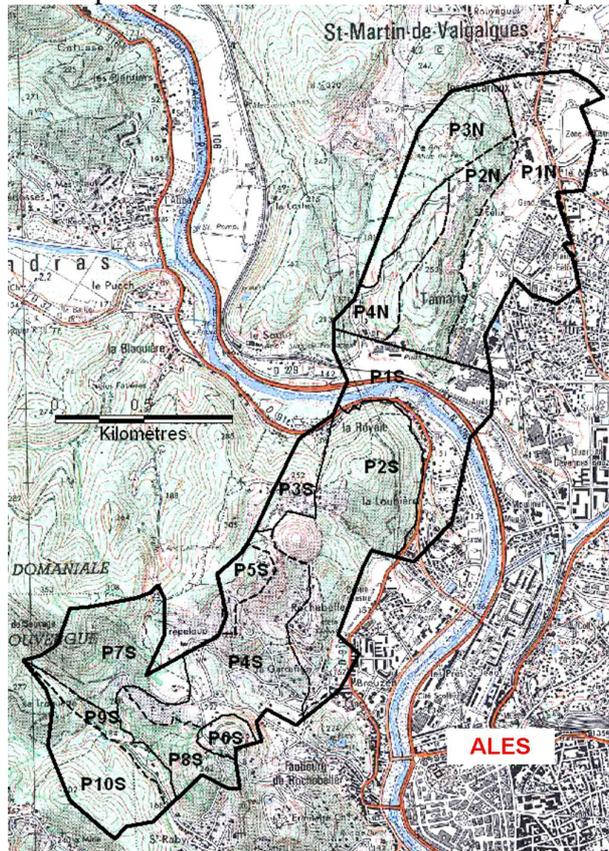


Figure 98 : Parcelles constituant le réservoir minier de St Martin de Valgalgues (carte IGN)

Le fichier décrivant les parcelles se nomme (parcel .dbf) et contient les informations suivantes pour chaque parcelle (Tableau 37):

- le nom de la parcelle (name)
- sa surface et son périmètre
- la réserve facilement utilisable (*Available storage*)

Une parcelle peut recevoir de l'eau provenant de parcelle adjacente. Une longueur de contact entre chaque parcelle est donnée. Le champ *slope* indique si la parcelle décrite appartient au versant Nord ou Sud et 'landcover' renseigne sur le type de végétation recouvrant la surface de la parcelle.

Le coefficient d'infiltration est décrit dans la colonne 'infiltration rate' mais peut être modifié par la suite depuis la fenêtre permettant de lancer la modélisation. L'infiltration est un paramètre qu'il est possible d'ajuster dans le modèle.

III.4. Connexion à l'intérieur du modèle

La page de modélisation (transformation de la base de données en modèle simulable) a été écrite en C++ et les informations relatives au bassin à modéliser sont stockées dans une base de données décrite par les Tableau 32, Tableau 33, Tableau 34, Tableau 35, Tableau 36 et Tableau 37.

Le modèle est construit par une approche hiérarchique : à la première étape de la modélisation, tous les phénomènes mis en jeu dans le bilan hydrique d'une parcelle sont modélisés par des machines séquentielles qui sont ensuite interconnectées (voir la Figure 135-a annexe 9). Une machine séquentielle décrit le comportement d'un système par rapport à une interface entrée/sortie du système et des fonctions de transition calculant l'évolution de l'état du système en présence d'évènements discrets.

A tout phénomène de base correspond un comportement de base décrit précédemment. Le pas de temps de la modélisation peut être modifié, nous pouvons passer de journalier à mensuel ou encore par décade sans modifier le modèle ou le simulateur.

L'interconnexion des modèles de parcelle permet de représenter le bilan hydrique à l'échelle du versant (voir Figure 135-b annexe 9). Les connexions sont dynamiquement déterminées d'après la théorie proposée par Zeigler (1984) en tenant compte des écoulements de l'amont vers l'aval en surface et dans la partie souterraine. Dynamiquement définit l'outil de modélisation va lire la table de description des parcelles (parcel.dbf - Tableau 37), qui indique aussi quelles parcelles ont une relation de dominance sur une autre, autrement dit quelles parcelles sont en amont hydraulique d'autres parcelles.

En fonction du résultat de cette analyse, l'outil crée automatiquement des connexions spécifiques modélisant les dominances (au niveau du ruissellement de surface et de subsurface). La dominance définit quelle parcelle s'écoule dans une autre. La dernière étape du processus de modélisation consiste à relier les modèles de versant avec celui des eaux souterraines, y compris le pompage, et le modèle de rivière afin de représenter l'ensemble du bassin versant (voir Figure 135-c annexe 9).

III.4.1. Description de la géologie superficielle

La géologie de surface du réservoir minier est variée comme le montre la Figure 99. Les types de roches qui constituent cette surface sont des marnes, du gypse, des dolomies, du calcaire, des calcaires marneux, des grès et des charbons. Le réservoir minier se développe dans les terrains datés du primaire composés de charbon et de schistes. Les travaux miniers s'étendent sur une surface d'approximativement 4,36 km². Les limites à l'Est, à l'Ouest et au Sud sont en partie des failles supposées imperméables pour notre modélisation, tandis qu'au Nord la limite sera prise comme la limite d'extension des travaux miniers. Il faut noter que la faille qui constitue la limite Est du réservoir est représentée sur la carte à l'affleurement et a une orientation Est 45 (Berger et al., 1978) et en profondeur elle tend à se rapprocher de la limite d'extension des travaux miniers d'où le choix de la surface modélisée.

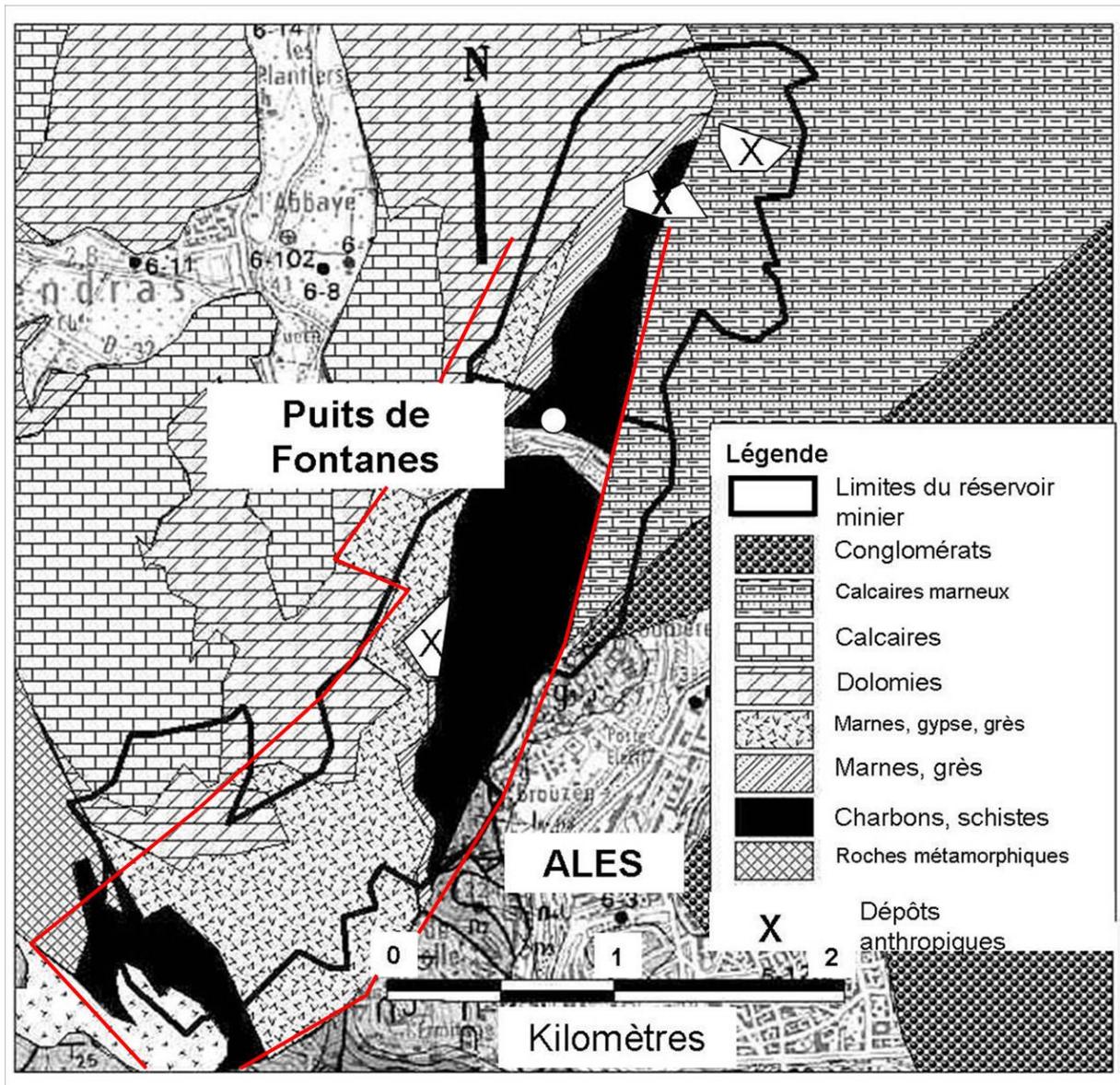
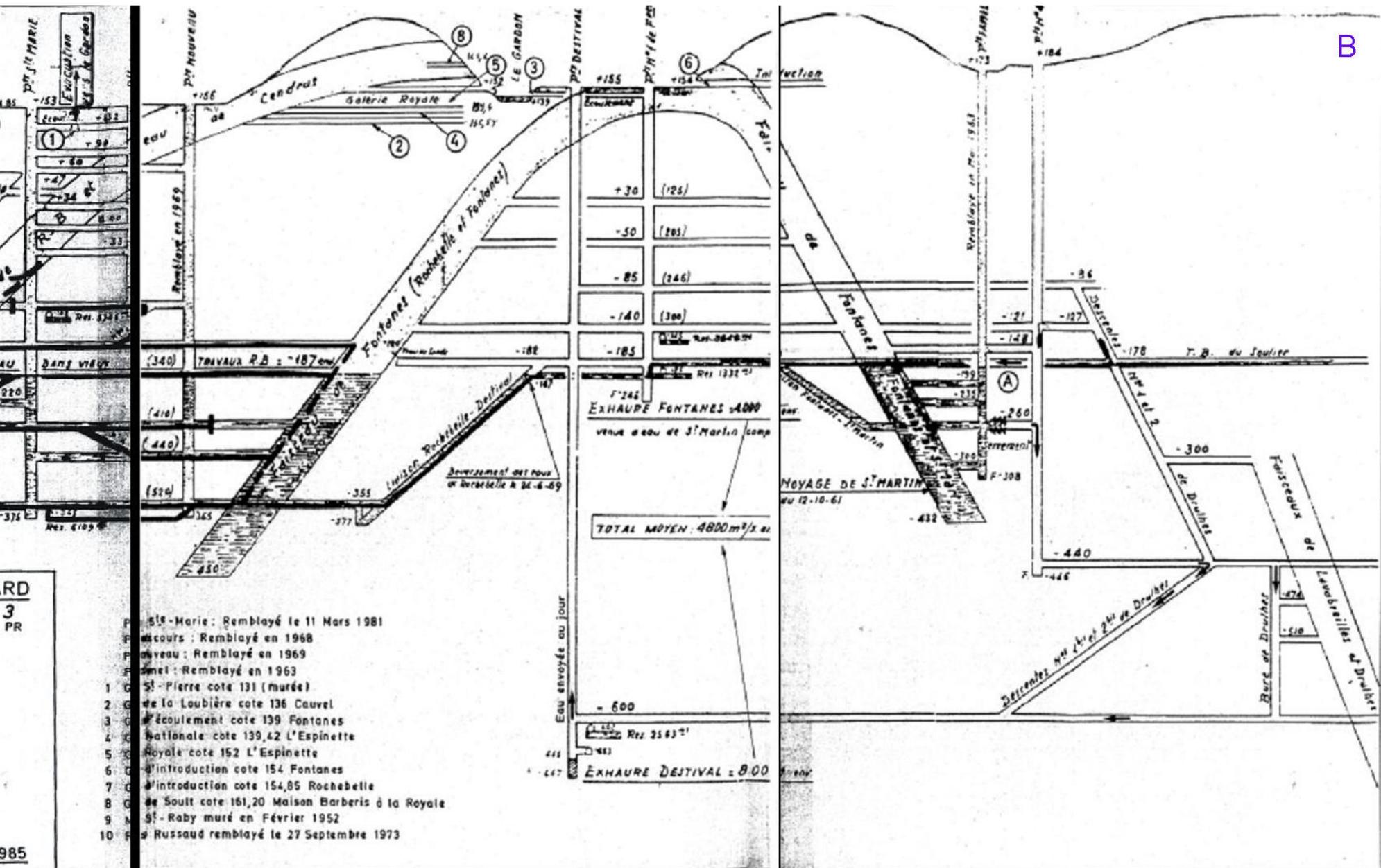


Figure 99 : Carte représentant la géologie à la surface du réservoir minier de Rochebelle – St-Martin de Valgalgues et les failles (ligne rouge) d’après Cesame, 2006

Spatialement, les couches de charbons ne sont pas horizontales et les galeries suivent en partie la géométrie particulière du houiller. Il est difficile dans ce cas de définir avec précision l’épaisseur du réservoir minier (Figure 100)



Plan de la coupe de l'exploitation de houille de Rochebelle-St Martin de Valgalgues (HBCM) dont la localisation se trouve Figure 131.

III.4.2. Description de la couverture végétale

La végétation est variée à la surface du réservoir minier : forêts de conifères, d'arbres à feuilles caduques, mixte mais aussi de la lande (Figure 101).

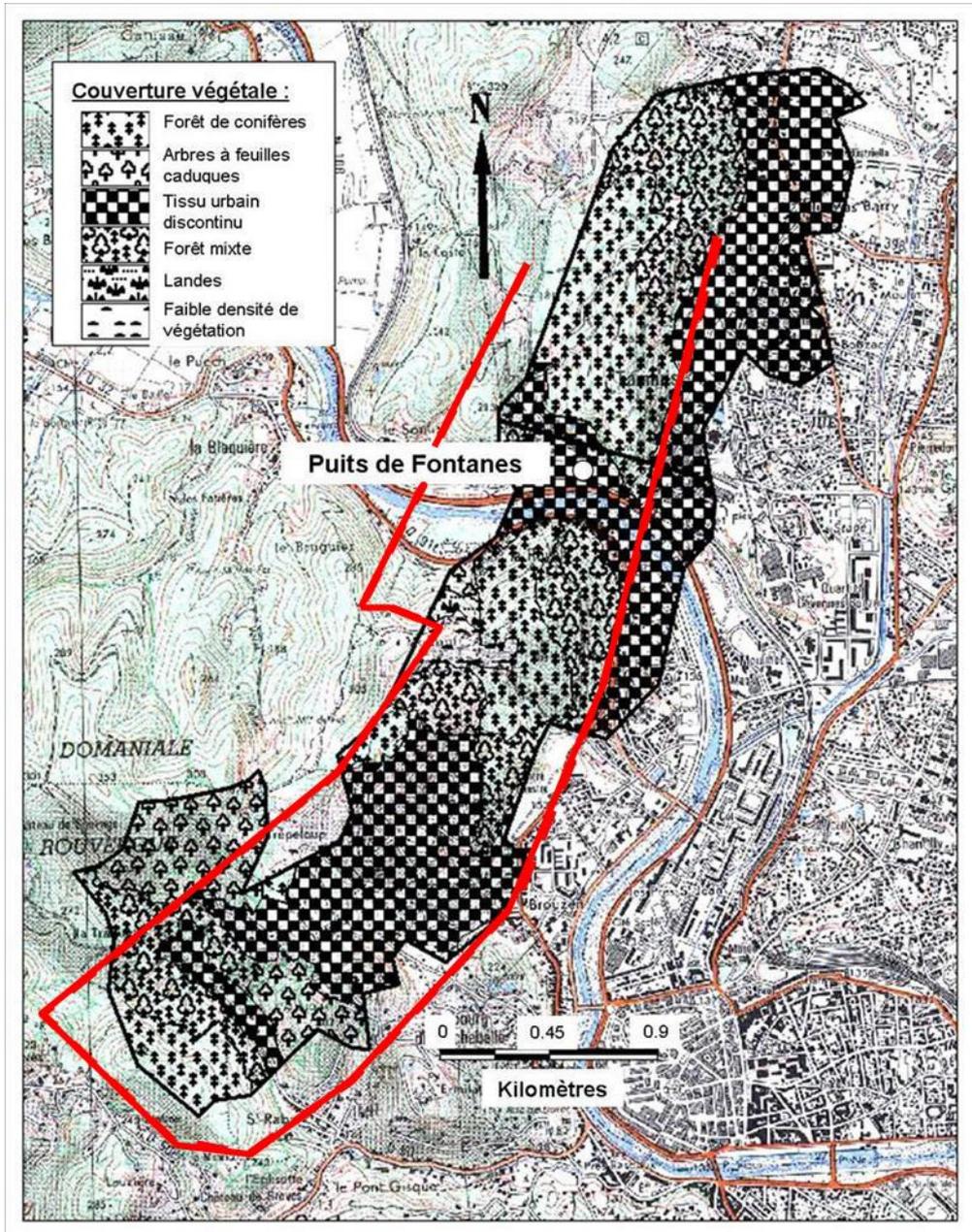


Figure 101 : Représentation du type de végétation recouvrant le réservoir minier et les failles (ligne rouge) (carte IGN)

Le type de végétation va avoir une influence sur l'ETR et servira à définir les paramètres des parcelles. Un fichier nommé landcover.dbf (Tableau 32) permet dans un premier temps d'associer une clé à un type de végétation, qui simplifiera par la suite la description de chaque parcelle.

III.4.3. Calage des paramètres

Les données d'entrées non modifiables de la simulation sont les précipitations, la température pour le calcul de l'ETP ainsi que les données de pompages journaliers.

Le paramètre de calage est le niveau piézométrique mesuré au niveau du puits de Fontanes.

Le choix des paramètres que nous modifions se fait par l'intermédiaire de fenêtres décrites en annexe 10. Les paramètres modifiables sont :

- des paramètres de surface tel que :
 - la quantité d'eau qui va s'infiltrer, par parcelles (14 au total), en direction de l'aquifère minier (coefficient d'infiltration)
 - le coefficient de ruissellement qui dépend de la nature du sol et de la végétation par parcelles (14 valeurs soit une par parcelle)
 - la réserve facilement utilisable pour chaque parcelle (RFU) (14 valeurs)
- des paramètres du réservoir minier :
 - les perméabilités des aquifères Nord et Sud (2 valeurs)
 - l'épaisseur du réservoir minier pour les nappes Nord et Sud (2 valeurs)
 - le coefficient d'emménagement pour les nappes Nord et Sud (2 valeurs)
 - le diamètre du puits qui est fixé à 5 m dans notre modélisation
 - les niveaux piézométriques minimum et maximum, pour les nappes Nord et Sud au premier jour de la modélisation (4 valeurs)

En sortie, nous obtenons le niveau piézométrique au niveau du puits de Fontanes et des piézomètres à l'extrémité du réservoir et nous allons confronter le niveau piézométrique réel au niveau de Fontanes avec celui simulé pour identifier si les paramètres choisis sont corrects.

III.5. Résultats

La modélisation va se dérouler en deux étapes : le calage puis la validation du modèle avec les paramètres choisis. Nous présenterons les points positifs du modèle utilisé et les défauts avec les solutions proposées pour les atténuer. Notre stratégie de calage consiste à tester les paramètres les uns après les autres. Une fois que le calage d'un paramètre semble bon après estimation visuelle, nous passons au suivant. L'ordre de calage est le suivant : perméabilité, RFU, épaisseur, infiltration, emménagement et niveaux piézométriques initiaux.

III.5.1. Le calage

Nous allons tester les paramètres permettant d'obtenir une courbe simulée du niveau piézométrique la plus proche de la courbe réelle.

L'année choisie pour le calage est 1997 car nous possédons les valeurs des pompages, les précipitations et les niveaux piézométriques précis. Le pas de temps utilisé est la journée car c'est l'échelle des mesures de pompage et de précipitations.

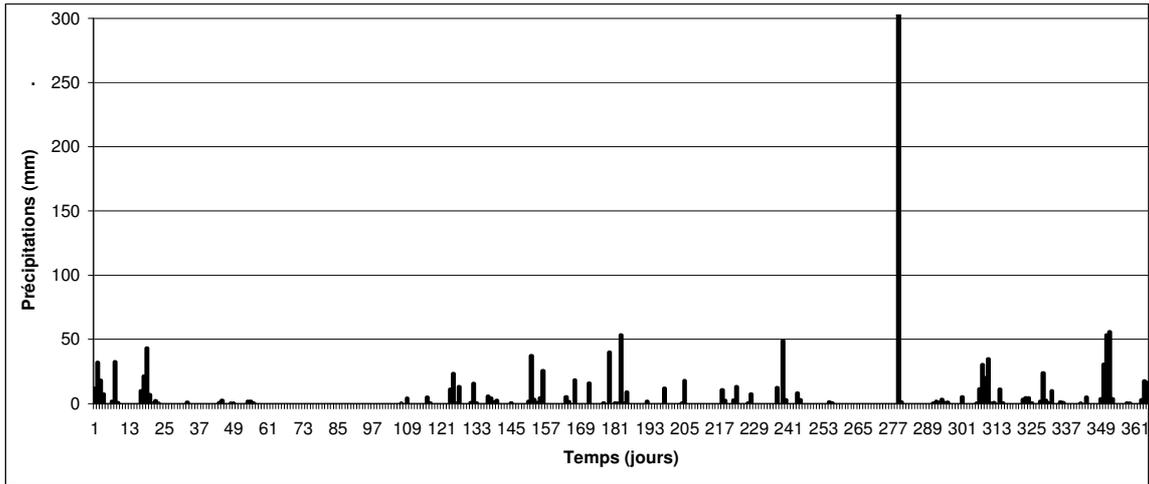


Figure 102 : Précipitations de l'année 1997 en mm

Le total des précipitations pour l'année 1997 est de 1324,9 mm avec un événement exceptionnel début Octobre de 300 mm d'eau en une journée (Figure 102).

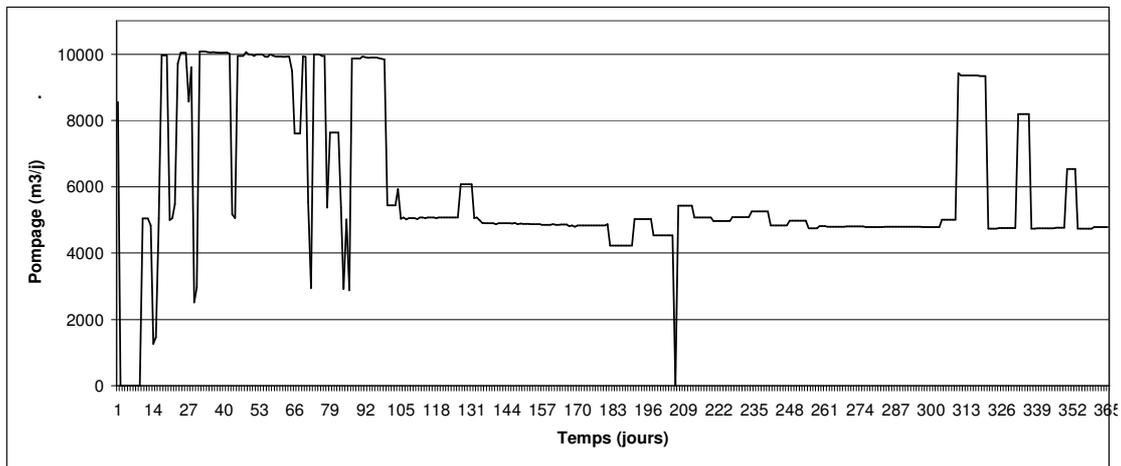


Figure 103 : Valeurs du pompage journalier pour l'année 1997

Les pompages sont hétérogènes sur l'ensemble de l'année. Le volume total pompé est de 2 139 581 m³ (Figure 103) et le modèle nous donne 1 899 409 m³ pompé soit 11% de différence.

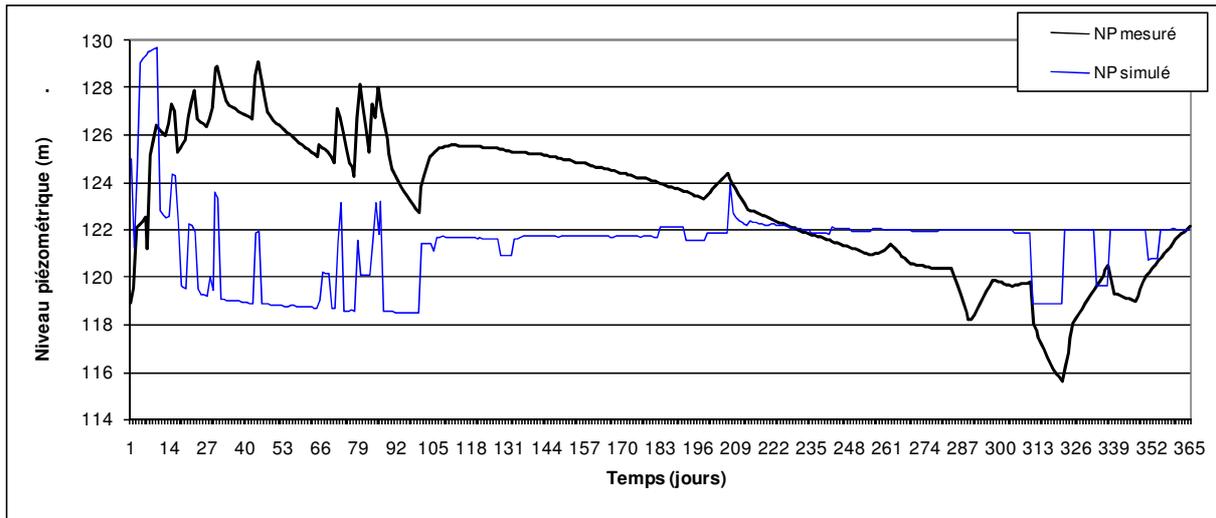


Figure 104 : Niveaux piézométriques modélisé et simulé pour l'année 1997

La courbe représentant le niveau piézométrique simulé de l'année 1997 (Figure 104) est obtenue avec les paramètres suivants :

Tableau 27 : Paramètres choisis pour la calibration et la validation du modèle

	<u>Paramètres</u>						
	k (m/s)	RFU (mm)	e (m)	NP min (m)	NP max (m)	I	S
Nappe Nord	10^{-3}	200	200	125	145	0,9	0,05
Nappe Sud	10^{-4}	200	200	125	127	0,9	0,05

Nous allons commenter les paramètres obtenus pour la modélisation afin de les rapprocher de la réalité du terrain étudié.

III.5.1.1. La perméabilité (k)

Les réservoirs miniers sont des systèmes très hétérogènes du point de vue de leur perméabilité car ils sont constitués d'une alternance de zone très imperméables notamment les schistes, les couches de charbons non exploitées et de zone très perméables telles que : les galeries, les puits et les zones fissurées résultats de la tectonique régionale et des contraintes liées à l'exploitation.

Les schistes et terrains houillers peuvent avoir une perméabilité proche de 10^{-8} m/s lorsqu'ils n'ont pas encore été exploités (Blachère, 1985) et la perméabilité dans les puits et galeries est très forte. Dans ce modèle, la perméabilité tient compte de ces hétérogénéités et s'applique au réservoir minier total.

Après plusieurs calages de la perméabilité (Figure 105), le niveau piézométrique simulé le plus proche de la réalité est NP simulé 1.

Les valeurs choisies pour le calage sont réalistes et de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} . Pour marquer l'hétérogénéité au sein du modèle nous avons choisi des perméabilités différentes au Nord et au Sud du réservoir.

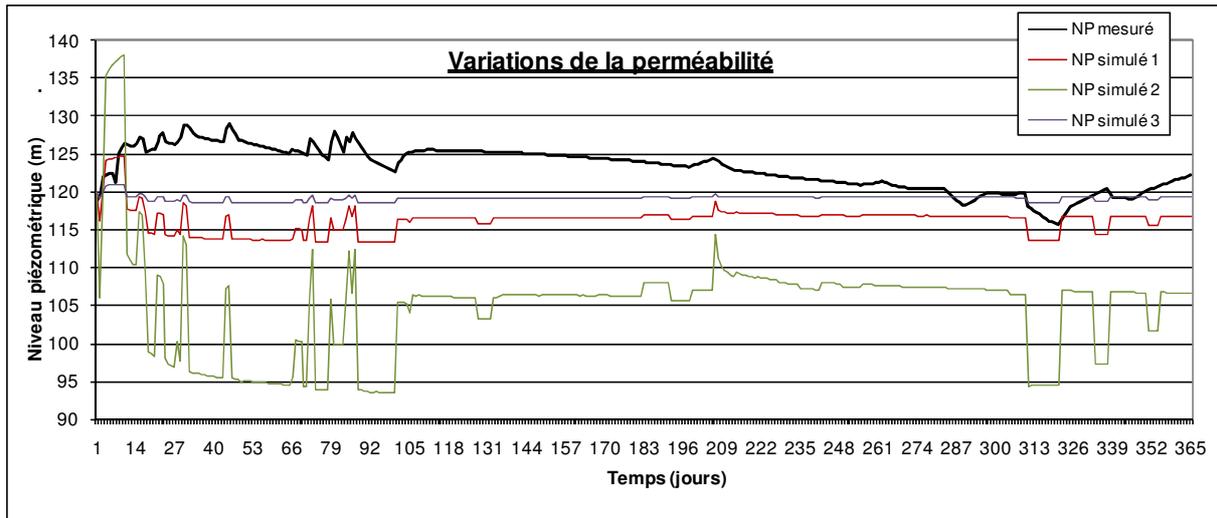


Figure 105 : Exemples de calage de la courbe du niveau piézométrique de Fontanes avec différentes perméabilités dont les valeurs sont dans le tableau ci-dessous.

Tableau 28 : Paramètres choisis pour les courbes de la Figure 105

NP simulé	Nappe	RFU (mm)	e (m)	NP min (m)	NP max (m)	I	S	k (m/s)
1	Nord	200	200	120	140	0,9	0,05	10^{-3}
1	Sud	200	200	120	122	0,9	0,05	10^{-4}
2	Nord	200	200	120	140	0,9	0,05	10^{-3}
2	Sud	200	200	120	122	0,9	0,05	2.10^{-5}
3	Nord	200	200	120	140	0,9	0,05	10^{-3}
3	Sud	200	200	120	122	0,9	0,05	10^{-3}

La perméabilité a un fort impact sur le calage de la courbe simulée comme le montre la Figure 105.

III.5.1.2. La réserve facilement utilisable (RFU)

Elle est choisie de l'ordre de 200 mm qui est une valeur admise pour la région étudiée.

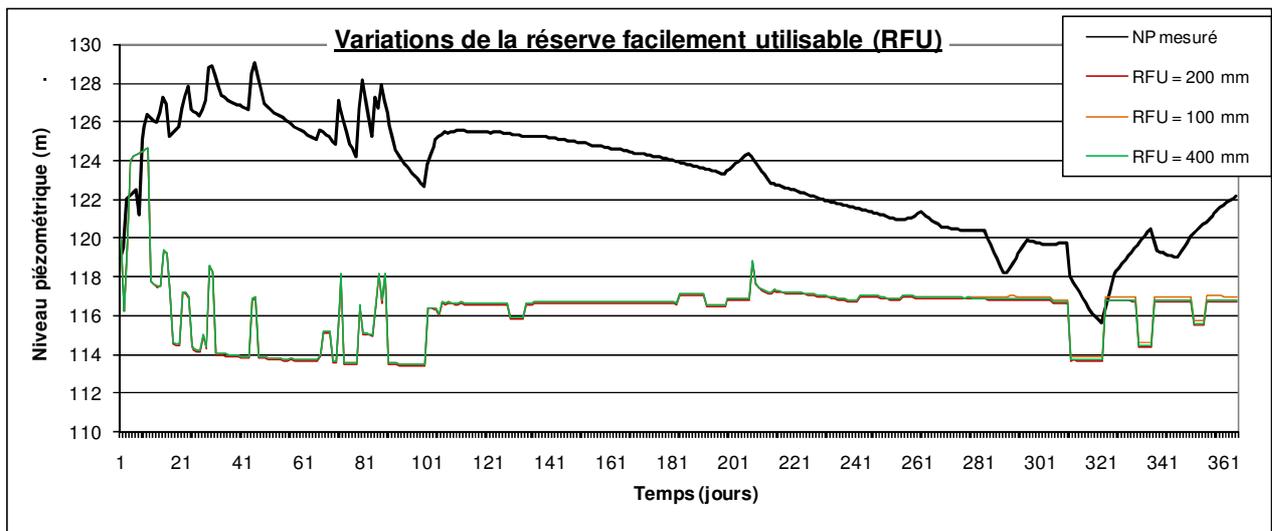


Figure 106 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs de la RFU (les autres paramètres étant identiques pour les trois simulations)

L'épaisseur choisie pour la réserve facilement utilisable influence peu les fluctuations de la courbe simulée (Figure 106).

III.5.1.3. L'épaisseur

L'exploitation de charbon n'a pas une épaisseur identique sur toute la zone (Figure 100). Certaines zones ont été exploitées plus profondément que d'autres et la profondeur d'exploitation varie entre +190 et - 600 m soit 790 m d'épaisseur au maximum.

La valeur choisie dans la modélisation est de 200 m et s'inscrit dans la gamme d'épaisseur possible pour le réservoir de Rochebelle-St-Martin.

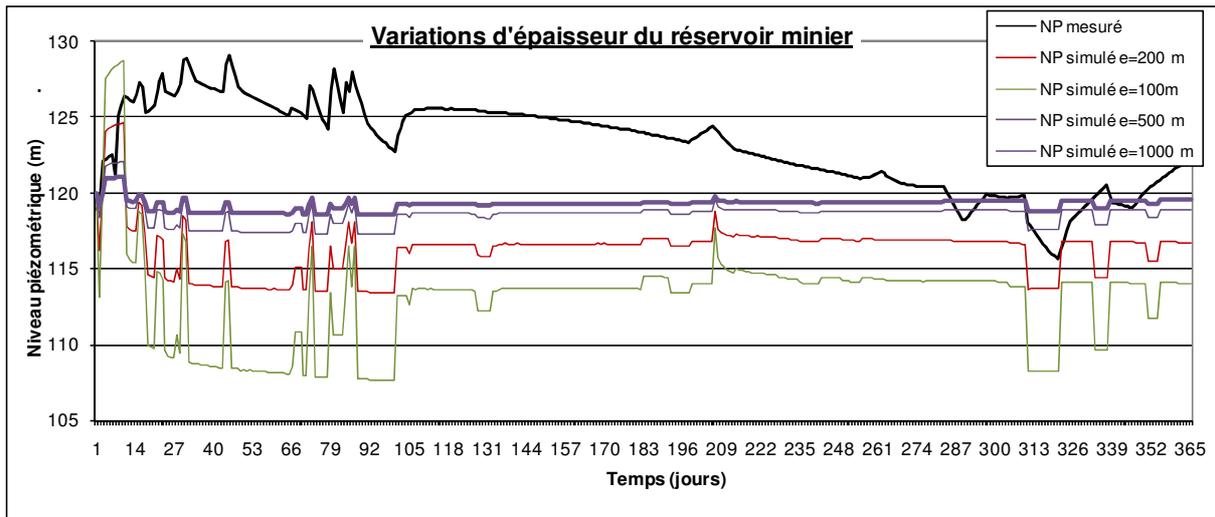


Figure 107 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs d'épaisseur du réservoir minier (les autres paramètres étant identiques pour les trois simulations)

Une épaisseur du réservoir minier trop importante (par exemple 500 et 1000 m) a tendance à trop amortir les pics de la courbe des niveaux piézométriques dus au pompage (Figure 107).

III.5.1.4. L'infiltration

L'infiltration correspond au calcul suivant : $I = (1-k') \cdot ER$

avec k' dépend de la nature du sol et de la saturation

et $ER = \text{eau disponible} - \Delta RFU - ETR$

Nous considérons que quasiment la totalité de l'infiltration atteint le réservoir minier (90%).

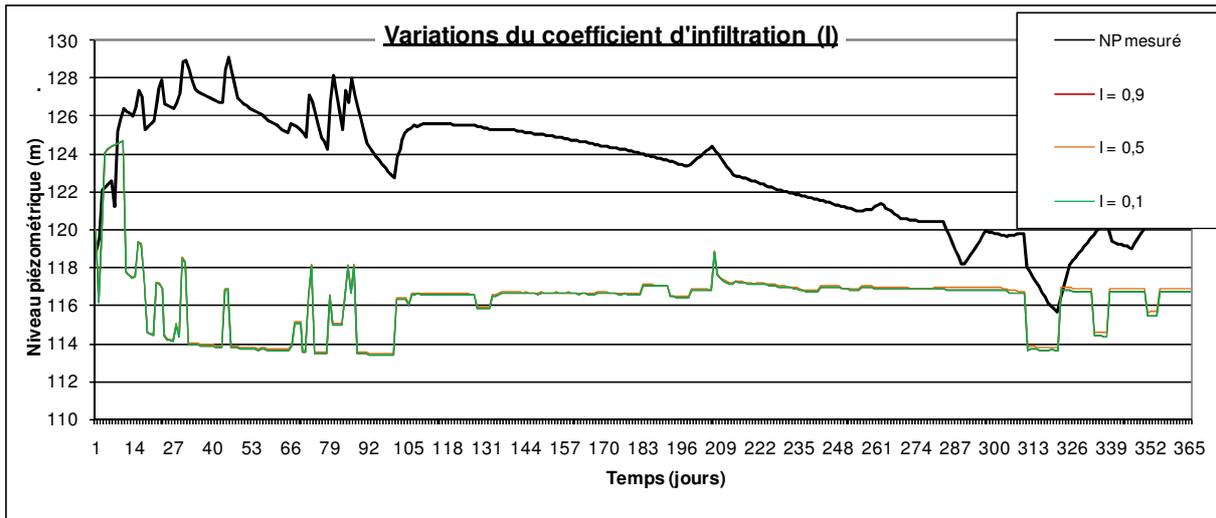


Figure 108 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs d'infiltration (les autres paramètres étant identiques pour les 3 simulations)

La Figure 108 montre que la fluctuation du pourcentage d'infiltration n'a pas une forte influence sur la courbe simulée.

III.5.1.5. L'emmagasinement

L'ordre de grandeur choisi correspond aux valeurs observables pour une nappe libre.

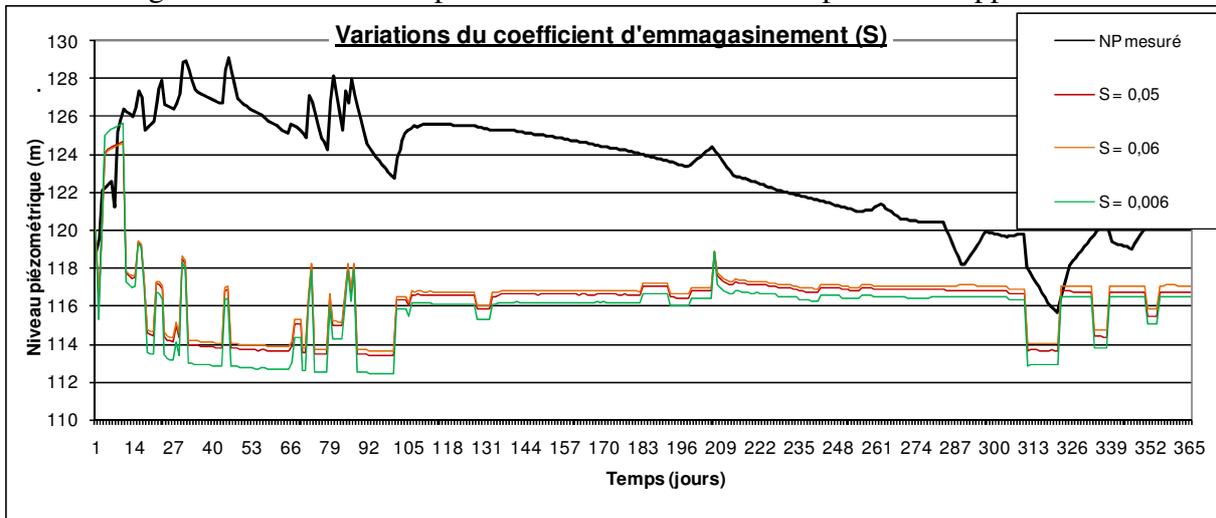


Figure 109 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs d'emmagasinement (les autres paramètres étant identiques pour les 3 simulations)

Au plus le coefficient d'emmagasinement est faible, au plus les effets des périodes de pompage sur le niveau piézométrique sont marqués (Figure 109).

III.5.1.6. Les niveaux piézométriques initiaux

La modélisation commence au premier jour de l'année (J1). Nous ne tenons donc pas compte des événements antérieurs au J1 et pouvant avoir un effet sur le niveau piézométrique. Pour compenser ce manque d'informations, nous choisissons de caler le niveau piézométrique initial de la modélisation pour les nappes Nord et Sud.

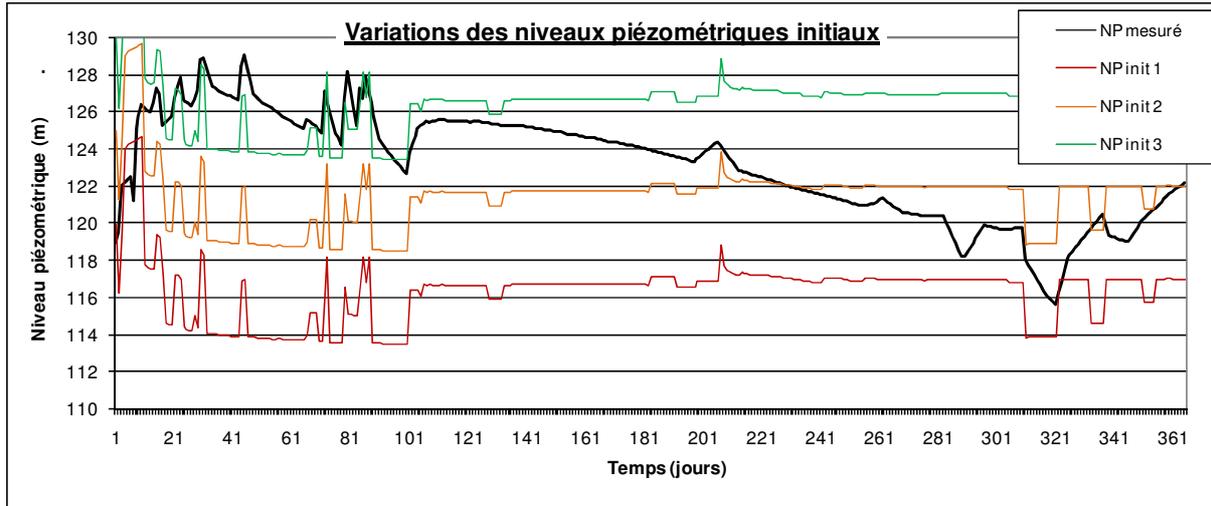


Figure 110 : Représentations du niveau piézométrique simulé pour différentes valeurs de niveaux piézométriques initiaux (les autres paramètres étant identiques pour les 3 simulations - Tableau 29)

Les niveaux piézométriques initiaux modifient fortement la position de la courbe. Nous observons une translation verticale de la courbe simulée du niveau piézométrique mais pas de modifications de l'intensité des pics.

Les NP init 2 sont les plus proches de la courbe mesurée. Les niveaux piézométriques choisis pour cette simulation sont supérieurs de 5 m par rapport aux niveaux piézométriques mesurés au premier jour de l'année.

Tableau 29 : Paramètres choisis pour les courbes de la Figure 110

NP init	Nappe	RFU (mm)	e (m)	NP min (m)	NP max (m)	I	S	k (m/s)
1	Nord	200	200	120	140	0,9	0,05	10^{-3}
1	Sud	200	200	120	122	0,9	0,05	10^{-4}
2	Nord	200	200	125	145	0,9	0,05	10^{-3}
2	Sud	200	200	125	127	0,9	0,05	10^{-4}
3	Nord	200	200	130	150	0,9	0,05	10^{-3}
3	Sud	200	200	130	132	0,9	0,05	10^{-4}

III.5.2. Interprétations

La simulation présentée à la Figure 104 montre une bonne représentation des variations de niveau engendré par les fluctuations de pompage au cours de l'année. Les pics correspondants à des remontées de niveaux piézométriques sont synchrones entre la courbe réelle et la courbe simulée (Figure 111). Le modèle reproduit correctement les effets des augmentations et les diminutions du pompage sur le niveau piézométrique.

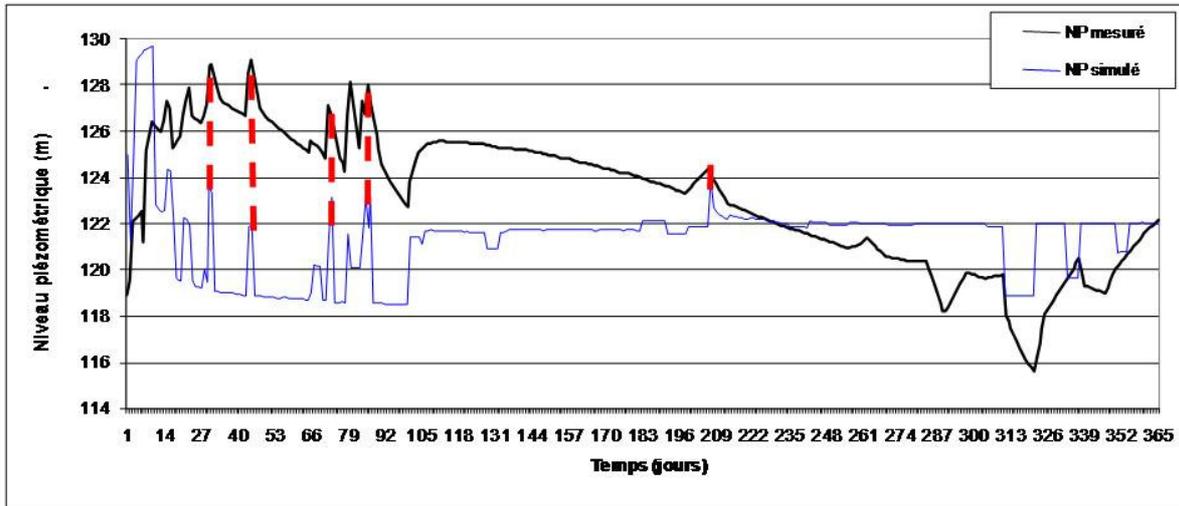


Figure 111 : Synchronisme entre les pics de la courbe réelle et de la courbe simulée

Cependant nous n'arrivons pas à répercuter correctement la tendance générale de la courbe à la croissance ou à la décroissance, observable sur la Figure 112.

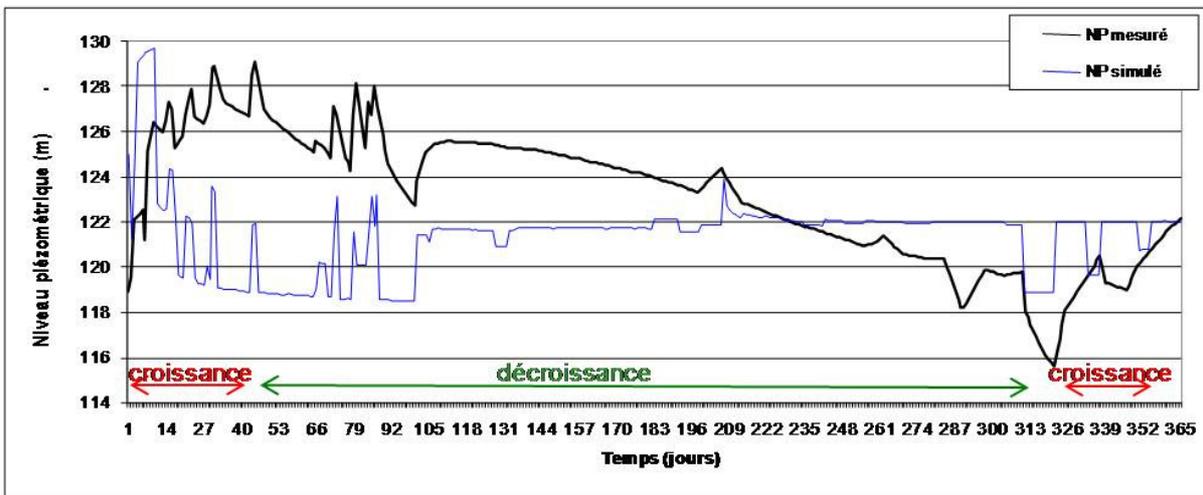


Figure 112 : Notation des phases de croissance et de décroissance du niveau piézométrique réel

III.5.3. La validation

La validation du modèle consiste en l'application des mêmes paramètres que l'année 1997 (Tableau 27) à une autre année de pompage. Pour cela, nous avons choisi l'année 1998 car il s'agit d'une année où les données sont complètes ce qui nous permet de faire fonctionner le modèle dans les mêmes conditions que 1997.

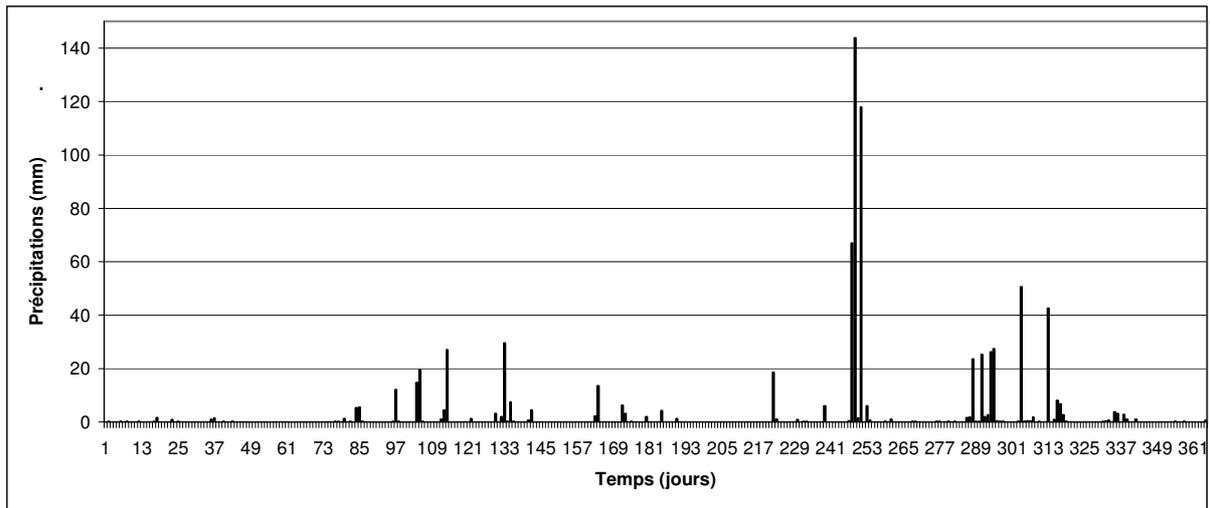


Figure 113 : Précipitations de l'année 1998

L'année 1998 est plus sèche que l'année 1997 avec 786,9 mm d'eau et des événements de précipitations fortes en septembre (Figure 113). Le pompage réel est représenté sur la Figure 114 avec un total de 1 553 170 m³ pour l'année.

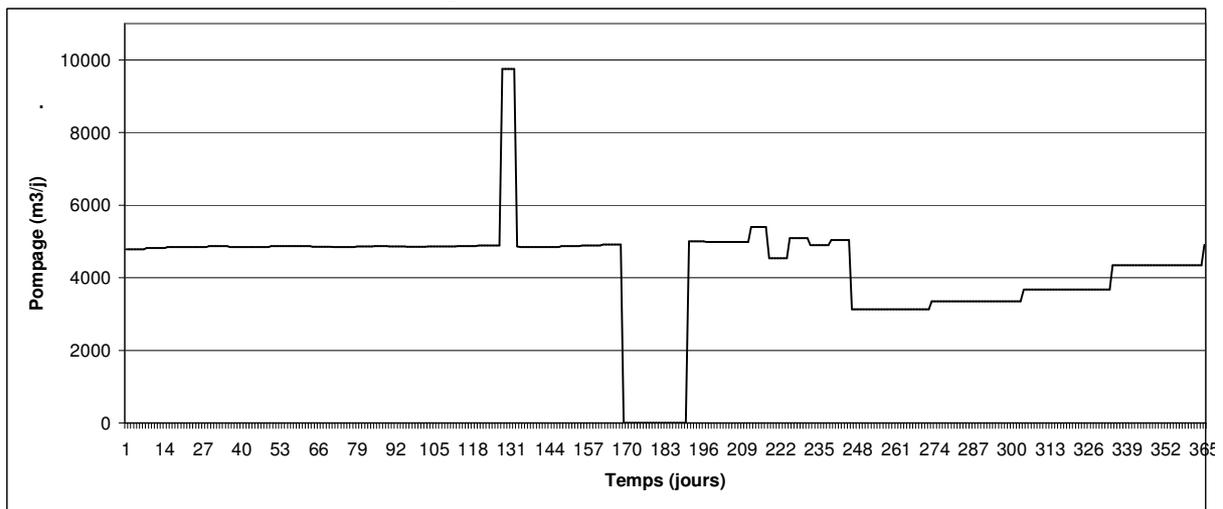


Figure 114 : Pompage pour l'année 1998

Pour vérifier que notre simulateur prend en compte les débits pompés, nous pouvons comparer le volume total d'eau pompée pour l'année 1998 (1 553 170 m³) et celui donné par le modèle (1 485 804 m³). La différence est d'environ 4%, ce qui est très correct.

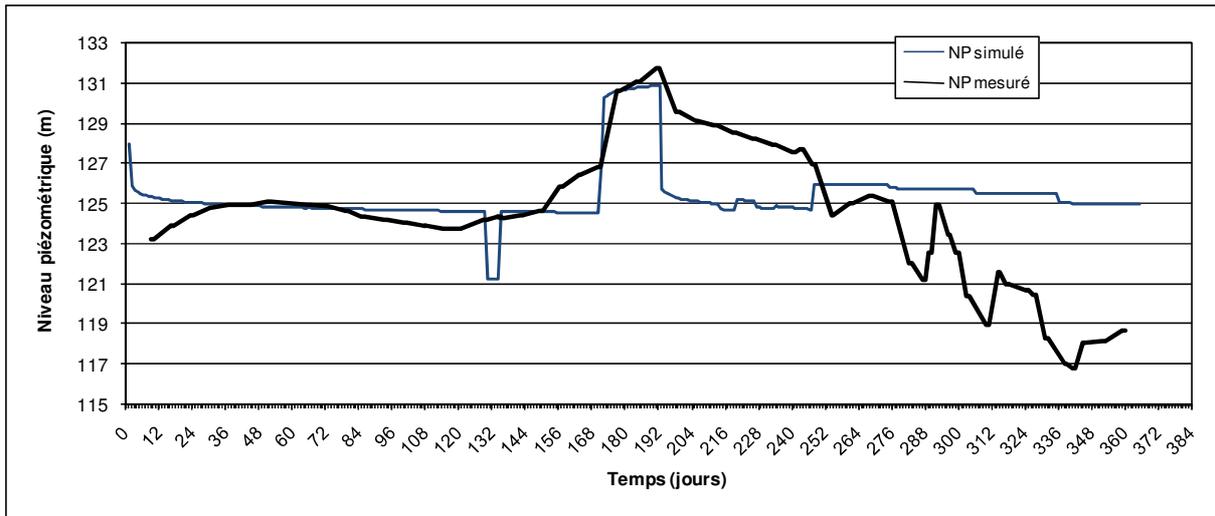


Figure 115 : Courbes mesurée et simulée du niveau piézométrique pour l'année 1998

Comme pour 1997, les fluctuations liées au pompage sont bien représentées sur la courbe simulée (Figure 115). Le milieu est très réactif notamment dans les phases de changement de valeurs de pompage. Les tendances générales à la croissance et à la décroissance de la courbe mesurée ne sont pas bien reproduites par le modèle.

III.5.4. Conclusion

Le modèle reproduit les effets du pompage sur le niveau piézométrique, les fluctuations sont synchrones ce qui traduit bien l'utilisation des équations de Theis et de Jacob pour le calcul du rabattement au cours d'un pompage (paragraphe III.2.3). Le volume d'eau extrait par le modèle est lui aussi bien estimé.

Cependant nous n'arrivons pas à reproduire correctement les tendances de croissance et de décroissance générale du niveau piézométrique. Une amélioration possible serait de tenir compte d'un retard dans l'infiltration correspondant au temps que met l'eau pour traverser la zone non saturée avant d'atteindre le réservoir minier. Le manque d'information sur les connexions entre galeries et leurs profondeurs ne nous permet pas de tenir compte de l'influence d'apport d'eau de quantités différentes selon la profondeur du pompage comme cela pourrait se produire dans un karst.

D'autre part, s'il était possible d'introduire des données pour le versant Sud, grâce au piézomètre de St Raby, il n'était pas possible d'introduire de données mesurées pour le versant Nord. En l'absence de mesures, nous avons donné une valeur plausible de la hauteur piézométrique à l'extrémité du versant Nord au 1^e janvier.

Une proposition pour corriger ce manque de précision serait de définir plusieurs perméabilités dans notre réservoir afin de mieux répartir les transferts d'eau dans le temps et donc d'éviter un effet trop brutal des pompages à un instant donné.

Il aurait aussi été intéressant de faire un modèle chimique sur le réservoir de Rochebelle-St-Martin afin d'estimer l'évolution dans le temps des éléments mesurés mais les données disponibles sont trop peu nombreuses.

CHAPITRE IV :

PERSPECTIVES POUR LES EAUX DE MINES DES CONCESSIONS DE ROCHEBELLE - ST-MARTIN DE VALGALGUES

L'eau contenue dans le réservoir minier des anciennes concessions de charbon de Rochebelle-St-Martin présente une composition chimique qui la rend impropre à la consommation humaine mais les calories que contient cette eau peuvent être exploitées et devenir une source d'énergie potentielle.

Les premiers travaux sur l'énergie géothermale des eaux de mines datent de 1970 sur des sites du Montana (USA) et actuellement des projets sont en cours de réalisation au Royaume-Uni, Allemagne, Ecosse, Pays-Bas et Norvège (Wolkersdorfer, 2008). Actuellement, plus d'une soixantaine de sites, basses et hautes enthalpies sont présents en France. En métropole, l'énergie extraite de l'eau chaude naturelle fournit une économie de 160 000 tep/an (Lhomme, 2004). La France se retrouve en 3^e place européenne pour le nombre de pompes à chaleur géothermique soit 83 856 unités en 2006 (Observ'ER, 2007).

Dans le cas de St Martin de Valgalgues, l'économie sur la mise en place de l'installation peut être plus importante du fait de l'existence actuelle du forage sous la forme de puits de mine, de pompes déjà en place et des ressources déjà connues. L'investissement de départ sera donc moins important pour la mise en place du système complémentaire de pompe à chaleur. Actuellement, le pompage et la station de traitement sont à la charge de l'Etat jusqu'à ce que la qualité des eaux redevienne 'correcte' et permette un rejet direct dans le milieu naturel.

A la fin de ce chapitre, nous proposerons un exemple d'utilisation géothermique du réservoir de Rochebelle St Martin, en tenant compte des propriétés hydrodynamiques définies dans le chapitre précédent.

IV.1. La géothermie

IV.1.1. Intérêt et utilisation de la géothermie

Elle est considérée dans les textes comme une énergie renouvelable (mais ce terme est parfois contesté pour la géothermie). Elle produit peu de rejet de CO₂ dans l'atmosphère.

Pour la géothermie à grande profondeur (haute et basse énergie), l'avantage réside en une indépendance par rapport aux conditions atmosphériques contrairement à d'autres énergies renouvelables. Dans notre cas, l'avantage est l'économie faite sur les forages et la présence d'un volume d'eau important du fait de l'utilisation d'anciens puits de mines notamment de Fontanes.

L'utilisation de la géothermie dépend de la gamme de température d'utilisation (Figure 116). Dans notre cas, les domaines d'applications possibles des eaux de mines de St-Martin de Valgalgues pourraient être le chauffage pour la pisciculture (entre 10 et 20°C), le chauffage de serre (entre 20 et 30°C) ou de piscine (entre 20 et 30°C).

Le chauffage de serre demande une forte consommation d'énergie : respectivement 200 et 400 t de fioul/hectare/an pour les cultures maraichères et les cultures florales mais la température optimale de croissance dépend du type de plantes cultivées. (Site internet des techniques de l'ingénieur). Ce type de chauffage peut être remplacé par de la géothermie.

Le chauffage de bassins de pisciculture ou d'aquaculture est impératif car une augmentation de température permet un accroissement du métabolisme chez les poissons et crustacés (site internet des techniques de l'ingénieur)

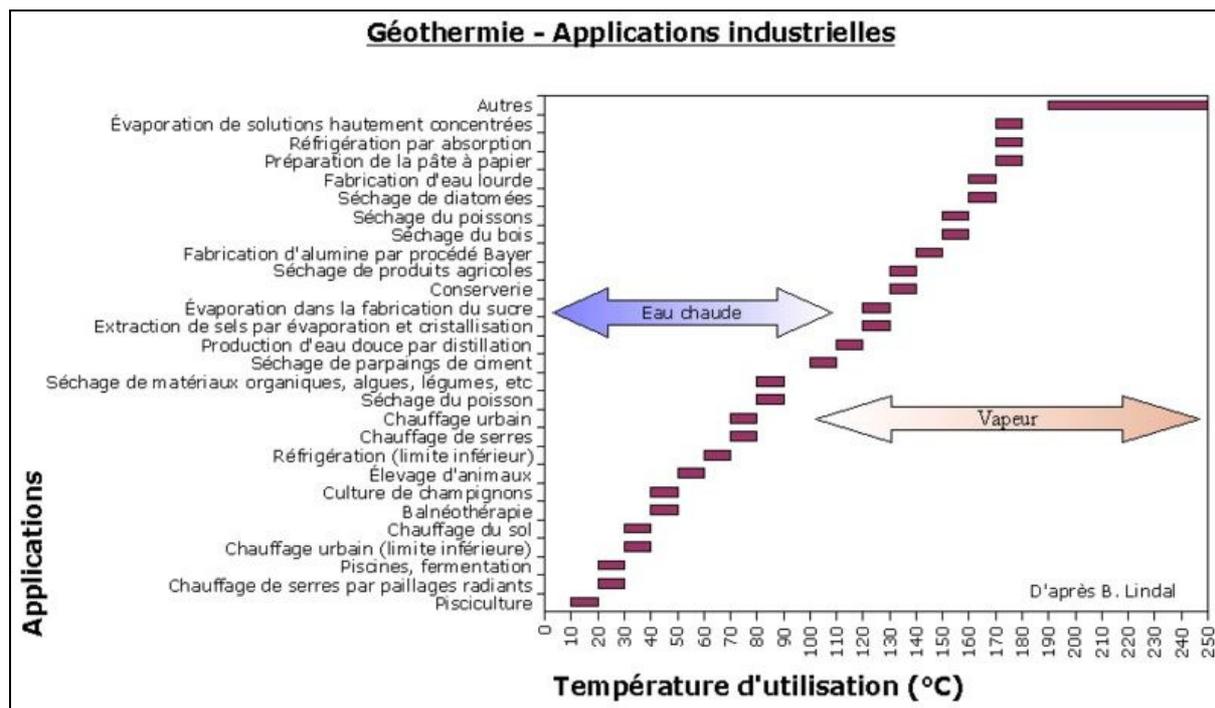
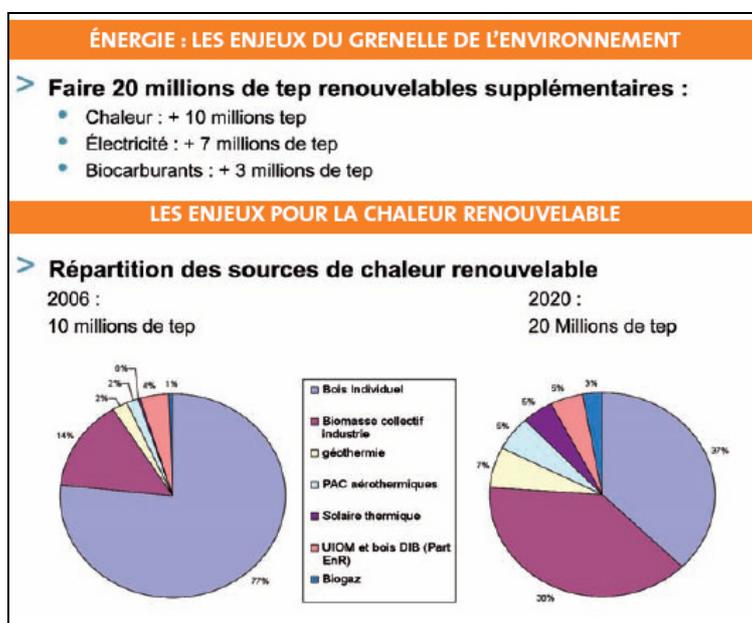


Figure 116 : Les différentes applications de la géothermie (version francisée) B. Lindal

Suite au Grenelle de l'environnement, l'objectif fixé en terme de production énergétique est de 20 millions de tep renouvelables supplémentaires faisant passer de 2 à 7 % la part de la géothermie dans les sources de chaleur renouvelable (Figure 117).



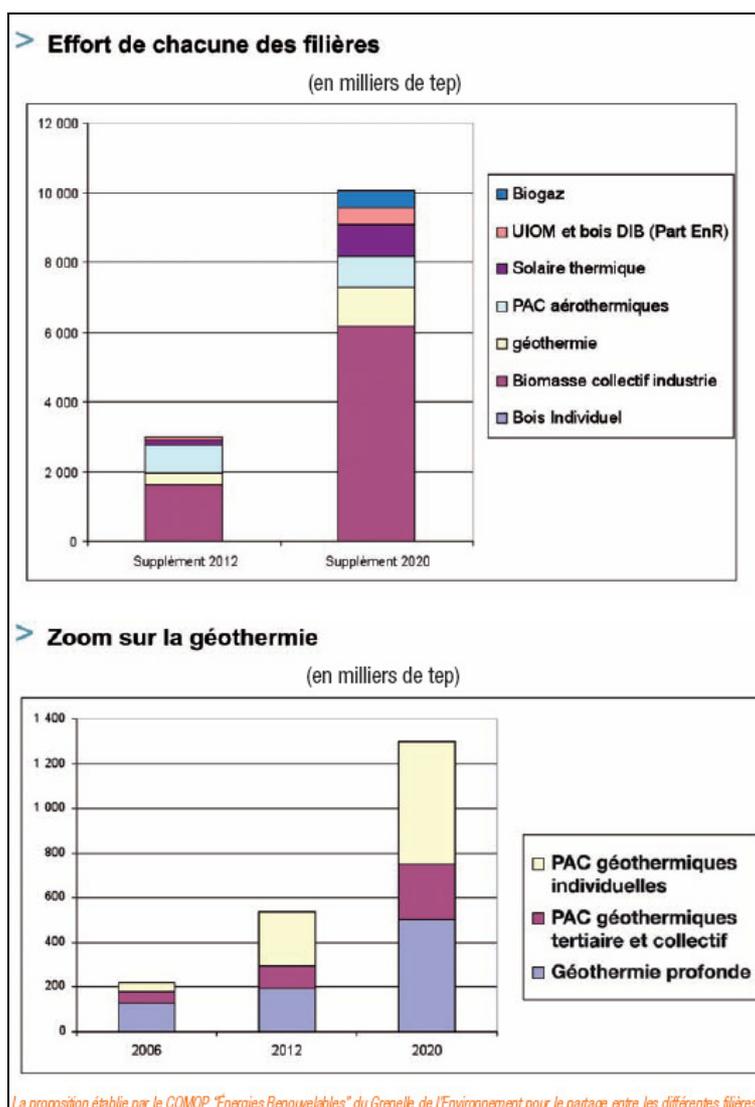


Figure 117 : Perspective pour le développement des énergies renouvelables (BRGM, 2008)

IV.1.2. Les différents types de géothermie

Différents types de géothermie sont classifiés selon la température de l'eau exploitée et la profondeur de sa source : la haute énergie (entre 150 et 300°C), la moyenne énergie (entre 80 et 150°C), la basse énergie (<90°C) (voir annexe 11) et la très basse énergie qui va nous intéresser pour le site de Fontanes. La géothermie très basse énergie correspond à des températures des eaux comprises entre 20 et 60 °C. Le pompage de Fontanes appartient à ce type de géothermie. Elle est utilisée pour le chauffage de piscine, de serre, de maison individuelle et nécessite l'utilisation d'une pompe à chaleur.

Selon la méthode d'extraction utilisée, il est possible d'améliorer le rendement : ainsi, si le véhicule thermique est l'eau plutôt que la terre celui-ci sera meilleur.

IV.2. Principe de la pompe à chaleur

Une pompe à chaleur permet de prélever de l'énergie (calories) dans un milieu à basse température (appelé source froide) et de le restituer avec une température plus élevée dans un autre milieu (appelé source chaude) (Sabonnadière, 2007)

La pompe à chaleur est une machine thermodynamique constituée d'un circuit fermé et étanche dans lequel circule un fluide frigorigène à l'état liquide ou gazeux selon les organes qu'il traverse.

Une pompe à chaleur peut aussi produire du froid par inversion de son cycle thermodynamique, on nomme ce système 'pompe à chaleur réversible'. Les calories sont rejetées vers l'extérieur des locaux (Site internet des techniques de l'ingénieur)

Ces organes sont l'évaporateur, le compresseur, le condenseur et le détendeur (Figure 118).

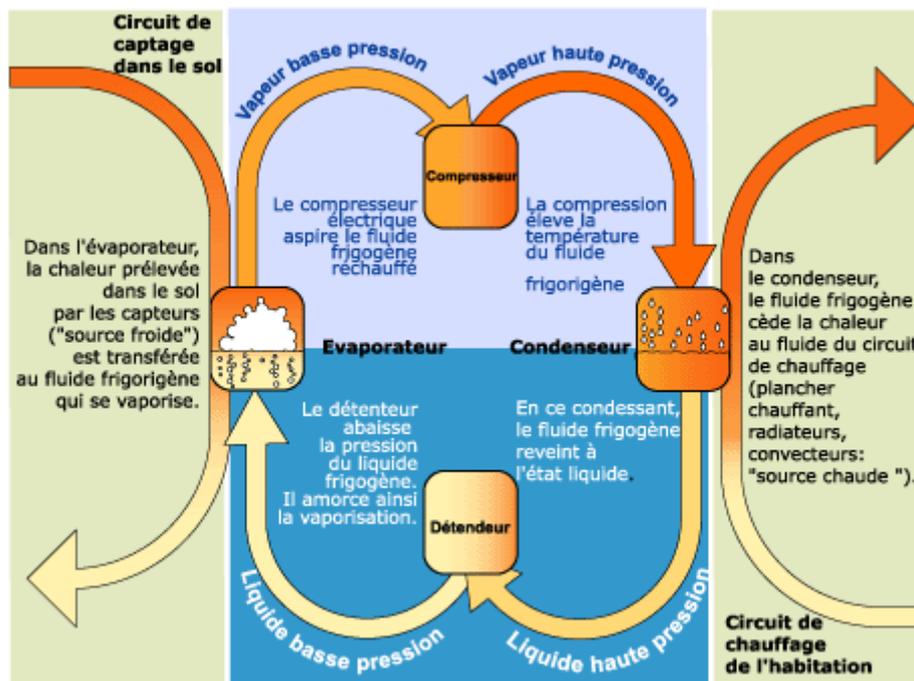


Figure 118 : Principe de la pompe à chaleur (site internet ADEME)

Le compresseur de la pompe à chaleur aspire le fluide frigorigène vaporisé et il utilise de l'électricité pour fonctionner mais pour environ 1 kWh consommé, la pompe à chaleur produit l'équivalent de 3 à 4 kWh de chaleur pour une maison individuelle.

Des systèmes installés dans la maison et ayant pour but de diffuser homogènement la chaleur consomment aussi de l'énergie : ventilateur, pompe de circulation pour les planchers chauffants.

La compression fait croître la température du fluide frigorigène (vapeur haute pression) qui va lui-même céder sa chaleur au circuit de chauffage de l'habitation.

Le fluide frigorigène gazeux se condense alors et repasse à l'état liquide. Par l'intermédiaire d'un détendeur, la pression du fluide frigorigène est abaissée, celui-ci va ensuite reprendre son cycle.

IV.3. Application de la géothermie aux tunnels et mines

La géothermie des tunnels et mines est une variante de l'exploitation de l'eau souterraine pour la géothermie. Les tunnels drainent de grandes quantités d'eau, qui sont le plus souvent évacuées vers l'extérieur par des canaux qui se déversent dans les cours d'eau (Sabonnadière, 2007) ou les stations de traitement comme c'est le cas sur la concession de St Martin de Valgalgues.

En Suisse, 5 installations utilisent déjà des eaux de drainage de tunnel pour la géothermie : St-Gothard-N2, Furka, Mappo-Morettina, Hauenstein, Ricken (site internet SSG)

Le Tableau 30 donne un ordre de grandeur de l'énergie pouvant être produite à partir de site similaire.

Tableau 30 : Potentiel géothermique d'une sélection de 15 tunnels ferroviaires, routiers et de galeries de sondage (site internet SSG)

Nom du tunnel	Canton	Débit d'eau (l/mn)	Température eau (°C)	Potentiel thermique (kW)
Ascona	TI	360	12	150
Furka	VS	5400	16	3758
Frutigen	BE	800	17	612
Gothard	TI	7200	15	4510
Grenchenberg	SO	18000	10	11693
Hauenstein	SO	2500	19	2262
Isla Bella	GR	800	15	501
Lötschberg	VS	731	12	305
Mappo-Morettina	TI	983	16	684
Mauvoisin	VS	600	20	584
Polmengo	TI	600	20	584
Rawyl	VS	1200	24	1503
Ricken	SG	1200	12	501
Simplon	VS	1380	13	672
Vereina	GR	2100	17	1608
Total				29927

L'inconvénient majeur de ce système est double :

- une attention particulière à la qualité des eaux puisées doit être apportée car un risque de corrosion et d'embourbement réel existe.
- il faut surveiller la capacité du puits à garder un débit constant.

‘Pour des raisons économiques, l'énergie géothermale récupérée ne peut être transportée sur de longues distances. Son utilisation doit donc être réalisée à proximité du site de prélèvement. Pour ce faire, le fluide géothermal extrait du sous-sol est acheminé dans un échangeur de chaleur où il cède son contenu énergétique à de l'eau qui assure la distribution de la chaleur aux utilisateurs par le biais d'un réseau de distribution’. (Site internet des techniques de l'ingénieur)

Un exemple d'utilisation des eaux de mines pour la géothermie existe au Canada. Il s'agit d'un fabricant de produit d'emballage en plastique qui assure le chauffage de son usine par la géothermie. L'eau de mine est envoyée vers une thermopompe et les économies d'énergie réalisées sont de l'ordre de 600 000 kWh par an en comparaison avec les systèmes classiques (site internet de l'office of energy efficiency).

Le volume du réservoir minier concerné est de 4,1 millions de m³ (le réservoir minier de Fontanes est estimé à 18 millions de m³).

IV.4. Application au réservoir minier de Rochebelle-St-Martin de Valgalgues

Le réservoir dont nous cherchons à estimer les capacités géothermiques est celui de Rochebelle-St-Martin de Valgalgues dont la géologie est décrite dans le paragraphe III.4.1. Le volume de ce réservoir minier est estimé à 18 000 000 m³.

IV.4.1. Calcul global de la réserve énergétique du réservoir minier

Un calcul présenté par Jessop, 1990 et repris par Raymond (2006), permet d'estimer l'énergie contenu dans le réservoir minier.

L'énergie thermique emmagasinée dans une unité de volume notée H_g est défini par :

$$H_g = \rho.c.g.z.V$$

avec ρ = densité du matériel = 999 820 g/m³ à 20°C
 c = capacité thermique de l'eau à 20°C = 4.184 J/K/g
 g = gradient thermique moyen en France = 0.030 K/m
 z = profondeur 300 m
 V = volume d'eau du réservoir (m³)

D'après les informations précédentes, $H = 7.10^{15}$ Joules pour le réservoir de Rochebelle-St Martin. En comparaison, les mines de Gaspé ont une énergie thermique emmagasinée de $6.7.10^{14}$ J.

IV.4.2. Paramètres utiles pour le calcul géothermique

Pour estimer la quantité d'énergie productible par notre réservoir minier, la température et le débit de celui-ci doivent être connus. La température a été mesurée par le bureau d'étude Cesame (St-Etienne) entre 1997 et 2005. En moyenne, elle est de 23,4 °C à la sortie du pompage de Fontanes.

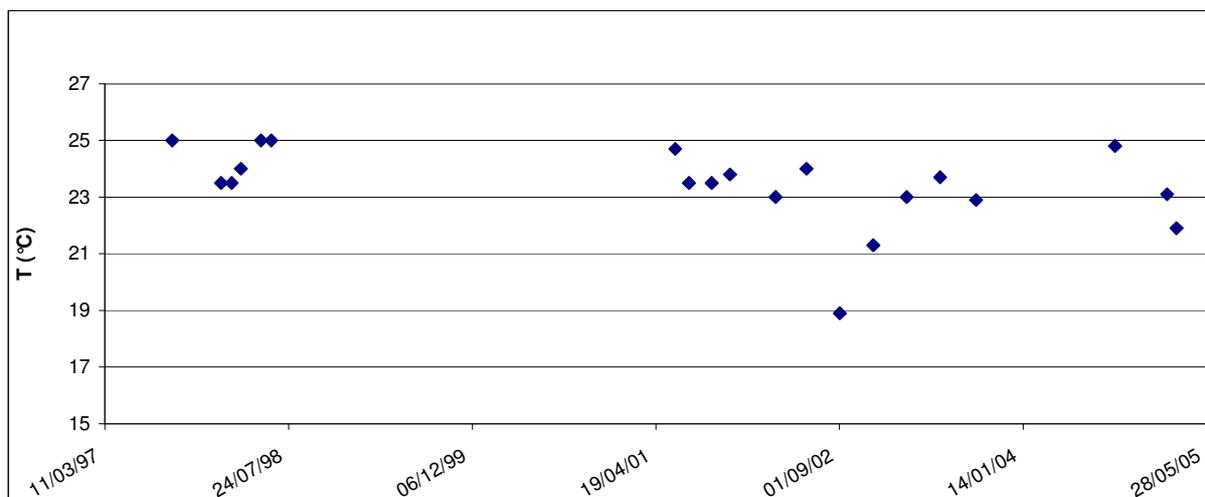


Figure 119 : Valeurs de la température des eaux issues de la mine au niveau du pompage de Fontanes entre 1997 et 2005

La température varie entre 19 et 25 °C au cours des années mesurées (Figure 119). Nous pouvons supposer que cette température est encore plus élevée dans le réservoir selon le gradient géothermique (augmentation de 1°C tous les 30 m).

Pour le site de Fontanes, le pompage étant déjà en place, la profondeur de pompage de l'eau est donc définie. Cependant, il faut savoir, qu'un phénomène peut apparaître en cas de pompage plus profond dans le réservoir minier : la stratification de la qualité des eaux et de la température comme le montre l'exemple de la Figure 120. L'eau sera plus chaude en profondeur mais de moins bonne qualité et pourra entraîner une détérioration plus rapide du matériel de pompage par corrosion.

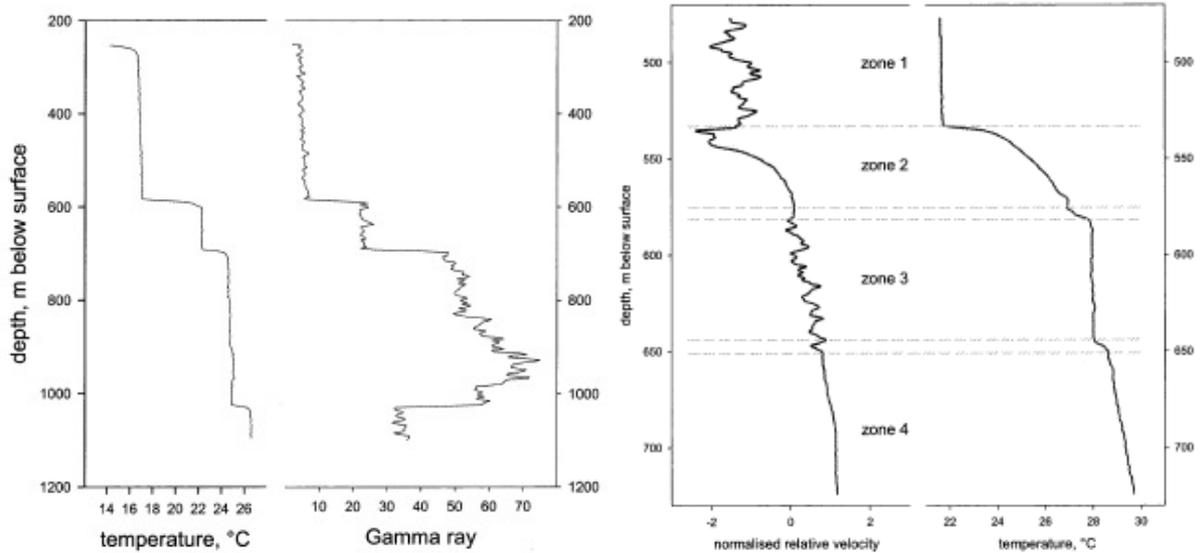


Figure 120 : Exemple de stratification de la température des eaux de mines selon la profondeur (Wolkersdorfer 2008)

Des analyses ont été réalisées dans un réservoir minier résultant de l'exploitation de charbon au Royaume-Uni (Frances colliery). Le pH à la surface du réservoir est proche de celui mesuré à la sortie de la pompe de Fontanes ; l'étude montre que ce pH diminue fortement lorsque les mesures sont faites 100 m en dessous du niveau piézométrique (Figure 121).

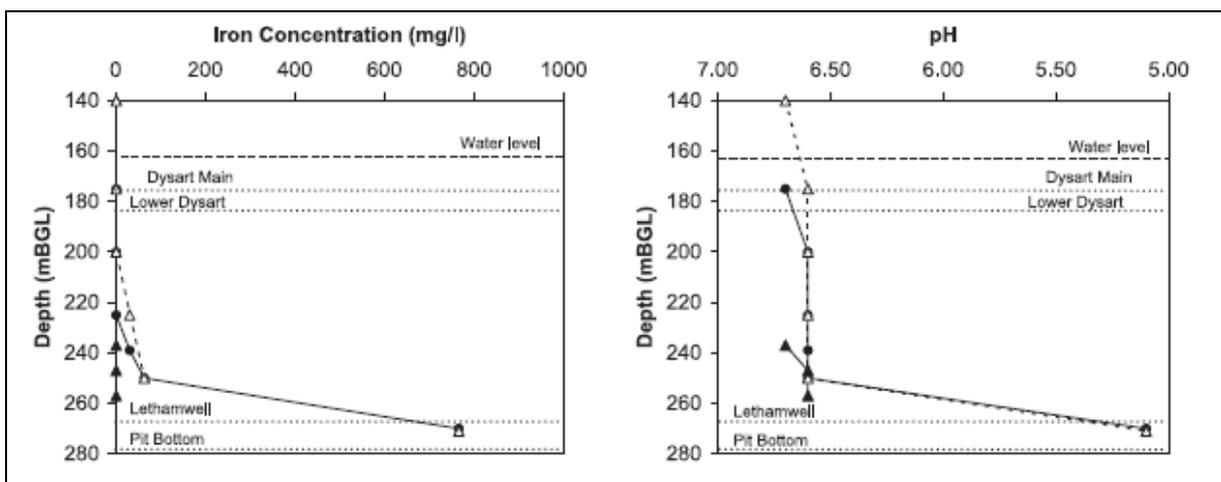


Figure 121 : Evolution de la concentration en fer et du pH en fonction de la profondeur dans l'aquifère minier de Frances colliery au Royaume-Uni. (Nutall et al., 2004)

Une pompe est actuellement déjà en place pour maintenir un certain niveau piézométrique dans le réservoir minier et peut être réutilisée dans un système de pompage géothermique.

Ensuite les eaux de mines sont évacuées en direction d’une station de traitement en aval. L’eau est ensuite rejetée dans le cours du Gardon d’Alès. Les débits de pompage (Figure 122) nous ont été fournis par le bureau d’étude Cesame (St-Etienne).

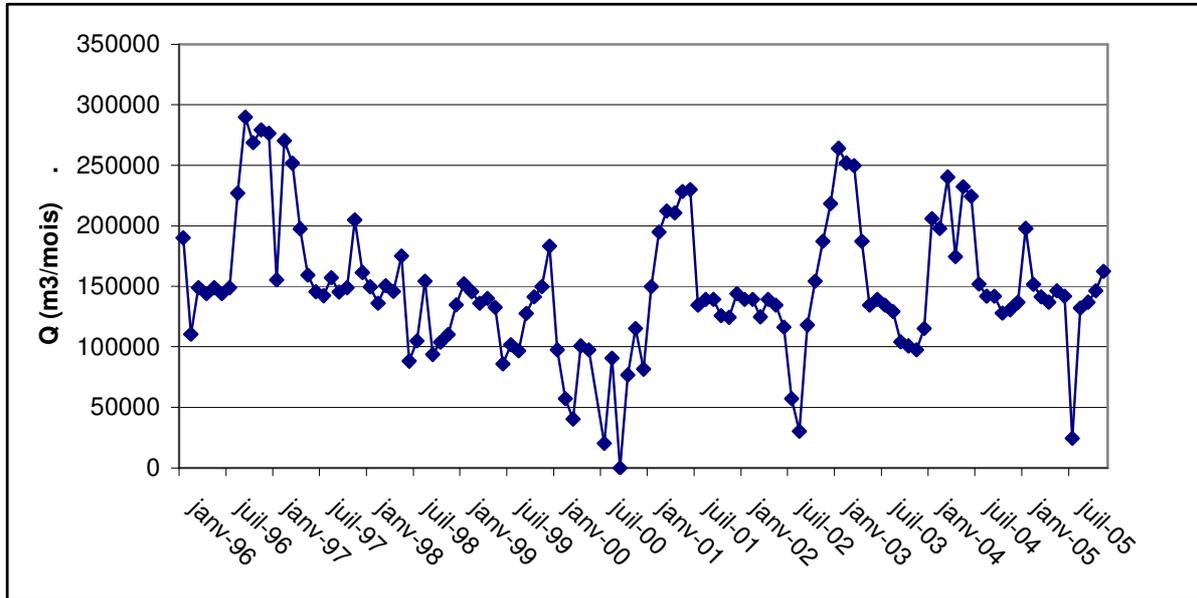


Figure 122 : Débit de pompage au niveau du puits Fontanes entre 1996 et 2005

Le pompage est assez constant les 5 premiers mois de l’année (Figure 123), puis décroît en été suite au faible apport dans le réservoir par les précipitations. A l’automne, les pompages augmentent du fait des précipitations plus importantes et des événements cévenols alimentant le réservoir. Ce phénomène n’est pas pénalisant pour l’installation d’une pompe à chaleur dans la mesure où les mois les plus pluvieux coïncident avec les températures les plus froides (automne et hiver).

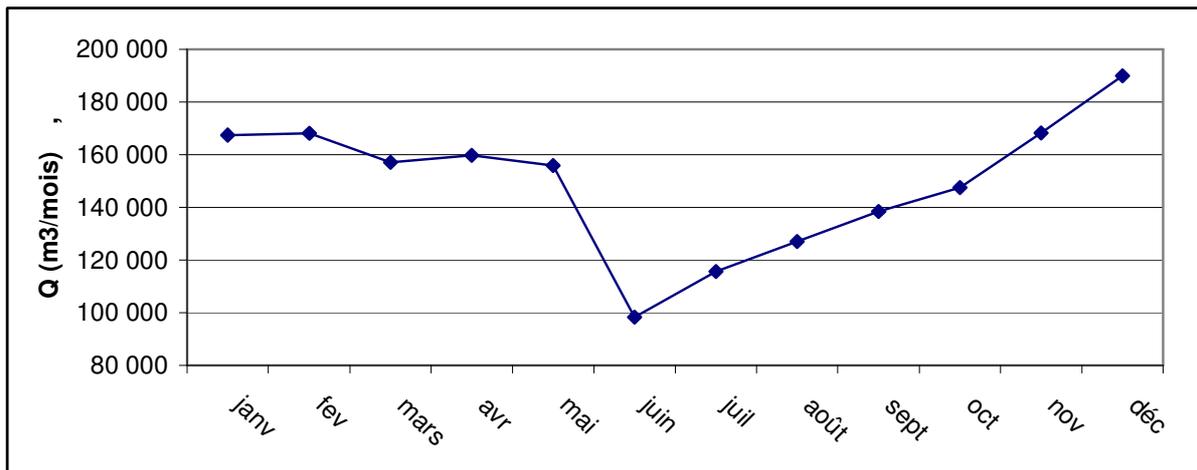


Figure 123 : Valeurs moyennes du pompage par mois, entre 1996 et 2005

En moyenne, tous mois confondus, le débit pompé dans le réservoir minier est de 149 452 m³/mois soit 220 m³/h : ce volume pourrait parfaitement être utilisé par une pompe à chaleur. Le système ne demandera pas de réinjection dans le réservoir minier puisque l’eau doit en être extraite pour maintenir le niveau piézométrique.

IV.4.3. Estimation de la réserve potentielle du réservoir minier de St Martin de Valgalgues (voir annexe 13)

Grace à Dominguez énergie, spécialiste des installations géothermiques, nous pouvons présenter un exemple de capacité énergétique du réservoir minier de Fontanes.

Nous partons sur l'hypothèse de l'utilisation d'une pompe à chaleur dont le coefficient de performance est de 4,02 en production de froid et à 5 pour la production de chaud. Nous partons sur un temps de fonctionnement de la pompe de 8000 h par an.

Sachant que la pompe consomme 257,5 kW sur une heure, si nous estimons le fonctionnement de la pompe à 8000 h alors la consommation totale sera de 2,06 MW/an.

Dans le cas où nous utiliserions la pompe à chaleur en production de froid, la puissance produite serait de 1036 kWh soit 8,3 MW/an produit et en production de chaud la puissance produite serait de 1,3 MW par an.

Un comparatif a été fait avec d'autres sources d'énergies que sont le gaz et l'électricité afin d'estimer la consommation prévue sur 15 ans (Tableau 31 et Figure 124)

Tableau 31 : Comparatif de prévision de consommation annuelle selon 3 sources d'énergie (source Dominguez énergie)

	Rendements ou Coefficient de performance	Prix/MW	Consommation annuelle en €	Consommation sur 15 ans en €
Electricité	0,98	52	546 531	8 197 959
Gaz	0,85	25,5	309 000	4 635 000
Pompe à chaleur	5	52	107 120	1 606 800

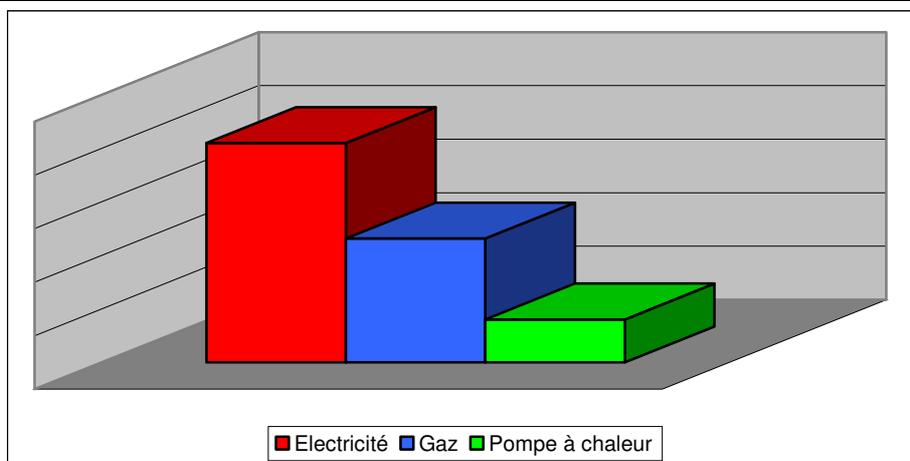


Figure 124 : Représentation de la consommation sur 15 ans avec différentes énergies

La géothermie a un très net avantage.

D'après Dominguez énergie, le pompage de Fontanes additionné à une installation géothermique, permettra de chauffer 240 maisons (d'environ 85 m² chacune) ayant une consommation de 5 kW/h pour le chauffage et en extrayant 5°C de l'eau d'exhaure.

L'investissement à prendre en compte pour la mise en place d'une pompe à chaleur se situe entre 80 et 120 k€ selon les options de celle-ci. Ensuite, chaque maison devra être desservie par un réseau de distribution de chaleur qui dépendra de la distance entre la pompe à chaleur et le bâtiment à chauffer.

L'amortissement d'un tel système est équivalent à une mise en fonctionnement d'une chaudière gaz ou électrique.

Malgré ces informations, nous ne pouvons boucler notre calcul au niveau de l'investissement par manque de données.

IV.5. Conclusion

Le réservoir de St-Martin de Valgalgues possède un très bon potentiel pour une production d'énergie par géothermie avec une possibilité de chauffage d'environ 240 maisons sur une année soit une puissance d'environ 1 MW. Une installation géothermique permettrait de valoriser l'eau qui est actuellement pompée au niveau du puits de Fontanes et de rentabiliser ce pompage qui est à la charge des anciens Charbonnages de France et donc du contribuable.

CONCLUSION GENERALE

Les différentes étapes de ce travail ont permis de mieux connaître les réservoirs d'eaux de mines de la région d'Alès.

Par les analyses physico-chimiques des eaux d'émergence disponibles sur l'ensemble de la zone d'étude, nous faisons apparaître des facteurs de différenciation des eaux.

Les paramètres influant sur la composition chimique de l'eau sont :

- la couverture géologique et l'encaissant des réservoirs miniers étudiés : terrains gypseux et salifères, calcaires, dolomies, pyrite, minéraux alumino-silicatés.
- la profondeur de l'exploitation (superficielle ou profonde), les liens hydrauliques pouvant exister entre les travaux et pouvant causer des phénomènes de mélange d'eau
- la présence d'anciennes exploitations de minerais métalliques dans la couverture géologique
- les débits des eaux circulant dans le réservoir minier.

Les réactions qui se produisent au cours des circulations souterraines avant d'atteindre l'émergence sont :

- les phénomènes de dissolution (calcaire, dolomie, gypse, halite)
- les phénomènes d'hydrolyse de minéraux alumino-silicatés dans les couches stériles du houiller sont suggérés par les fortes teneurs en sodium.
- les phénomènes redox notamment pour la pyrite et le fer peu détaillés par manque de données

Deux faciès d'eaux sont dissociés :

- des eaux sulfatées et calcosodiques issues d'anciennes exploitations recouvertes par des terrains triasiques.
 - des eaux calciques et magnésiennes et proches du faciès des cours d'eau de la région.
- Ces émergences drainent des exploitations non recouvertes par des terrains triasiques.

L'émergence présentant le plus de mesures (Fontanes) a un comportement similaire à celui souvent décrit sur d'autres anciens sites miniers c'est-à-dire que l'on observe une décroissance des concentrations pour les éléments mesurés. Ce comportement est typique pour d'anciennes mines.

Les autres émergences ne possèdent pas d'analyse depuis le début de l'ennoyage de la mine et il est difficile de définir l'évolution temporelle des paramètres physico-chimiques. Il faut noter qu'il serait important de mesurer la qualité des eaux dès le début de l'ennoyage si l'on souhaite mieux connaître le réservoir minier et prévoir l'évolution des concentrations et le traitement adapté.

En règle générale, les analyses chimiques de la zone d'étude font ressortir des concentrations élevées notamment en fer et en sulfates. La teneur du site de Fontanes est si élevée en fer qu'elle nécessite l'utilisation d'un traitement. Ce constat nous a orientés vers une démarche de meilleure connaissance des paramètres hydrodynamiques de ce réservoir afin de mieux appréhender les quantités d'eau concernées.

Le modèle que nous avons utilisé dit à événements discrets a l'avantage de bien représenter le pompage dans le réservoir modélisé. Avec ce modèle, nous avons estimé les paramètres perméabilité et épaisseur qui donnent à présent une estimation de la capacité du réservoir.

Compte tenu des paramètres obtenus par la modélisation pour définir le réservoir minier de Fontanes, la masse d'eau est exploitable sur le long terme pour produire de l'énergie par géothermie

La connaissance des températures de l'eau et du débit de pompage sur ce site nous permettent de proposer l'installation d'un système géothermique pour en utiliser les calories. L'estimation proposée est basée sur l'utilisation d'une pompe à chaleur et la puissance de l'ensemble se situerait autour de 1 MW (correspond au chauffage pour 240 maisons).

Afin de bien appréhender la situation d'après-mine, une connaissance fine de l'état du site avant et pendant l'exploitation est nécessaire. L'utilisation d'outils d'analyses de données et de modélisation permet de compenser partiellement le manque de données. Les anciens sites industriels comme Fontanes, peuvent être encore source d'énergie, non pas par l'exploitation de charbon directement mais par l'exploitation de calories contenues dans les eaux des réservoirs miniers.

REFERENCES

- BANTON O., BANGOY M. B., (1997) Hydrogéologie, multiscience environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université de Québec, 460 pp.
- BARBIER J., BAUDRY D., CHERY L., RUPPERT N., SEGUIN J.-J., VIGOUROUX P., (2001) Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Rapport d'avancement no 1. Etude bibliographique. Rapport BRGMIRP-50403-FR, 185 p., 25 fig., 21 tabl., 3 annexes, 19 p.
- BAUBRON J.-C., FABRIOL R., FOURNIGUET G., HAMM V., VAUTE L., (2003) Modélisation hydrogéologique du réservoir minier de Godbrange et influence du comblement partiel à cendres volantes. Rapport BRGM/RP-52802-FR, 73 p., 22 fig., 13 tabl., 6 ann.
- BERGER G., LEFEBVRE A., TURC R., GRAS H., POIDEVIN J.-L., ARENE J., GUERANGE B., (1978) Carte géologique France (1/50 000), feuille Alès (912) – Orléans : Bureau de recherches géologiques et minières. Notice explicative par ARENE J., BERGER G.-M., GRAS H., POIDEVIN J.L., SAUVEL C., (1978), 57 p.
- BLACHERE A., (1985) Evaluation des impacts hydrogéologiques de l'arrêt d'une exhaure minière (Vallées de l'Ondaine et du Lizeron, Bassin houiller de la Loire) Modélisation mathématique du milieu – Thèse de l'Université des Sciences et techniques du Languedoc – Tome 2 – 331 pp.
- BLUM A., BARBIER J., CHERY L., PETELET-GIRAUD E., (2001) Contribution à la caractérisation des états de référence géochimique des eaux souterraines. Outils et méthodologie. Rapport BRGM/RP-51093-FR, 286 p, 6 ann., 78 fig., 56 tabl.
- BLUM A., BRENOT A., CHERY L., SONNEY R., (2006) Identification des zones à risque de fond géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée et Corse. Rapport de phase 2. Caractérisation des secteurs à risque. Rapport BRGM RP-54530-FR, 137p + 3 annexes
- BONNET M., (1982) Méthodologie des modèles de simulation en hydrogéologie, Documents du BRGM n°34.
- BRAGER-RABOIN E., LARDET H., SALLES J., TURC R., (1999). Du haut de l'ermitage, Alès, Paysages et géologie. 44p.
- BRENOT A., BLUM A., CHERY L., (2006) Identification des zones à risque géochimique élevé en éléments traces dans les cours d'eau et les eaux souterraines du bassin Rhône – Méditerranée et Corse. Rapport de phase 3. Définition d'un programme d'acquisition de données. Rapport BRGM RP-54663-FR, 45p + 3 annexes
- BRGM (1994) Département du Gard – Inventaire des travaux miniers (hors concessions nationalisées de charbon) – R 38215
- BRGM, (1983). Atlas des eaux souterraines du Gard. Vol. 1, 24 p.
- BRGM, (2008). La géothermie en France. L'énergie du sous-sol n°2. 11pp.
- BRGM, (2004). La géothermie. Les enjeux des géosciences. 44 pp.
- CESAME, (2006) Etude hydrogéologique des concessions de Rochebelle et Saint-Martin de Valgugues, 23 p. Rapport pour les HBCM
- CESAME, (2007) Installations hydrauliques de sécurité, 24 p. Rapport pour les HBCM.
- CESAME, (1999) Etude hydrogéologique des travaux miniers de la concession de la Grand Combe Ouest, 147p. Rapport pour les HBCM
- CESAME., (2002) Etude hydrogéologique, Bassin houiller des Cévennes, Concession de Grand Combe Est, Concession de Tréllys et Palmesalade, Concession de Robiac et Meyrannes, Extension des travaux miniers de Robiac et Meyrannes sur la concession de Montalet. 63p. Rapport pour les HBCM.
- CHARBONNAGES DE FRANCE., (2006) Arrêt des travaux dans les concessions de Rochebelle – Saint Martin de Valgugues, Mémoire, Volume 2, pp.19-22.
- CHERY L., (2006) Guide technique, Qualité naturelle des eaux souterraines, Méthode de caractérisation des états de référence des aquifères français, BRGM éditions, 238 p.
- COLLON P., FABRIOL R., BUES M., (2006). Modelling the evolution of water quality in abandoned mines of the Lorraine Iron Basin. Journal of hydrology, vol.328, Issues 3-4, pp.620-634

- COLLON-DROUAILLET P., FABRIOL R., BUES M., (2005) A semi-distributed modelling of the evolution of groundwater quality in flooded mines in the Lorraine iron basin. Post-Mining 2005, November 16-17, Nancy, France.
- COPARD Y., DISNAR J.R., BECQ-GIRAUDON J.-F., BOUSSAFIR M., (2000) Evidence and effects of fluid circulation on organic matter in intramontane coalfields (Massif Central, France) *International Journal of Coal Geology* 44 (2000) pp.49-68
- COURBIS A.L, VAYSSADE B., (2004) Représentation de bassins versants sous SIG en vue d'établir leur bilan hydrique par simulation. SIG' 2004, Issy-les-moulineaux, 6-7 octobre 2004.
- COURBIS A.L, VAYSSADE B., (2007) Simulation as a decision-support for evaluating effects of anthropogenic activities on water resources, 10th International Conference on Environmental Science and Technology (CEST 2007) Kos, Grèce, 4-8 septembre 2007, pp 267-274.
- DERRON M-H., (2004) Géochimie des eaux de sources et interaction eau-roche dans les Alpes – Résumé du cours de THELIN P. sur l' « altération et la minéralogie industrielle » UNI Lausanne, 17 pp
- DNEMT, BRGM, (1996) Représentations graphiques des résultats d'analyses eau minérale – Note technique n°8, 14p.
- ECKART M., PICKEL H. J., TOMSCHI H., (2001) Box-models for water management at underground mines. *New approaches Characterizing Groundwater Flow*, Balkema, pp.303-306.
- FABRE G., (1984) Traits généraux de l'hydrologie karstique en basse Cévenne. *Karstologia* n°4, pp. 19-25.
- FAILLAT, J-P., (1997) Abondance et origine des composés carbonés inorganiques des sources karstiques du Languedoc-Roussillon – 6^e colloque d'hydrologie en pays calcaire et milieu fissuré. 15-17 Août 1997.
- FREEZE R A., CHERRY J A., (1979) *Groundwater - Englewood Cliffs, USA*, 604 p.
- GARREL D., (1998) *La mémoire de l'eau : Petite histoire entre Cévennes et Garrigues*, A.A.A, Alès 256 p.
- GRAS H., (1970) Etude géologique détaillée du bassin houiller des Cévennes, Thèse de l'Université de Clermont-Ferrand.
- GUERANGUE J., CHARBONNIER P., (2000) Etude historique des sites industriels et miniers du Nord Aveyron. BRGM RP-50016-FR, 11 TAB., 13 Fig., 4 Ann., 60 p.
- IGN, carte topographique d'Alès au 1/25 000^e n°28400T
- JESSOP A.M., (1990) *Thermal Geophysics – Developments in Solid Earth Geophysics*, 17 – Elsevier, Amsterdam, 306 pp.
- LANINI S., FABRIOL R., (2000) Différentes approches de modélisation des écoulements et du transport dans un réseau de tubes; comparaison avec des résultats expérimentaux. Rapport GISOS/RP-50154-FR, 10 fig., 1 tabl., 3 ann., 48 p.
- LEDOUX E., (2003) Cours sur les modèles mathématiques en hydrogéologie, Centre d'Information Géologique, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
- LHOMME J.-C., (2004) *Les énergies renouvelables* –Ed. Delachaux et Niestlé – 190 pp.
- LIVET G., (1943) Sur le terrain houiller du Gard, *Revue de l'Industrie Minérale*, Mars 1943, n°472, pp. 117 à 601
- MARTIN P., (1988) Le karst du compartiment oriental de la basse Cévenne carbonatée (Gard). *Karstologia* n°11-12, p. 25-36.
- MEYBECK M., (1984) *Les fleuves et le cycle géochimique des éléments*, Thèse d'état, Université Pierre et Marie Curie, 456 p.
- MEYBECK M., (1986) Composition chimique des ruisseaux pollués de France, *Sci. Géol., Bull.*, 39, 1, p. 3-77, Strasbourg
- NUTALL C.-A, YOUNGER P.-L., (2004) Hydrochemical stratification in flooded underground mines: an overlooked pitfall – *Journal of Contaminant Hydrology*, 69, pp. 101-104
- OBSERV'ER, (2007) *Etat des énergies renouvelables en Europe*, Edition 2007. Edition Epel Industrie Graphique – 80 pp.

- LOUDIN L., (2006). Une formule simple d'évapotranspiration potentielle pour la modélisation pluie-débit à l'échelle du bassin versant. *La houille blanche*, n°6 pp.113-120
- PETELET E., (1998) Application de la géochimie à l'étude des mouvements d'eaux à moyenne et petite échelle : les bassins versants de l'Hérault et de la Peyne (S. France). Utilisation des éléments majeurs, traces et des isotopes du Sr et du Pb. Thèse de doctorat, Université Montpellier II, France. 512 pp.
- PHILIPPEAU G., (1986). Comment interpréter les résultats d'une analyse en composantes principales ? STAT-Institut Technique des Céréales et des Fourrages. 63 p.
- PIPER A.M., (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses, *Trans. Am. Geophy. Union* 25 p. 914-928
- PLAGNES V., (1997) Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux, Thèse université Montpellier II, 372 pp.
- RAYMOND J., (2006) Low-temperature geothermal potential of the Gaspé mines, Murdochville. Thèse de l'Université de Laval.
- SABONNADIÈRE J.-C., (2007) Nouvelles technologies de l'énergie 3, géothermie et énergie de la biomasse, Ed. Lavoisier, 264 pp.
- SAUVEL C., (1985). Etude relative aux incidences hydrogéologiques et géotechniques du délaissement des travaux du Destival – Rapport préliminaire. BRGM n°85 LRO 607 PR, 12p.
- SCHMITT J.-M., COMBES P., LEDOUX M., (2004). Qualité des eaux après fermeture des mines : remplissage initial, évolution transitoire, stabilisation à long terme et gestion environnementale. *Les techniques de l'industrie minière*, n°21, p112-117.
- SCHOELLER H., (1962) - Les eaux souterraines. Edition Masson et Cie. Paris, 642 p.
- SIGG L., BEHRA P., STUMM W., (2000) – Chimie des milieux aquatiques – Ed. Dunod. 567 p.
- THORNTHWAITE C. W., MATHER J.R., (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance, *Publications in climatology*, Vol. X n°3, 311p.
- VAUTE L., NGUYEN THE D., FABRIOL R., PINAULT J.-L., BAUBRON J.-C., (2004). Une méthode de modélisation hydrogéologique inverse appliquée à un problème d'ingénierie: l'abaissement du niveau d'un réservoir minier ennoyé dans le bassin ferrifère lorrain. *Revue française de géotechnique*, n°106-107, 1^e et 2^e trimestres 2004. p. 85-94.
- VIDAL V., (1962) Exploitation des mines – Tome III, Méthodes, énergie, services du jour – Ed. Dunod, Paris, 593 pp.
- WANG H., (1991) Dynamique sédimentaire, structuration et houillification dans le bassin houiller Stéphaniens des Cévennes. Thèse de l'Université de Bourgogne – Centre de science de la Terre, 265 pp.
- WIENIN M., (1996) La faille de Villefort *Bulletin AGAR* n°35-36
- WOLKERSDORFER C., (2008) Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines – Fundamentals, Tracer Tests, Modelling, Water Treatment, Ed. Springer, 465 pp.
- YOUNGER P. L., BANWART S. A., (2002) Mine Water – Hydrology, pollution, remediation. Ed Kluwer academic publishers, Royaume-Uni, 441 pp.
- ZENG L., (1990) Contribution à l'étude du foudroyage en travaux miniers par modélisation physique en matériaux équivalents. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 170 pp
- ZEIGLER B.P., (1984) Multifaceted modeling and discrete event simulation, Academic Press, 372p.

WEBOGRAPHIE

- ADEME. *Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie* [en ligne] www.ademe.fr/ (Page consultée le 15 mai 2009)
- Agence de l'eau RMC. *Site de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse* [en ligne] www.eaurmc.fr (Page consultée le 15 mai 2009)
- Association pour le développement des énergies renouvelables. *ADER*, [en ligne] <http://www.ader.ch/> (Page consultée le 15 mai 2009)

REFERENCES

- Banque hydro. *Les principaux services proposés* [en ligne] www.hydro.eaufrance.fr (Page consultée le 15 mai 2009)
- BRGM. *Le portail des sciences de la Terre* [en ligne] www.brgm.fr (Page consultée le 15 mai 2009)
- Eaufrance. Portail national d'Accès aux Données sur les Eaux Souterraines - ADES, [en ligne] www.ades.eaufrance.fr/ (Page consultée le 15 mai 2009)
- ENSMP. *Systèmes hydrologiques et réservoir hydrodynamique et réactions* [en ligne] www.cig.ensmp.fr (Page consultée le 15 mai 2009)
- Geolales. *Association géologique d'Alès et de sa région (AGAR)* [en ligne] www.geolales.net (Page consultée le 15 mai 2009)
- SSG - Société Suisse pour la géothermie. *Géothermie.ch* [en ligne] <http://www.geothermie.ch/> (Page consultée le 15 mai 2009)
- Gnouma R., *Aide à la calibration d'un modèle hydrologique distribué au moyen d'une analyse des processus hydrologiques : application au bassin versant de l'Yzeron* (Thèse de doctorat – Institut National des Sciences Appliquées de Lyon), 2006 [en ligne]. www.lyon.cemagref.fr/doc/these/gnouma/Chapitre_2.pdf (Page consultée le 3 février 2009)
- MSN Encarta. *Bienvenue sur Encarta* [en ligne] <http://fr.encarta.msn.com/> (Page consultée le 15 mai 2009)
- Office of energy efficiency. *Ressources naturelles Canada*, [en ligne] www.oee.nrcan.gc.ca/ (Page consultée le 15 mai 2009)
- Pays de la Loire. *Ddass et Drass des pays de la Loire* [en ligne] www.pays-de-la-loire.sante.gouv.fr (Page consultée le 15 mai 2009)
- Rolley J.P., *Pages personnelles de JP Rolley - La petite histoire du Plomb et du Zinc en Cévennes*, [en ligne] <http://jproolley.chez-alice.fr/> (Page consultée le 15 mai 2009)
- Techniques de l'ingénieur. *La plus importante collection documentaire technique et scientifique en français* [en ligne] <http://www.techniques-ingenieur.fr/> (Page consultée le 15 mai 2009)
- Tourisme Gard. *Bienvenue dans le Gard* [en ligne] www.gard-tourisme.com (Page consultée le 15 mai 2009)
- Wikipédia. *L'encyclopédie libre* [en ligne] www.wikipédia.com/ (Page consultée le 15 mai 2009)

LES ANNEXES

Annexe 1 : Description détaillée de la stratigraphie des bassins houillers de la région d'Alès

La description détaillée de chaque cuvette est présentée dans les paragraphes suivants notamment pour permettre de situer la répartition spatiale des différentes couches exploitées et la localisation des émergences d'eaux de mines.

A1 – 1 - Cuvette de Bessèges

Dans cette cuvette (Figure 3), le houiller du Stéphanien a une extension de 15 km entre Mercoirol et le Mont Lozère.

La série stéphanienne a une épaisseur de 2650 m et est décomposée en différentes unités.

- Les Stériles de Gagnières (1000 m) contiennent très peu de charbon et sont constitués de :
 - 100 m de conglomérats de base constitués par des brèches à élément de quartz, micaschiste et gneiss, grès grossiers de couleur sombre.
 - 900 m d'alternance de grès et siltite en banc métrique

- Le faisceau des anthracites de Molières (300 m)

Il se situe au dessus des stériles de Gagnières, et se constitue de couches de charbons (anthracite) en alternance avec des bancs décimétriques stériles de nature gréseuse. Ce faisceau se termine par un toit en cinérite.

- Le faisceau des demi-gras de Molières-St Jean (1000 m)

Il se situe au dessus du faisceau des anthracites des Molières. Il contient une trentaine de couches de charbon, de qualité demi-gras, d'épaisseur de l'ordre du mètre, séparées par des interbancs de nature gréseuse. Le toit de ce faisceau est constitué de cinérite.

- Le faisceau supérieur de St Jean (350 m)

Il contient 16 couches de moins d'un mètre d'épaisseur intercalées avec des bancs stériles gréseux de faible épaisseur. Le sommet du faisceau est affecté par de l'érosion antétriasique.

A1 - 2 - Cuvette de Rochebelle

Neuf faisceaux ont été exploités dans cette cuvette : Lavabreilles d'une épaisseur de 450 m (représentant la totalité des terrains houillers entre le socle et la base du Trias), Drulhes, Fontanes, Cendras, Ancien Rochebelle, St Martin, Ono, Nouveau Rochebelle et Bois Commun (Figure 100).

A1 – 3 - Cuvette de la Grand' Combe

Nous retrouvons dans cette cuvette trois zones stratigraphiquement différentes, dont nous allons décrire par la suite les séries.

AI – 3 - 1 - Faisceau des Oules (500 m)

Il compte 9 couches de charbon. Au dessus du substratum en micaschiste, nous trouvons la partie inférieure du faisceau constituée de 25 m de conglomérat à éléments grossiers de quartz. Au-dessus de la partie inférieure vient une alternance d'une centaine de mètres de siltites gréseuses contenant 2.5 m de charbon et des veines fines de charbon.

Au dessus de cette alternance vient une couche de charbon de 14 m avec intercalation de silt gréseux suivie de 115 m environ de grès grossier.

Pour finir, le toit de ce faisceau est constitué de 250 m d'une alternance de couches charbonneuses dont l'épaisseur varie de 1 à 5 m et de grès moyens à fins ainsi que de siltites.

AI – 3 - 2 - Faisceau de Ricard (1150 m)

La série commence par un contact normal avec le substratum et peut se décomposer en trois ensembles (Figure 125):

1 – Stériles inférieurs de la Forêt, composés de conglomérats à éléments grossiers de quartz, schiste, gneiss et de grès grossiers, moyens et fins ainsi que des siltites.

2 – Couches du faisceau de Ricard contenant 5 couches d'antracites dont l'épaisseur peut atteindre 5 m en alternance avec des couches stériles de siltites.

3 – Stériles supérieurs de la Forêt (920 m au maximum) qui se retrouvent juste au dessus des couches du faisceau de Ricard décrit précédemment, constitués de grès et de conglomérats à éléments de quartz, gneiss et micaschiste en alternance avec des siltites gréseux.

AI – 3 – 3 - Faisceau de Grand' Baume (120 m max)

Le mur de ce faisceau est constitué par la Couche Rase productive et le toit par la couche Pilhouse. On trouve à l'intérieur de la série : les couches Grand' Baume d'épaisseur 15 à 20m, Minette d'Abylon (1 m) ainsi que Abylon (6,5 m) et enfin Pilhouse de 3,5 m. Les stériles intercalés sont fins et contiennent des siltites et des lentilles de grès fins et rarement des grès moyens.

AI – 3 – 4 - Faisceau des Lumières (300 m)

Sa partie inférieure, épaisse de 150 à 180 m, est constituée de 6 couches de charbon intercalées avec des stériles épais d'environ 20 m.

A l'Ouest de la cuvette de Grand' Combe-Champclauson se trouvent les couches de charbon : Mascart inférieur (1,5 m), Mascart moyen (3,0 m), Mascart supérieur (1 m), Sans dénomination (0,4 m), Lumières inférieures (1,80 m) et supérieures (3,0 m). Les stériles sont composés de siltites et de grès.

Par contre, la partie supérieure a une épaisseur de 130 à 150 m contenant des couches de charbon et des stériles gréseux.

AI – 3 - 5 - Faisceau de Champclauson (200m)

Ce faisceau débute par la couche de Champclauson (5m), Chauvel (2m), Salze (1.5m), Crouzette (3m) dans la partie moyenne et Forge (2m). Les interbanes stériles sont de nature gréseuse et silteuse.

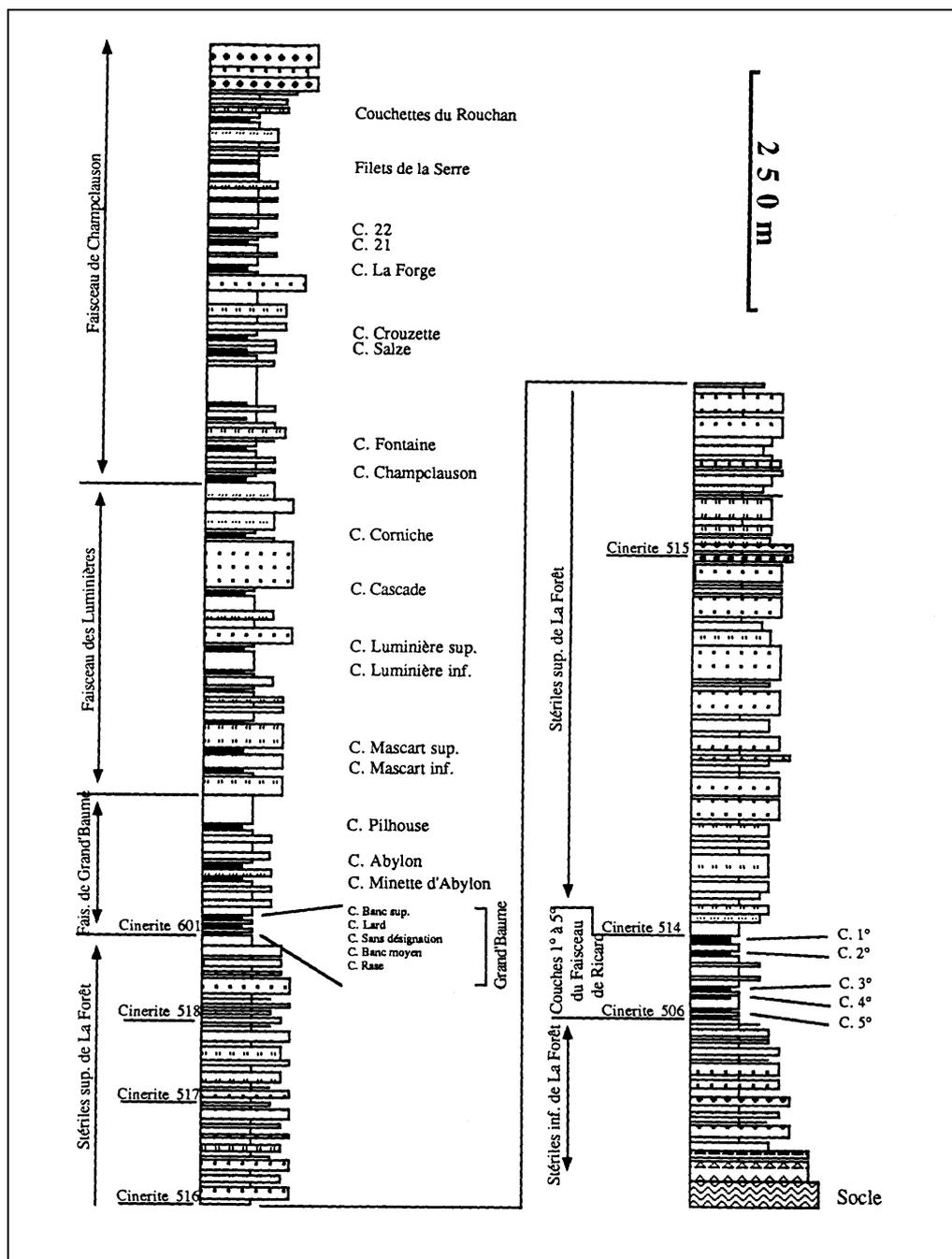


Figure 125 : Log Grand' Combe (Wang, 1991)

A1 – 4 - Cuvette de la Vernarède

Cette cuvette se développe sur une épaisseur de 1 500 m et se situe au nord de celle de la Grand' Combe (Figure 3). Sa composition est délimitée en 5 parties du bas vers le haut (Figure 126):

A1 – 4 – 1 - Stériles inférieurs du Faisceau de la Vernarède

Constitués de :

- 96 m de conglomérats parfois intercalés de petits bancs gréseux et de siltites.
- 348 m d'alternances de bancs conglomératiques, de grès grossiers et moyens ainsi que de siltites avec parfois des lits fins contenant du charbon.

- Siltites contenant des grès fins et des traces de charbons sous forme de veine.

A1 – 4 – 2 - Couches productives de St Augustin et Terrenoire II

La couche St Augustin contient 6 bancs de charbons dont la puissance totale est de 37 m près de l'entrée du village de la Vernarède. Cette couche s'ouvre du Sud vers l'Ouest-Nord-Ouest.

A1 – 4 – 3 - Stériles moyens du Faisceau de la Vernarède

- 100 m de grès variant de grès grossiers conglomératiques à des grès fins.

A1 – 4 – 4 - Couches productives supérieures entre la couche Terrenoire I et Blachères n°1

- Couche Terrenoire constituée de 2 ou 3 couches de charbon dont le cumul des épaisseurs est d'un mètre et séparées par des bancs de siltites gris noirs.
- Couche Jenny constituée de 3 bancs de charbons plutôt minces (le cumul de l'épaisseur n'est pas supérieur à 1m)
- Couche canal contient une couche de charbon de 1 m environ, les stériles sont des siltites gréseuses sombres
- Couche Rouvière : elle s'épaissit vers le Nord (au minimum elle fait 60 cm)
- Couche Dumazert, elle a une épaisseur de 1.6 à 1.8 m. On la retrouve à l'affleurement en particulier au Nord de la faille de Werbrouck, les stériles entre Dumazert et Ste Barbe ont une épaisseur approximative de 40 m.
- Couche Ste Barbe a une épaisseur faible (inférieure à 40 cm). Les stériles entre cette couche et la couche anonyme ont une épaisseur de 30 m dont la constitution est celle des siltites.
- Couche anonyme dont l'épaisseur est d'environ 1 m.
Cette couche est suivie d'une zone de stérile d'une épaisseur de 46 à 55 m dont la composition est celle des siltites et des grès fins.
- Couche Blachères n°1 (2.5 m). Elle est suivie par des stériles composés de siltites avec des intercalations de nodules de fer ainsi que des schistes bitumineux de 4-5 m.

A1 – 4 – 5 - Stériles supérieurs du Faisceau de la Vernarède

La base de ces stériles d'une épaisseur de 80 m contient des corps gréseux dans des siltites et contenant parfois de petites veines de charbon. D'ailleurs à 18 m au-dessus du mur de cette base se trouve la couche de charbon Blachères n°2 contenant 0.6 m de charbon en 3 bancs.

La couche supérieure de ces stériles est constituée par les poudingues du Mont Châtenet.

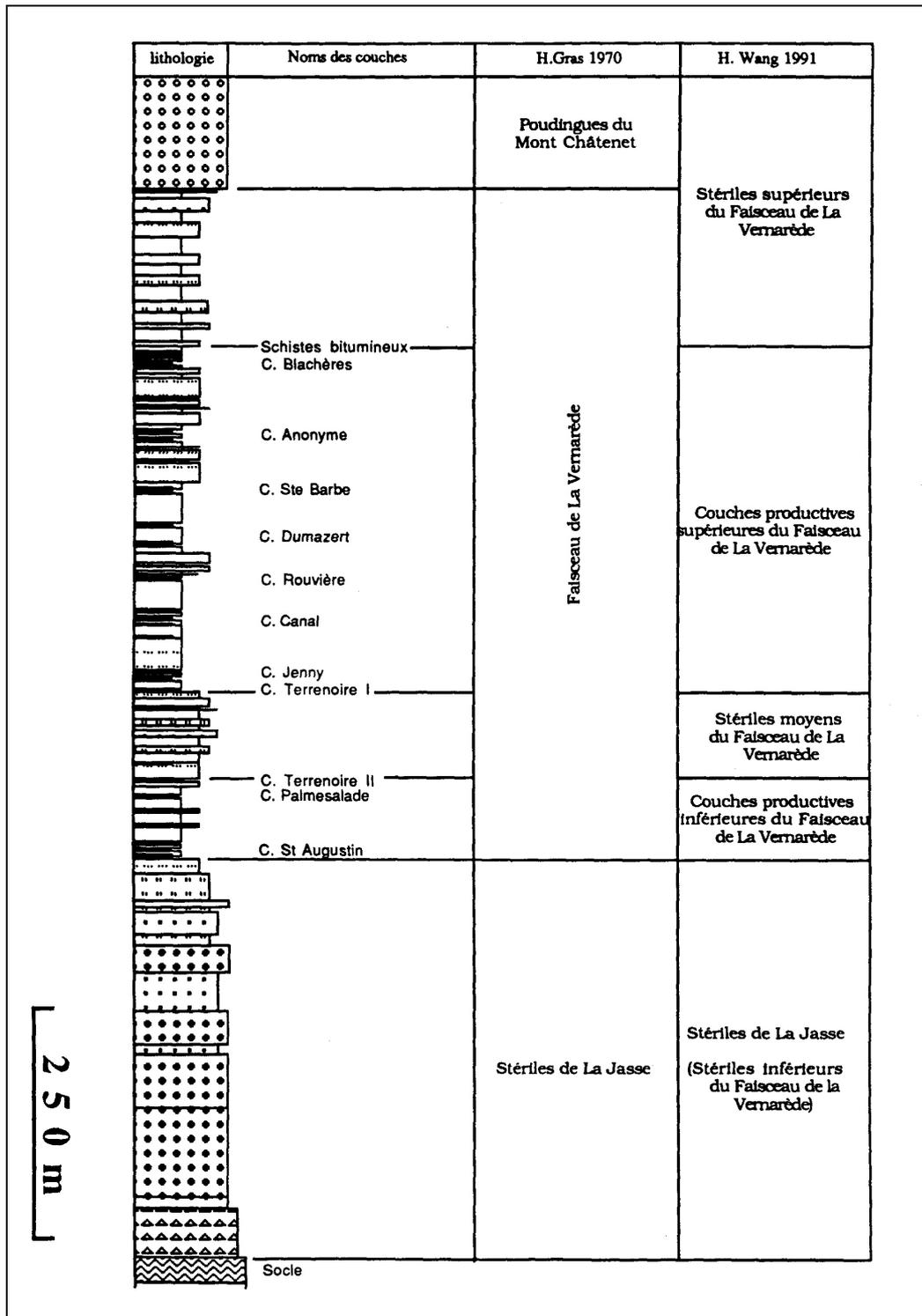


Figure 126 : Log de la Vernarède (Wang, 1991)

A1 – 5 - Horst de Portes

Il se situe au Nord de la Grand' Combe (Figure 3) et contient un remplissage de 1050 m qui se subdivise de bas en haut (Figure 127) par :

- Les stériles inférieurs du Faisceau des Portes sont des conglomérats et grès grossiers
- Les couches non productives inférieures

- Les couches productives supérieures. Ces deux couches contiennent 7 niveaux avec du charbon de qualité moyenne
- Les stériles supérieurs du faisceau de portes sont composés par une couche de charbon dite de Rouchan ainsi que des siltites, des grès et conglomérats.

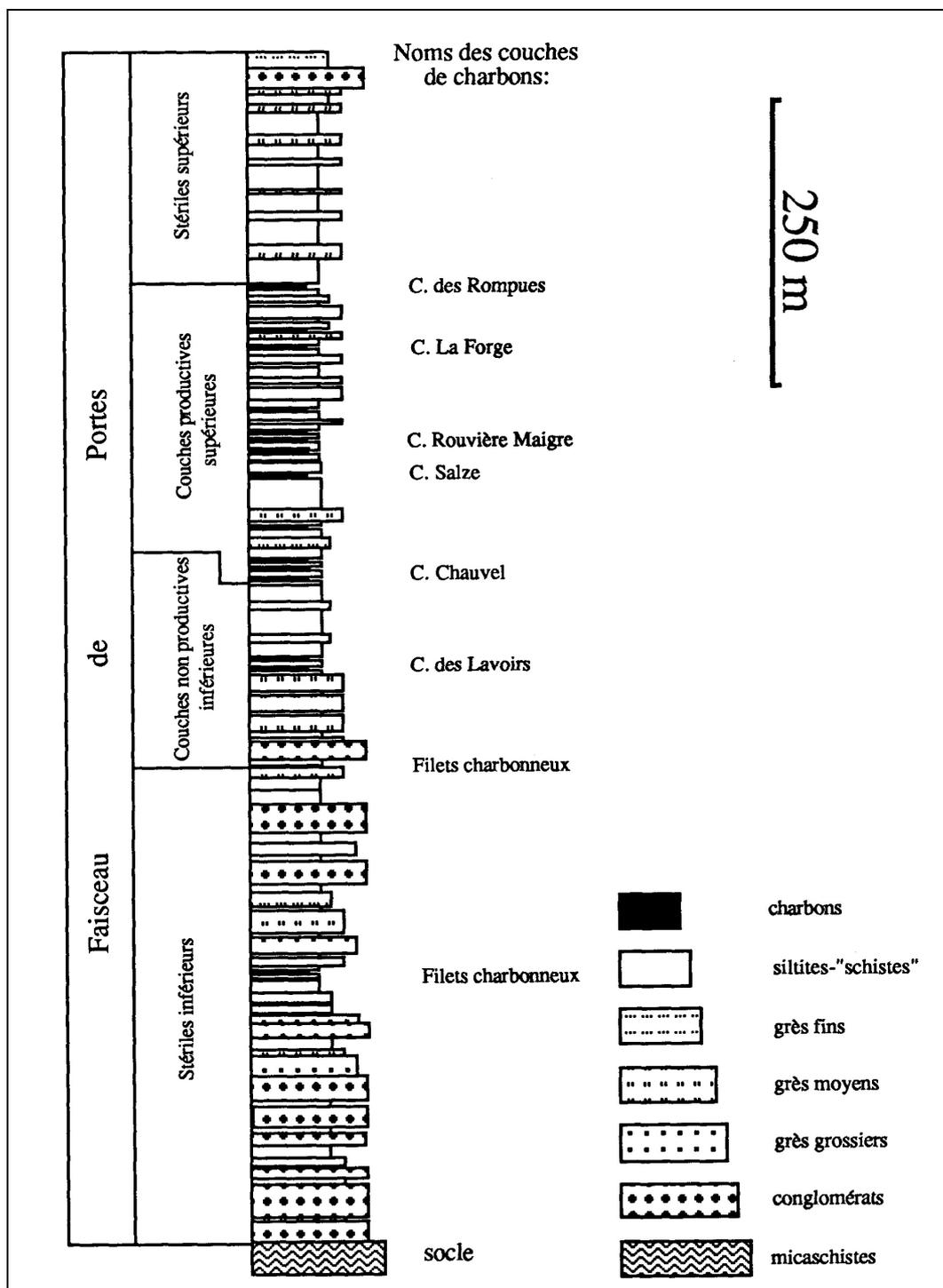


Figure 127 : Coupe stratigraphique de Portes (Wang, 1991)

L'unité géologique pour le charbon est appelée cuvette en géologie comme nous l'avons vu dans ce paragraphe et les mineurs subdivisaient les zones à exploitées en concessions. Cette subdivision sera reprise dans ce rapport pour évoquer les différentes zones étudiées et décrites (Figure 8).

Annexe 2 : Les différentes phases dynamiques et la houillification affectant les différents bassins miniers

La formation et déformation des bassins miniers des Cévennes peuvent être synthétisées en 4 phases (Wang, 1991).

- 1 – Au Stéphanien, ouverture et remplissage du bassin dans un contexte tectonique compressif sur des accidents décrochants.
- 2 – Entre le Stéphanien et le Trias, les séries déposées au cours du Stéphanien sont plissées et subissent une érosion partielle.
- 3 – Une série mésozoïque puissante recouvre progressivement le bassin houiller.
- 4 – Au tertiaire, la couverture mésozoïque est déformée, fracturée et érodée.

La *phase 1* correspondant au remplissage du bassin au cours d'un contexte tectonique très actif. Les dépôts sédimentaires ainsi que ceux de charbon sont organisés selon les mouvements tectoniques qui se sont produits à cette période (Figure 128)

Prenons comme exemple, la Cuvette de la Grand' Combe.

Elle est subdivisée en trois zones délimitées par les failles de Chamarit (N150) et de Thérond (N45). Chaque zone a une série propre dont nous arrivons à retrouver le cadre structural de formation. La Cuvette de la Grand' Combe est subdivisée en :

- Dépression de la Vernarède

Le jeu de failles précoce bordière Paulin et Cornas au cours du Stéphanien a influencé le dépôt dans cette dépression qui s'est déplacé de l'Ouest vers l'Est ainsi que son évolution de Graben à demi Graben et enfin en Graben.

- Dépression de la Grand'Combe-Champclauson.

La formation de cette dépression est décomposée en 5 phases paléogéographiques différentes qui sont regroupées en 3 stades. Les dépôts détritiques et leur puissance sont très fortement liés au mouvement tectonique produit en synchronisme. Dans cette dépression on peut noter le jeu des failles bordières du bassin houiller que sont les failles de Villefort et de Peyraube. Cette dernière est profonde de type synsédimentaire et de ce fait, a provoqué des digitations dans le charbon. Par contre, la faille précoce de Malperthus beaucoup moins profonde a évolué d'un jeu normal à inverse ce qui a provoqué des modifications de pendage dans les couches de charbon.

La *phase 2* est une combinaison de plissement et d'érosion des séries stéphanienues avant le Trias.

Les séries stéphanienues sont plissées et en même temps le bassin se relève. Les couches supérieures stéphanienues sont érodées et plus intensément dans les zones surélevées par un plissement plus marqué comme le Rouvergue. Cette érosion des terrains stéphanienus suite à leur relèvement a certainement limité la sédimentation permienne.

La *phase 3* a été définie comme l'enfouissement du bassin sous les dépôts du Mésozoïque.

Suite à la période d'érosion de la phase 2, une nouvelle période de distension se produit. Ensuite, des dépôts viennent recouvrir les terrains, leur faciès est continental, lagunaire, marins littoraux au Trias et ensuite au Jurassique et Crétacé, ces dépôts deviennent marins. Du fait de l'érosion finistéphanienne, les terrains mésozoïques sont discordants sur les terrains stéphanienus.

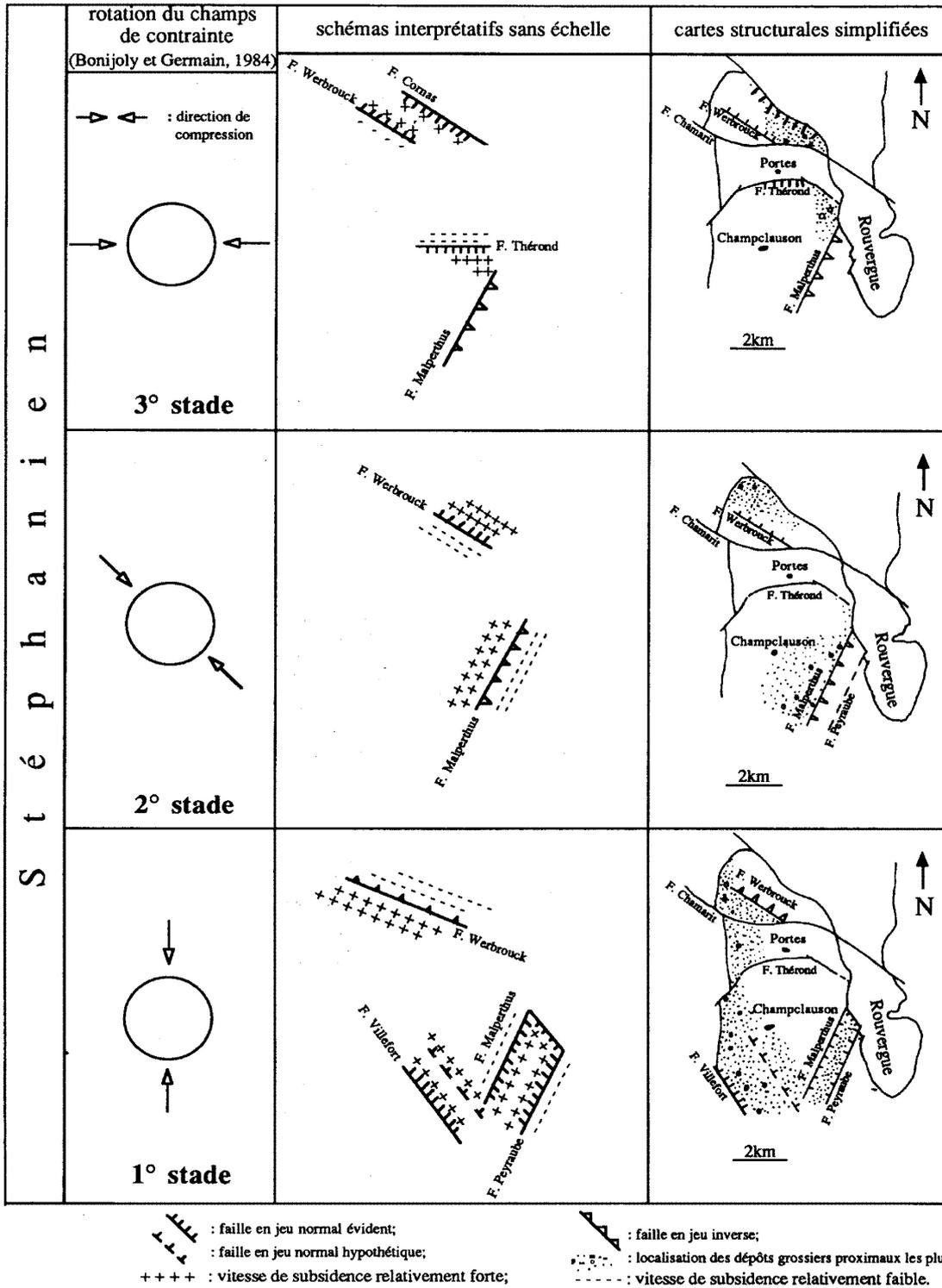


Figure 128 : Les différents stades de la formation de la Grand' Combe (Wang, 1991)

La phase 4 est définie par des déformations, fracturation et érosion de la couverture mésozoïque depuis le tertiaire.

La compression pyrénéo-provençale (Sud-Nord) a affecté les terrains mésozoïques sous la forme d'anticlinaux et de synclinaux Ouest Nord Ouest-Est Sud Est et s'est accompagnée d'une période d'érosion au mésozoïque suite à un effet de relèvement de l'ensemble des terrains.

Annexe 3 :

Des colorations ont montré que le temps de transit entre les pertes du Gardon et les sources de la Tour et de Dauthunes était de l'ordre de 2 à 3 jours. Ces circulations se produisent dans l'aquifère de l'Hettangien. Ainsi, nous supposons que certains apports proviennent des terrains triasiques (traces de dissolution dans les terrains salifères notamment dans la région de la Grand-Combe). La nappe, contenue dans les calcaires sinémuriens alimente aussi la nappe de l'hettangien via des pertes et des infiltrations directes depuis le massif des Serres-Pallières (Figure 129).

Une estimation du bassin d'alimentation des deux sources AEP donne 52 km² (Fabre, 1984).

Le secteur oriental est limité par le Gardon à l'Ouest (limite à condition de potentiel), par la faille des Cévennes à l'Est, par l'Auzonnet au Nord et Alès au Sud.

Les terrains triasiques se retrouvent au N et NW du secteur, au Sud du trias affleurent les terrains du Dogger-Lias qui représentent la majorité de la zone.

Le Jurassique supérieur affleure à l'Ouest et au Nord du synclinal de St Julien les Rosiers et le crétacé inférieur est présent à l'extrémité Ouest de la zone définie, au contact avec le fossé tertiaire d'Alès (Figure 130).

1 - Holocène et Anthropogène. 2 - Pléistocène. 3 - terrains imperméables. 4 - terrains carbonatés. 5-6 - cours d'eau pérenne (5), temporaire (6). 7 - butte de méandre recoupée. 8 - paléo-écoulement. 9-10 - liaison hydraulique prouvée par traçage (9), supposée (10). 11-12 - source impénétrable pérenne (11), temporaire (12). 13-20 - cavités pénétrables. 13 - grotte-source temporaire. 14 - grotte-regard sur un écoulement pérenne. 15 - grotte-perte temporaire. 16 - aven-perte temporaire. 17-18 - aven-regard sur un écoulement pérenne (17), temporaire (18). 19 - aven « sec ». 20 - grotte « sèche ». 21 - perte de rivière.

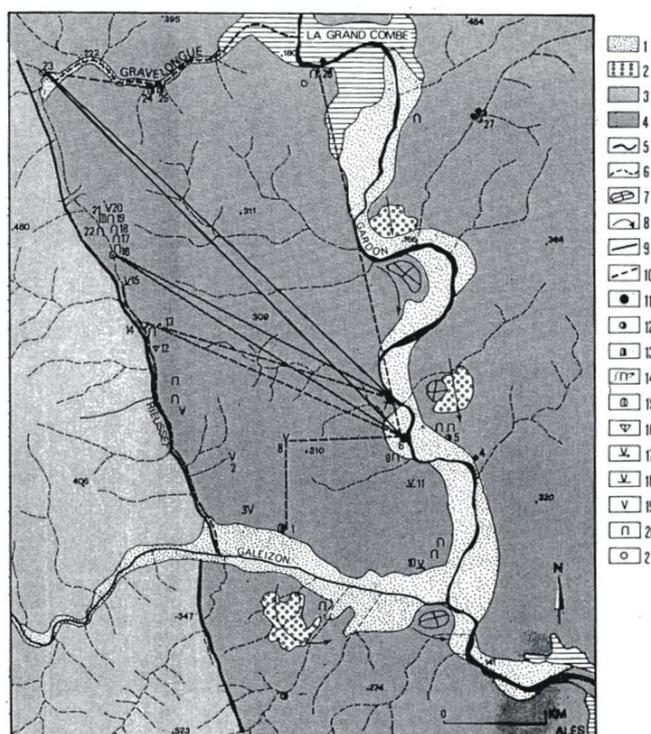


Figure 129 : Secteur occidental du karst de basses Cévennes (d'après Fabre, 1984)

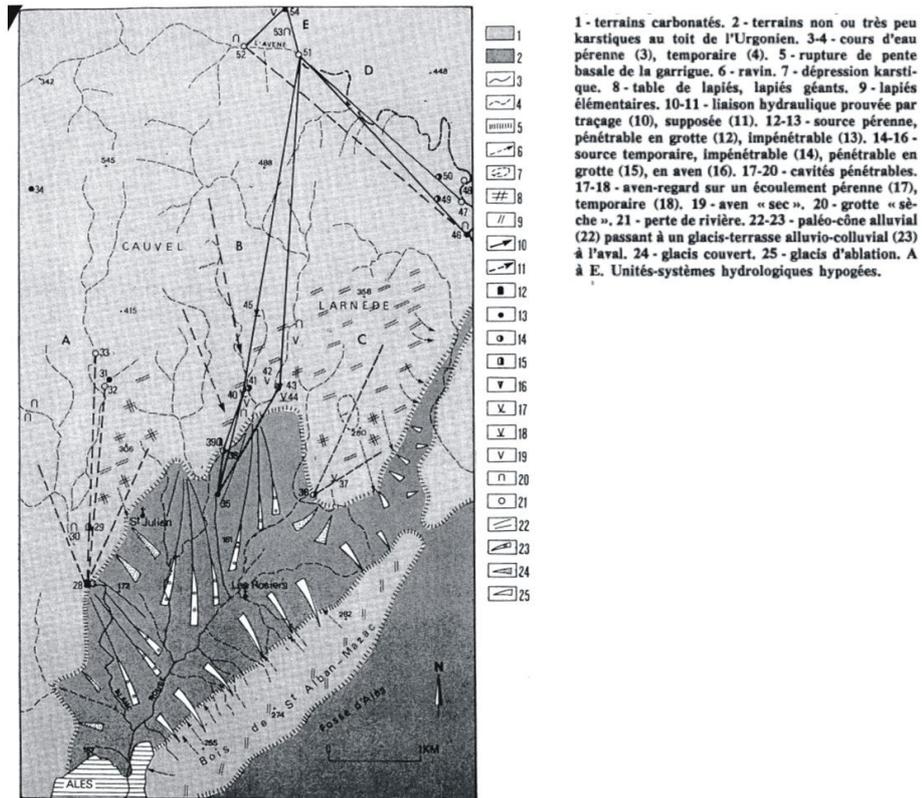


Figure 130 : Secteur oriental du karst de basses Cévennes (d'après Fabre, 1984)

Annexe 4 : Localisation des piézomètres utilisés sur la concession de St-Martin de Valgalgues

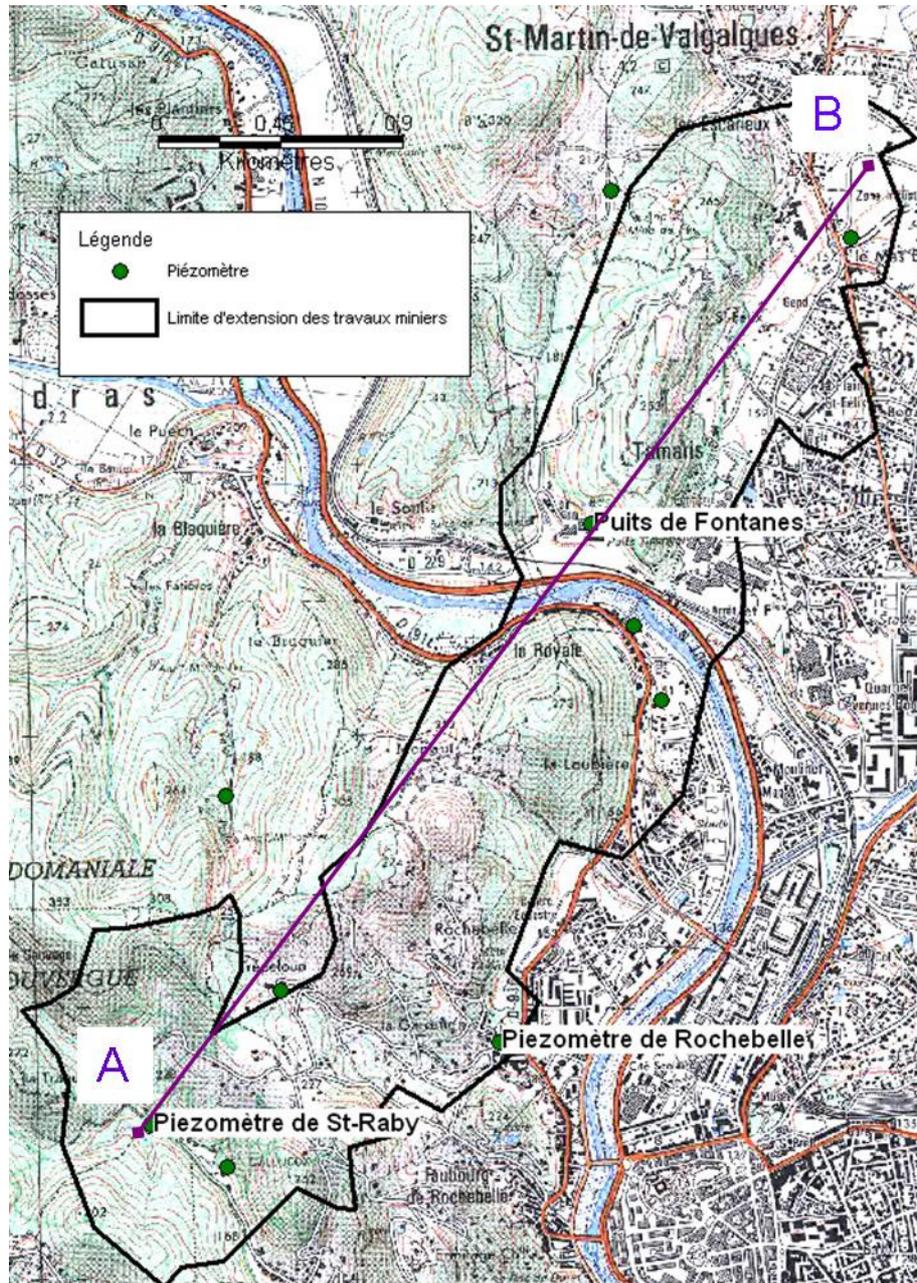
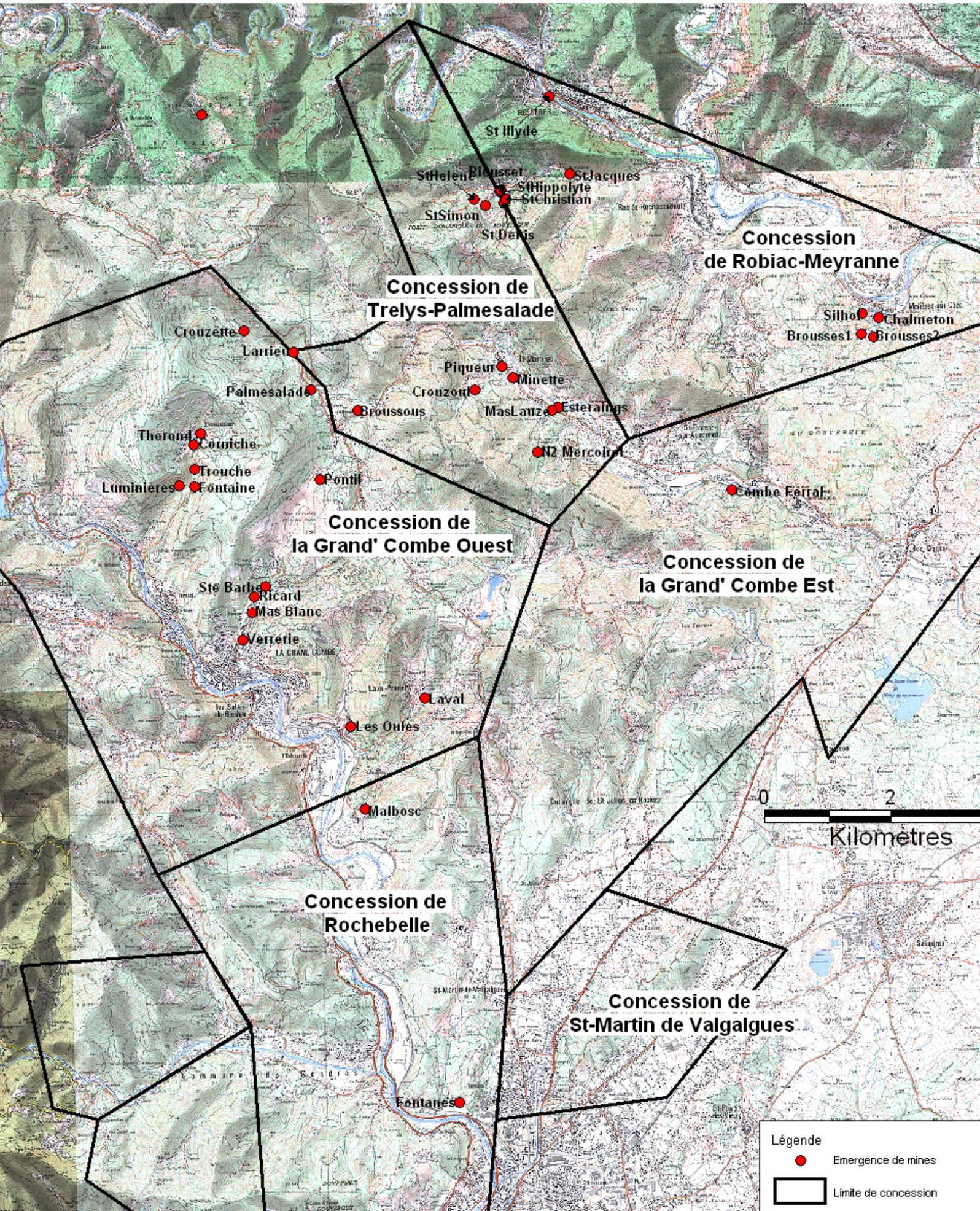
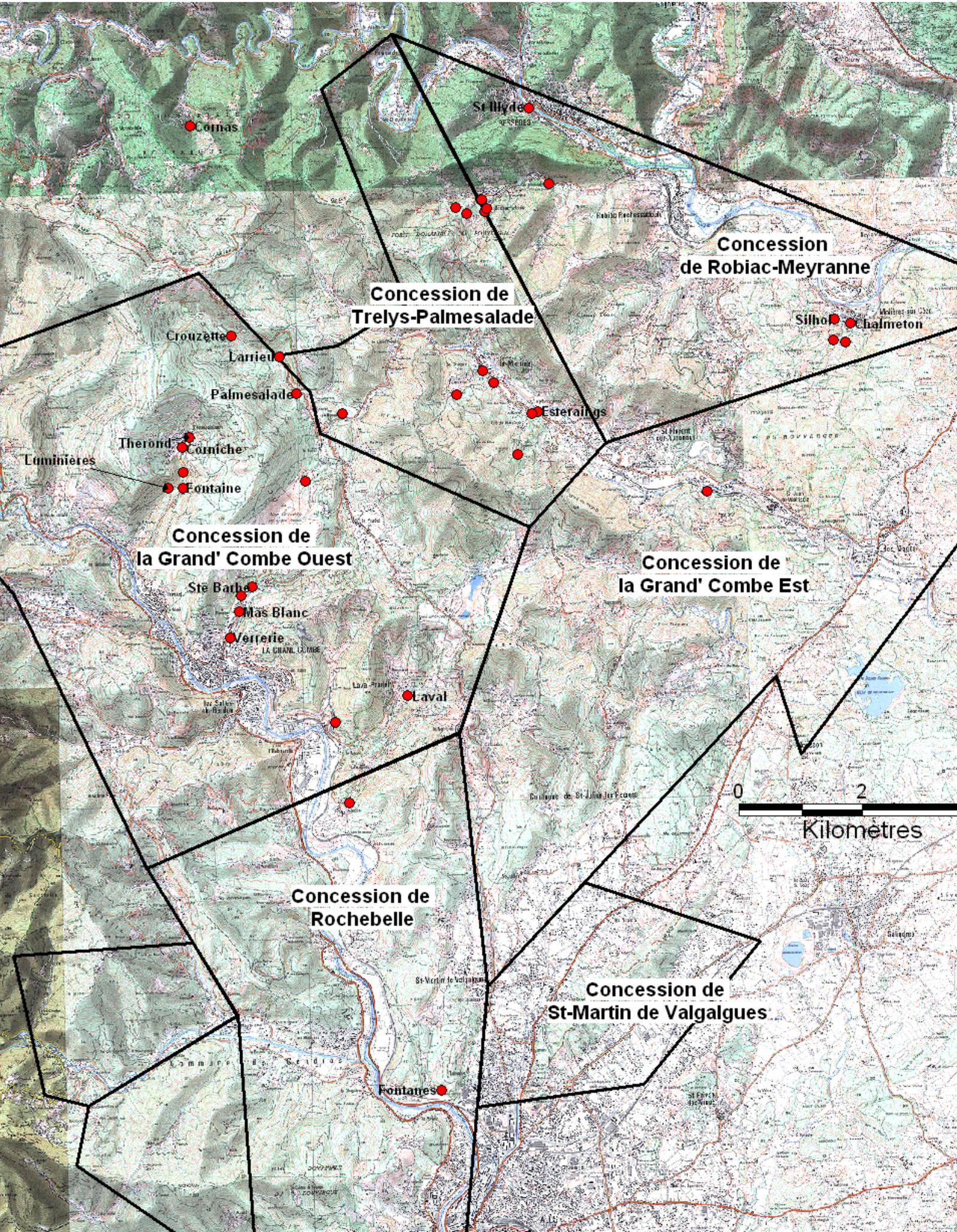
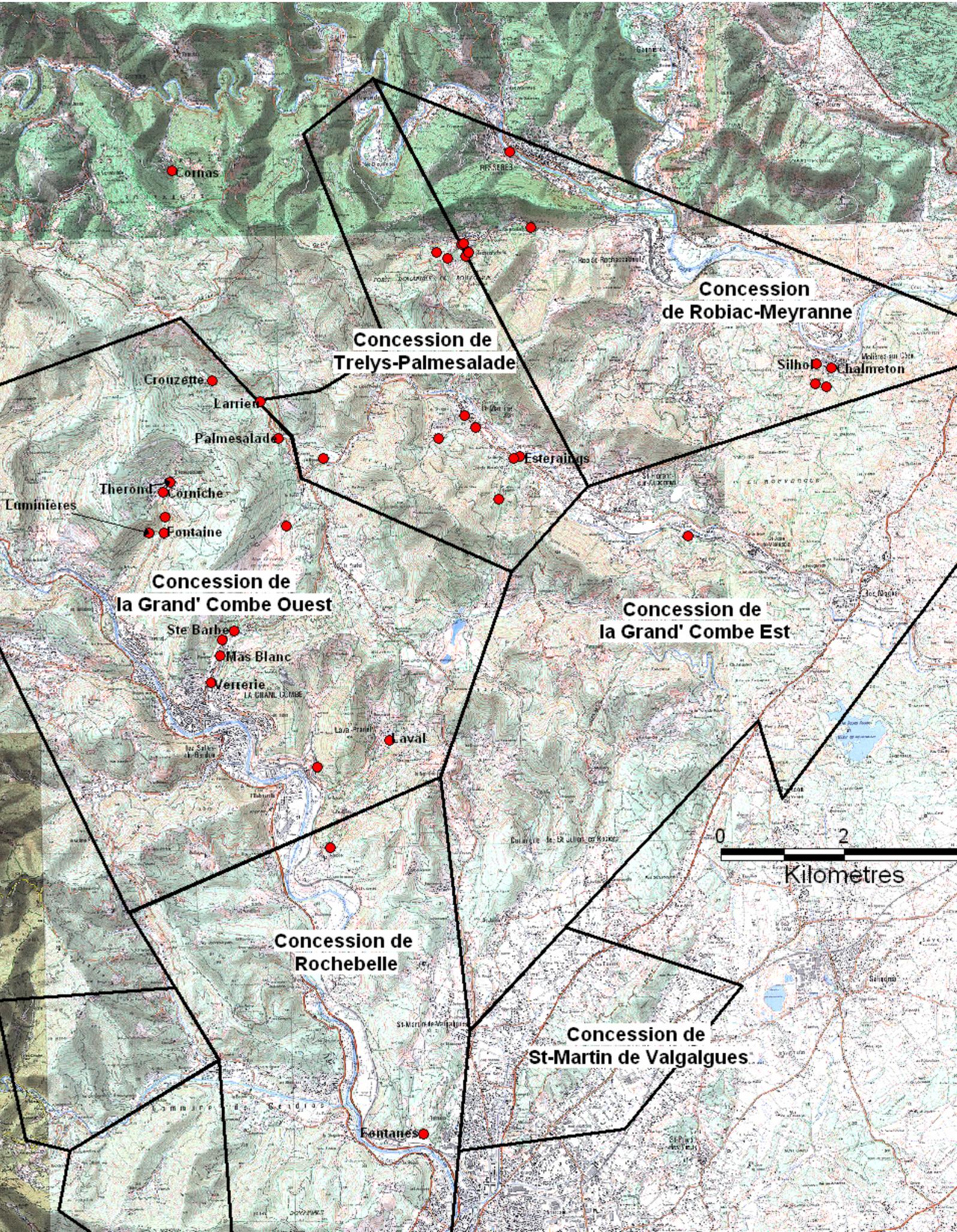


Figure 131 : Localisation des piézomètres de Fontanes, Rochebelle et St-Raby sur la concession de St-Martin de Valgalgues (carte IGN)

5 : Localisation des émergences utilisées pour les analyses de données







Annexe 6: Données d'entrées pour les diagrammes de Piper et Schoeller par émergences.

SampleID	001	
Site	Fontanes	
Location	Ales	
Date	13/08/97	
Aquifer geology	Carbonifère	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	9.310E+02	4.050E+01
K +	6.410E+01	1.639E+00
Mg++	2.300E+02	1.892E+01
Ca++	4.620E+02	2.305E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.110E+02	3.131E+00
SO4--	2.868E+03	5.972E+01
HCO3-	1.035E+03	1.697E+01

SampleID	002	
Site	Fontanes	
Date	08/01/99	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	8.680E+02	3.776E+01
K +	5.430E+01	1.389E+00
Mg++	2.160E+02	1.777E+01
Ca++	3.910E+02	1.951E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.120E+02	3.159E+00
SO4--	2.680E+03	5.580E+01
HCO3-	1.043E+03	1.710E+01

SampleID	003	
Site	Fontanes	
Date	03/02/99	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	8.650E+02	3.763E+01
K +	5.680E+01	1.453E+00
Mg++	2.130E+02	1.752E+01
Ca++	3.770E+02	1.881E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)

Annexe 6

Cl-	1.200E+02	3.385E+00
SO4--	2.667E+03	5.553E+01
HCO3-	1.068E+03	1.750E+01

SampleID 004
Site Fontanes
Date 19/02/99

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	8.470E+02	3.684E+01
K +	5.610E+01	1.435E+00
Mg++	2.100E+02	1.728E+01
Ca++	3.770E+02	1.881E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.200E+02	3.385E+00
SO4--	2.760E+03	5.747E+01
HCO3-	1.049E+03	1.720E+01

SampleID 005
Site Fontanes
Date 11/06/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	7.090E+02	3.084E+01
K +	5.090E+01	1.302E+00
Mg++	2.120E+02	1.744E+01
Ca++	4.360E+02	2.176E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.420E+02	4.005E+00
SO4--	2.560E+03	5.330E+01
HCO3-	9.880E+02	1.619E+01

SampleID 006
Site Fontanes
Date 18/07/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.460E+02	2.375E+01
K +	4.600E+01	1.176E+00
Mg++	2.270E+02	1.868E+01
Ca++	4.830E+02	2.410E+01

Annexe 6

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	7.400E+01	2.087E+00
SO4--	2.440E+03	5.080E+01
HCO3-	8.720E+02	1.429E+01

SampleID 007
 Site Fontanes
 Date 18/09/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	6.130E+02	2.666E+01
K +	4.700E+01	1.202E+00
Mg++	2.000E+02	1.645E+01
Ca++	4.300E+02	2.146E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.100E+01	1.439E+00
SO4--	2.510E+03	5.226E+01
HCO3-	8.590E+02	1.408E+01

SampleID 008
 Site Fontanes
 Date 07/11/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.380E+02	2.340E+01
K +	4.100E+01	1.049E+00
Mg++	1.790E+02	1.473E+01
Ca++	4.100E+02	2.046E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	4.800E+01	1.354E+00
SO4--	2.030E+03	4.227E+01
HCO3-	8.100E+02	1.328E+01

SampleID 009
 Site Fontanes
 Date 11/03/02

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.850E+02	2.545E+01
K +	4.400E+01	1.125E+00
Mg++	1.620E+02	1.333E+01
Ca++	5.470E+02	2.730E+01

Annexe 6

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.500E+01	1.551E+00
SO4--	2.350E+03	4.893E+01
HCO3-	8.490E+02	1.392E+01

SampleID	010
Site	Fontanes
Date	03/06/02

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.860E+02	2.549E+01
K +	4.400E+01	1.125E+00
Mg++	1.820E+02	1.497E+01
Ca++	3.730E+02	1.861E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.700E+01	1.608E+00
SO4--	2.370E+03	4.935E+01
HCO3-	8.370E+02	1.372E+01

SampleID	011
Site	Fontanes
Date	02/12/02

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	7.000E+02	3.045E+01
K +	4.800E+01	1.228E+00
Mg++	2.070E+02	1.703E+01
Ca++	4.180E+02	2.086E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.140E+02	3.216E+00
SO4--	2.390E+03	4.976E+01
HCO3-	9.520E+02	1.560E+01

SampleID	012
Site	Fontanes
Date	03/03/03

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	8.100E+02	3.523E+01
K +	4.880E+01	1.248E+00
Mg++	1.670E+02	1.374E+01

Annexe 6

Ca ⁺⁺	5.450E+02	2.720E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	1.800E+02	5.077E+00
SO ₄ ⁻⁻	2.586E+03	5.384E+01
HCO ₃ ⁻	1.029E+03	1.686E+01

SampleID	013
Site	Fontanes
Date	02/06/03

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	6.320E+02	2.749E+01
K ⁺	4.400E+01	1.125E+00
Mg ⁺⁺	1.400E+02	1.152E+01
Ca ⁺⁺	5.250E+02	2.620E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	9.100E+01	2.567E+00
SO ₄ ⁻⁻	2.499E+03	5.203E+01
HCO ₃ ⁻	8.747E+02	1.434E+01

SampleID	014
Site	Fontanes
Date	08/09/03

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	4.210E+02	1.831E+01
K ⁺	4.100E+01	1.049E+00
Mg ⁺⁺	1.700E+02	1.399E+01
Ca ⁺⁺	7.060E+02	3.523E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	5.000E+01	1.410E+00
SO ₄ ⁻⁻	2.680E+03	5.580E+01
HCO ₃ ⁻	8.418E+02	1.380E+01

SampleID	015
Site	Fontanes
Date	20/09/04

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	6.410E+02	2.788E+01
K ⁺	4.700E+01	1.202E+00

Annexe 6

Mg ⁺⁺	2.050E+02	1.687E+01
Ca ⁺⁺	4.190E+02	2.091E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	1.030E+02	2.905E+00
SO ₄ ⁻⁻	2.490E+03	5.184E+01
HCO ₃ ⁻	8.910E+02	1.460E+01

SampleID	016
Site	Fontanes
Date	07/03/05

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	4.776E+02	2.077E+01
K ⁺	4.110E+01	1.051E+00
Mg ⁺⁺	1.856E+02	1.527E+01
Ca ⁺⁺	3.720E+02	1.856E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	4.800E+01	1.354E+00
SO ₄ ⁻⁻	2.158E+03	4.493E+01
HCO ₃ ⁻	7.850E+02	1.287E+01

SampleID	017
Site	TB Larrieux
Date	20/01/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	2.300E+01	1.000E+00
Mg ⁺⁺	6.400E+01	5.265E+00
Ca ⁺⁺	6.400E+01	3.194E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	8.600E+00	2.426E-01
SO ₄ ⁻⁻	4.460E+02	9.286E+00
HCO ₃ ⁻	1.660E+02	2.721E+00

SampleID	018
Site	TB Larrieux
Date	10/02/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	4.900E+01	2.131E+00
Mg ⁺⁺	6.900E+01	5.677E+00

Annexe 6

Ca ⁺⁺	1.030E+02	5.140E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	1.160E+01	3.272E-01
SO ₄ ⁻⁻	4.310E+02	8.974E+00
HCO ₃ ⁻	2.230E+02	3.655E+00

SampleID	019
Site	TB Larrieux
Date	16/04/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	7.000E+01	3.045E+00
Mg ⁺⁺	6.600E+01	5.430E+00
Ca ⁺⁺	7.600E+01	3.792E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	5.500E+00	1.551E-01
SO ₄ ⁻⁻	3.540E+02	7.371E+00
HCO ₃ ⁻	2.810E+02	4.606E+00

SampleID	020
Site	TB Larrieux
Date	13/05/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	4.800E+01	2.088E+00
Mg ⁺⁺	4.600E+01	3.784E+00
Ca ⁺⁺	6.900E+01	3.443E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	9.500E+00	2.680E-01
SO ₄ ⁻⁻	1.550E+02	3.227E+00
HCO ₃ ⁻	2.280E+02	3.737E+00

SampleID	021
Site	TB Larrieux
Date	04/06/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	5.100E+01	2.218E+00
Mg ⁺⁺	1.050E+02	8.638E+00
Ca ⁺⁺	1.820E+02	9.082E+00

Annexe 6

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.800E+00	1.636E-01
SO4--	6.730E+02	1.401E+01
HCO3-	2.640E+02	4.327E+00

SampleID	022
Site	TB Larrieux
Date	07/07/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.800E+01	2.088E+00
Mg++	1.130E+02	9.297E+00
Ca++	1.520E+02	7.585E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.800E+00	2.764E-01
SO4--	6.810E+02	1.418E+01
HCO3-	2.190E+02	3.590E+00

SampleID	023
Site	TB Larrieux
Date	04/09/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.400E+01	1.914E+00
Mg++	1.180E+02	9.708E+00
Ca++	1.520E+02	7.585E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.800E+00	2.764E-01
SO4--	7.680E+02	1.599E+01
HCO3-	2.080E+02	3.409E+00

SampleID	024
Site	TB Larrieux
Date	08/12/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.000E+01	1.740E+00
Mg++	1.030E+02	8.474E+00
Ca++	1.450E+02	7.236E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.800E+00	2.764E-01

Annexe 6

SO4--	6.970E+02	1.451E+01
HCO3-	2.180E+02	3.573E+00

SampleID	025	
Site	TB Larrieux	
Date	21/04/98	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.000E+01	1.305E+00
Mg++	1.040E+02	8.556E+00
Ca++	1.190E+02	5.938E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.300E+00	1.495E-01
SO4--	5.770E+02	1.201E+01
HCO3-	2.350E+02	3.852E+00

SampleID	026	
Site	Crouzette	
Date	20/01/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.600E+01	6.960E-01
Mg++	8.500E+01	6.993E+00
Ca++	2.290E+02	1.143E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	7.700E+00	2.172E-01
SO4--	6.690E+02	1.393E+01
HCO3-	2.190E+02	3.590E+00

SampleID	027	
Site	Crouzette	
Date	04/09/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.000E+01	8.699E-01
Mg++	1.120E+02	9.214E+00
Ca++	2.120E+02	1.058E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.200E+00	1.467E-01
SO4--	8.600E+02	1.791E+01
HCO3-	2.570E+02	4.213E+00

SampleID	028	
Site	Crouzette	
Date	21/04/98	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.900E+01	1.261E+00
Mg++	1.240E+02	1.020E+01
Ca++	1.610E+02	8.034E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.300E+00	1.495E-01
SO4--	6.930E+02	1.443E+01
HCO3-	2.320E+02	3.803E+00

SampleID	029	
Site	Palmesalade	
Date	20/01/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.000E+00	1.305E-01
Mg++	1.000E+01	8.227E-01
Ca++	5.000E+00	2.495E-01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	2.800E+00	7.898E-02
SO4--	6.700E+01	1.395E+00
HCO3-	1.000E+01	1.639E-01

SampleID	030	
Site	Palmesalade	
Date	10/02/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.000E+00	1.305E-01
Mg++	1.000E+01	8.227E-01
Ca++	1.900E+01	9.481E-01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.900E+00	1.664E-01
SO4--	7.300E+01	1.520E+00
HCO3-	2.200E+01	3.606E-01

SampleID	031	
Site	Palmesalade	
Date	10/03/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.000E+00	1.740E-01
Mg++	1.200E+01	9.872E-01
Ca++	1.200E+01	5.988E-01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.800E+00	1.636E-01
SO4--	7.600E+01	1.582E+00
HCO3-	1.000E+01	1.639E-01

SampleID	032	
Site	Palmesalade	
Date	16/04/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.000E+00	1.740E-01
Mg++	1.100E+01	9.050E-01
Ca++	2.000E+01	9.980E-01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.800E+00	1.636E-01
SO4--	5.800E+01	1.208E+00
HCO3-	2.900E+01	4.753E-01

SampleID	033	
Site	Palmesalade	
Date	13/05/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.000E+00	1.740E-01
Mg++	1.100E+01	9.050E-01
Ca++	1.800E+01	8.982E-01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.600E+00	1.015E-01
SO4--	4.800E+01	9.994E-01
HCO3-	6.000E+01	9.835E-01

SampleID	034	
----------	-----	--

Annexe 6

Site	Palmesalade	
Date	04/06/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.000E+00	1.740E-01
Mg++	1.000E+01	8.227E-01
Ca++	1.500E+01	7.485E-01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.500E+00	1.551E-01
SO4--	4.400E+01	9.161E-01
HCO3-	5.300E+01	8.687E-01

SampleID	035	
Site	Palmesalade	
Date	07/07/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.000E+00	1.740E-01
Mg++	1.000E+01	8.227E-01
Ca++	1.100E+01	5.489E-01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.100E+00	8.744E-02
SO4--	4.100E+01	8.537E-01
HCO3-	5.500E+01	9.015E-01

SampleID	036	
Site	Palmesalade	
Date	04/09/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.000E+00	1.740E-01
Mg++	9.000E+00	7.404E-01
Ca++	1.100E+01	5.489E-01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	6.800E+00	1.918E-01
SO4--	4.900E+01	1.020E+00
HCO3-	3.700E+01	6.065E-01

SampleID	037	
Site	Palmesalade	
Date	08/12/97	

Annexe 6

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.000E+00	1.740E-01
Mg++	1.200E+01	9.872E-01
Ca++	1.200E+01	5.988E-01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.300E+00	9.308E-02
SO4--	1.100E+02	2.290E+00
HCO3-	9.000E+00	1.475E-01

SampleID	038
Site	Palmesalade
Date	25/06/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.000E+00	1.305E-01
Mg++	9.000E+00	7.404E-01
Ca++	5.000E+00	2.495E-01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.000E+00	8.462E-02
SO4--	5.000E+01	1.041E+00
HCO3-	1.200E+01	1.967E-01

SampleID	039
Site	Luminières
Date	20/01/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.500E+01	1.957E+00
Mg++	4.800E+01	3.949E+00
Ca++	4.900E+01	2.445E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.300E+00	9.308E-02
SO4--	3.740E+02	7.787E+00
HCO3-	1.470E+02	2.410E+00

SampleID	040
Site	Luminières
Date	10/02/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
---------	--------	---------

Annexe 6

Na+	5.400E+01	2.349E+00
Mg++	6.400E+01	5.265E+00
Ca++	9.300E+01	4.641E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	7.400E+00	2.087E-01
SO4--	4.370E+02	9.099E+00
HCO3-	2.120E+02	3.475E+00

SampleID	041
Site	Luminières
Date	10/03/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	6.300E+01	2.740E+00
Mg++	9.100E+01	7.487E+00
Ca++	8.700E+01	4.341E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	4.000E+00	1.128E-01
SO4--	5.410E+02	1.126E+01
HCO3-	2.670E+02	4.376E+00

SampleID	042
Site	Luminières
Date	16/04/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	6.300E+01	2.740E+00
Mg++	9.200E+01	7.569E+00
Ca++	1.110E+02	5.539E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	4.000E+00	1.128E-01
SO4--	5.370E+02	1.118E+01
HCO3-	3.040E+02	4.983E+00

SampleID	043
Site	Luminières
Date	13/05/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	7.400E+01	3.219E+00
Mg++	1.050E+02	8.638E+00

Annexe 6

Ca ⁺⁺	1.420E+02	7.086E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	4.200E+00	1.185E-01
SO ₄ ⁻⁻	5.700E+02	1.187E+01
HCO ₃ ⁻	3.390E+02	5.557E+00

SampleID	044
Site	Luminières
Date	04/06/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	6.900E+01	3.001E+00
Mg ⁺⁺	1.840E+02	1.514E+01
Ca ⁺⁺	1.900E+02	9.481E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	3.400E+00	9.590E-02
SO ₄ ⁻⁻	6.650E+02	1.385E+01
HCO ₃ ⁻	3.840E+02	6.294E+00

SampleID	045
Site	Luminières
Date	07/07/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	8.100E+01	3.523E+00
Mg ⁺⁺	5.900E+01	4.854E+00
Ca ⁺⁺	7.500E+01	3.743E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	1.100E+01	3.103E-01
SO ₄ ⁻⁻	3.760E+02	7.829E+00
HCO ₃ ⁻	2.740E+02	4.491E+00

SampleID	046
Site	Luminières
Date	04/09/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	8.600E+01	3.741E+00
Mg ⁺⁺	6.400E+01	5.265E+00
Ca ⁺⁺	8.300E+01	4.142E+00

Annexe 6

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.600E+00	2.426E-01
SO4--	3.430E+02	7.142E+00
HCO3-	3.020E+02	4.950E+00

SampleID	047
Site	Luminières
Date	08/12/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.000E+01	2.175E+00
Mg++	6.300E+01	5.183E+00
Ca++	1.080E+02	5.389E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	2.500E+00	7.052E-02
SO4--	5.970E+02	1.243E+01
HCO3-	2.170E+02	3.557E+00

SampleID	048
Site	Luminières
Date	21/04/98

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.500E+01	1.522E+00
Mg++	6.400E+01	5.265E+00
Ca++	8.600E+01	4.291E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.600E+00	1.015E-01
SO4--	4.260E+02	8.870E+00
HCO3-	1.930E+02	3.164E+00

SampleID	049
Site	La Fontaine
Date	20/01/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.500E+01	6.525E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	3.800E+01	3.126E+00
Ca++	8.000E+01	3.992E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
--------	--------	---------

Annexe 6

Cl-	6.500E+00	1.833E-01
SO4--	4.060E+02	8.453E+00
HCO3-	2.100E+01	3.442E-01

SampleID 050
Site La Fontaine
Date 10/02/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.900E+01	8.264E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.700E+01	3.867E+00
Ca++	7.600E+01	3.792E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.200E+00	2.313E-01
SO4--	4.450E+02	9.265E+00
HCO3-	4.500E+01	7.376E-01

SampleID 051
Site La Fontaine
Date 10/03/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.900E+01	8.264E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	5.800E+01	4.772E+00
Ca++	1.040E+02	5.190E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	7.900E+00	2.228E-01
SO4--	4.620E+02	9.619E+00
HCO3-	3.700E+01	6.065E-01

SampleID 052
Site La Fontaine
Date 16/04/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.600E+01	1.131E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.700E+01	3.867E+00
Ca++	6.700E+01	3.343E+00

Annexe 6

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.700E+00	2.736E-01
SO4--	3.630E+02	7.558E+00
HCO3-	8.100E+01	1.328E+00

SampleID	053
Site	La Fontaine
Date	13/05/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.100E+01	9.134E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.500E+01	3.702E+00
Ca++	5.100E+01	2.545E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.200E+01	3.385E-01
SO4--	3.100E+02	6.455E+00
HCO3-	5.100E+01	8.360E-01

SampleID	054
Site	La Fontaine
Date	04/06/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.100E+01	9.134E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.500E+01	3.702E+00
Ca++	5.100E+01	2.545E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.200E+01	3.385E-01
SO4--	3.100E+02	6.455E+00
HCO3-	5.100E+01	8.360E-01

SampleID	055
Site	La Fontaine
Date	07/07/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.400E+01	1.044E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	6.200E+01	5.101E+00
Ca++	8.700E+01	4.341E+00

Annexe 6

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.300E+00	2.623E-01
SO4--	3.710E+02	7.725E+00
HCO3-	6.200E+01	1.016E+00

SampleID	056
Site	La Fontaine
Date	04/09/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.500E+01	6.525E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	3.700E+01	3.044E+00
Ca++	8.600E+01	4.291E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.500E+00	2.398E-01
SO4--	3.580E+02	7.454E+00
HCO3-	9.000E+01	1.475E+00

SampleID	057
Site	La Fontaine
Date	08/12/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.100E+01	4.785E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.500E+01	3.702E+00
Ca++	8.000E+01	3.992E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	2.700E+00	7.616E-02
SO4--	6.900E+02	1.437E+01
HCO3-	2.600E+01	4.262E-01

SampleID	058
Site	La Fontaine
Date	21/04/98

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.400E+01	6.090E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.600E+01	3.784E+00

Annexe 6

Ca ⁺⁺	5.800E+01	2.894E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	7.000E+00	1.974E-01
SO ₄ ⁻⁻	3.190E+02	6.642E+00
HCO ₃ ⁻	8.100E+01	1.328E+00

SampleID 059
Site Therond
Date 20/01/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	3.200E+01	1.392E+00
K ⁺	0.000E+00	0.000E+00
Mg ⁺⁺	3.600E+01	2.962E+00
Ca ⁺⁺	8.600E+01	4.291E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	3.700E+00	1.044E-01
SO ₄ ⁻⁻	2.300E+02	4.789E+00
HCO ₃ ⁻	2.520E+02	4.131E+00

SampleID 060
Site Therond
Date 10/02/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	4.400E+01	1.914E+00
K ⁺	0.000E+00	0.000E+00
Mg ⁺⁺	6.100E+01	5.019E+00
Ca ⁺⁺	9.000E+01	4.491E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	4.500E+00	1.269E-01
SO ₄ ⁻⁻	2.650E+02	5.518E+00
HCO ₃ ⁻	2.750E+02	4.508E+00

SampleID 061
Site Therond
Date 10/03/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	2.400E+01	1.044E+00
K ⁺	0.000E+00	0.000E+00

Annexe 6

Mg ⁺⁺	4.500E+01	3.702E+00
Ca ⁺⁺	8.100E+01	4.042E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	4.000E+00	1.128E-01
SO ₄ ⁻⁻	1.870E+02	3.894E+00
HCO ₃ ⁻	2.530E+02	4.147E+00

SampleID	062
Site	Thérond
Date	16/04/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	3.100E+01	1.348E+00
K ⁺	0.000E+00	0.000E+00
Mg ⁺⁺	4.800E+01	3.949E+00
Ca ⁺⁺	1.090E+02	5.439E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	4.000E+00	1.128E-01
SO ₄ ⁻⁻	1.910E+02	3.977E+00
HCO ₃ ⁻	3.010E+02	4.934E+00

SampleID	063
Site	Thérond
Date	13/05/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	3.000E+01	1.305E+00
K ⁺	0.000E+00	0.000E+00
Mg ⁺⁺	4.800E+01	3.949E+00
Ca ⁺⁺	1.040E+02	5.190E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	5.100E+00	1.439E-01
SO ₄ ⁻⁻	1.890E+02	3.935E+00
HCO ₃ ⁻	2.860E+02	4.688E+00

SampleID	064
Site	Thérond
Date	04/06/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	2.900E+01	1.261E+00

Annexe 6

K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.600E+01	3.784E+00
Ca++	9.300E+01	4.641E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.900E+00	1.664E-01
SO4--	2.950E+02	6.142E+00
HCO3-	3.030E+02	4.967E+00

SampleID	065
Site	Thérond
Date	07/07/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.000E+01	1.305E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	5.400E+01	4.443E+00
Ca++	1.010E+02	5.040E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.000E+00	2.257E-01
SO4--	1.720E+02	3.581E+00
HCO3-	3.020E+02	4.950E+00

SampleID	066
Site	Thérond
Date	04/09/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.600E+01	1.131E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.200E+01	3.455E+00
Ca++	8.300E+01	4.142E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.400E+00	9.590E-02
SO4--	2.460E+02	5.122E+00
HCO3-	2.780E+02	4.557E+00

SampleID	067
Site	Thérond
Date	08/12/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
---------	--------	---------

Annexe 6

Na+	3.600E+01	1.566E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.800E+01	3.949E+00
Ca++	9.500E+01	4.741E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.200E+00	9.026E-02
SO4--	2.000E+02	4.164E+00
HCO3-	2.770E+02	4.540E+00

SampleID	068
Site	Thérond
Date	13/05/98

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.800E+01	1.218E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.600E+01	3.784E+00
Ca++	7.600E+01	3.792E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.600E+00	1.015E-01
SO4--	2.480E+02	5.164E+00
HCO3-	2.590E+02	4.245E+00

SampleID	069
Site	Corniche
Date	20/01/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	7.000E+00	3.045E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	3.900E+01	3.209E+00
Ca++	7.200E+01	3.593E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	5.700E+00	1.608E-01
SO4--	2.900E+02	6.038E+00
HCO3-	8.400E+01	1.377E+00

SampleID	070
Site	Corniche
Date	10/02/97

Annexe 6

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	9.000E+00	3.915E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	5.100E+01	4.196E+00
Ca++	8.700E+01	4.341E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	7.500E+00	2.115E-01
SO4--	3.470E+02	7.225E+00
HCO3-	1.450E+02	2.377E+00

SampleID 071
Site Corniche
Date 10/03/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.200E+01	5.220E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	7.500E+01	6.170E+00
Ca++	9.400E+01	4.691E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	6.100E+00	1.721E-01
SO4--	4.170E+02	8.682E+00
HCO3-	1.990E+02	3.262E+00

SampleID 072
Site Corniche
Date 16/04/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.400E+01	6.090E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	6.500E+01	5.348E+00
Ca++	1.690E+02	8.433E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	6.800E+00	1.918E-01
SO4--	3.950E+02	8.224E+00
HCO3-	2.500E+02	4.098E+00

SampleID 073
Site Corniche
Date 04/06/97

Annexe 6

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	8.000E+00	3.480E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	3.900E+01	3.209E+00
Ca++	7.700E+01	3.842E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.400E+00	9.590E-02
SO4--	3.070E+02	6.392E+00
HCO3-	1.250E+02	2.049E+00

SampleID	074
Site	Corniche
Date	07/07/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	8.000E+00	3.480E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.100E+01	3.373E+00
Ca++	5.300E+01	2.645E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	2.500E+00	7.052E-02
SO4--	2.480E+02	5.164E+00
HCO3-	7.800E+01	1.279E+00

SampleID	075
Site	Corniche
Date	04/09/97

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	7.000E+00	3.045E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.000E+01	3.291E+00
Ca++	5.400E+01	2.695E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.200E+00	2.313E-01
SO4--	2.680E+02	5.580E+00
HCO3-	9.200E+01	1.508E+00

SampleID	076
Site	Corniche

Annexe 6

Date	08/12/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	7.000E+00	3.045E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	5.100E+01	4.196E+00
Ca++	1.250E+02	6.238E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.000E+00	8.462E-02
SO4--	6.230E+02	1.297E+01
HCO3-	1.100E+02	1.803E+00

SampleID	077	
Site	Corniche	
Date	13/05/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	6.000E+00	2.610E-01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.600E+01	3.784E+00
Ca++	6.600E+01	3.293E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.400E+00	9.590E-02
SO4--	2.970E+02	6.184E+00
HCO3-	1.110E+02	1.819E+00

SampleID	078	
Site	Laval	
Date	20/01/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.840E+02	2.105E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.100E+02	9.050E+00
Ca++	4.810E+02	2.400E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.250E+01	3.526E-01
SO4--	2.261E+03	4.708E+01
HCO3-	6.240E+02	1.023E+01

SampleID	079	
----------	-----	--

Annexe 6

Site	Laval	
Date	10/02/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	6.040E+02	2.627E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.200E+02	9.872E+00
Ca++	3.800E+02	1.896E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.260E+01	3.554E-01
SO4--	2.370E+03	4.935E+01
HCO3-	6.490E+02	1.064E+01

SampleID	080	
Site	Laval	
Date	10/03/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.340E+02	2.323E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.540E+02	1.267E+01
Ca++	4.180E+02	2.086E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.450E+01	4.090E-01
SO4--	2.370E+03	4.935E+01
HCO3-	5.320E+02	8.720E+00

SampleID	081	
Site	Laval	
Date	16/04/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.350E+02	2.327E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	9.900E+01	8.145E+00
Ca++	3.600E+02	1.796E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.600E+00	2.708E-01
SO4--	1.929E+03	4.016E+01
HCO3-	5.760E+02	9.441E+00

Annexe 6

SampleID	082	
Site	Laval	
Date	13/05/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.650E+02	2.023E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.110E+02	9.132E+00
Ca++	4.950E+02	2.470E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.200E+00	2.595E-01
SO4--	2.204E+03	4.589E+01
HCO3-	5.290E+02	8.671E+00

SampleID	083	
Site	Laval	
Date	04/06/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.880E+02	1.688E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.040E+02	8.556E+00
Ca++	3.370E+02	1.682E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.000E+01	2.821E-01
SO4--	2.047E+03	4.262E+01
HCO3-	5.300E+02	8.687E+00

SampleID	084	
Site	Laval	
Date	07/07/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.460E+02	1.940E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.140E+02	9.379E+00
Ca++	4.970E+02	2.480E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.370E+01	3.864E-01
SO4--	1.707E+03	3.554E+01
HCO3-	5.010E+02	8.212E+00

Annexe 6

SampleID	085	
Site	Laval	
Date	04/09/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.030E+02	1.753E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.020E+02	8.392E+00
Ca++	4.930E+02	2.460E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.400E+00	2.369E-01
SO4--	2.071E+03	4.312E+01
HCO3-	5.010E+02	8.212E+00

SampleID	086	
Site	Laval	
Date	08/12/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.030E+02	2.188E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.100E+02	9.050E+00
Ca++	9.950E+02	4.965E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.500E+01	4.231E-01
SO4--	2.276E+03	4.739E+01
HCO3-	5.910E+02	9.687E+00

SampleID	087	
Site	Laval	
Date	21/04/98	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.390E+02	1.475E+01
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	1.080E+02	8.885E+00
Ca++	4.340E+02	2.166E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.200E+00	2.313E-01
SO4--	2.029E+03	4.225E+01
HCO3-	4.900E+02	8.032E+00

SampleID	088	
Site	Ste Barbe	
Date	20/01/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.200E+02	5.220E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	5.000E+01	4.114E+00
Ca++	8.600E+01	4.291E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.400E+01	3.949E-01
SO4--	3.910E+02	8.141E+00
HCO3-	3.370E+02	5.524E+00

SampleID	089	
Site	Ste Barbe	
Date	10/02/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.650E+02	7.177E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.700E+01	3.867E+00
Ca++	1.060E+02	5.289E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.380E+01	3.892E-01
SO4--	3.720E+02	7.745E+00
HCO3-	4.990E+02	8.179E+00

SampleID	090	
Site	Ste Barbe	
Date	10/03/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.750E+02	7.612E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	5.800E+01	4.772E+00
Ca++	5.800E+01	2.894E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.200E+01	3.385E-01
SO4--	3.510E+02	7.308E+00
HCO3-	5.410E+02	8.868E+00

SampleID	091	
Site	Ste Barbe	
Date	16/04/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.070E+02	9.004E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.600E+01	3.784E+00
Ca++	1.240E+02	6.188E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	2.460E+01	6.939E-01
SO4--	3.420E+02	7.121E+00
HCO3-	6.160E+02	1.010E+01

SampleID	092	
Site	Ste Barbe	
Date	13/05/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.030E+02	8.830E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	5.500E+01	4.525E+00
Ca++	7.000E+01	3.493E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	2.500E+01	7.052E-01
SO4--	3.710E+02	7.725E+00
HCO3-	5.780E+02	9.474E+00

SampleID	093	
Site	Ste Barbe	
Date	04/06/97	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.740E+02	7.569E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.700E+01	3.867E+00
Ca++	1.370E+02	6.836E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	2.400E+01	6.770E-01
SO4--	4.510E+02	9.390E+00

Annexe 6

HCO3- 6.240E+02 1.023E+01

SampleID 094
 Site Ste Barbe
 Date 07/07/97

Cations (mg/l) (meq/l)
 Na+ 1.730E+02 7.525E+00
 K + 0.000E+00 0.000E+00
 Mg++ 5.500E+01 4.525E+00
 Ca++ 9.700E+01 4.840E+00

Anions (mg/l) (meq/l)
 Cl- 2.020E+01 5.698E-01
 SO4-- 4.510E+02 9.390E+00
 HCO3- 4.770E+02 7.819E+00

SampleID 095
 Site Ste Barbe
 Date 04/09/97

Cations (mg/l) (meq/l)
 Na+ 1.210E+02 5.263E+00
 K + 0.000E+00 0.000E+00
 Mg++ 4.800E+01 3.949E+00
 Ca++ 9.200E+01 4.591E+00

Anions (mg/l) (meq/l)
 Cl- 1.470E+01 4.146E-01
 SO4-- 7.600E+02 1.582E+01
 HCO3- 3.360E+02 5.507E+00

SampleID 096
 Site Ste Barbe
 Date 08/12/97

Cations (mg/l) (meq/l)
 Na+ 1.270E+02 5.524E+00
 K + 0.000E+00 0.000E+00
 Mg++ 5.400E+01 4.443E+00
 Ca++ 1.240E+02 6.188E+00

Anions (mg/l) (meq/l)
 Cl- 8.300E+00 2.341E-01

Annexe 6

SO4--	5.770E+02	1.201E+01
HCO3-	4.510E+02	7.392E+00

SampleID	097	
Site	Ste Barbe	
Date	23/07/98	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	9.200E+01	4.002E+00
K +	0.000E+00	0.000E+00
Mg++	4.400E+01	3.620E+00
Ca++	6.900E+01	3.443E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.050E+01	2.962E-01
SO4--	3.460E+02	7.204E+00
HCO3-	3.450E+02	5.655E+00

SampleID	098	
Site	Mas Blanc	
Date	23/07/98	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.710E+02	7.438E+00
K +	1.550E+01	3.964E-01
Mg++	1.687E+02	1.388E+01
Ca++	2.540E+02	1.267E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	7.140E+01	2.014E+00
SO4--	1.155E+03	2.405E+01
HCO3-	6.759E+02	1.108E+01

SampleID	099	
Site	Silhol	
Date	19/02/99	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.340E+03	5.829E+01
K +	2.900E+01	7.417E-01
Mg++	1.860E+02	1.530E+01
Ca++	3.000E+02	1.497E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)

Annexe 6

Cl-	4.590E+02	1.295E+01
SO4--	2.710E+03	5.643E+01
HCO3-	1.049E+03	1.720E+01

SampleID 100
Site Silhol
Date 30/01/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.410E+03	6.133E+01
K +	2.860E+01	7.315E-01
Mg++	1.680E+02	1.382E+01
Ca++	2.300E+02	1.148E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	4.460E+02	1.258E+01
SO4--	2.800E+03	5.830E+01
HCO3-	1.003E+03	1.644E+01

SampleID 101
Site Silhol
Date 11/07/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.590E+02	2.431E+01
K +	2.700E+01	6.905E-01
Mg++	1.570E+02	1.292E+01
Ca++	9.390E+01	4.686E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	3.440E+02	9.703E+00
SO4--	3.020E+03	6.288E+01
HCO3-	1.007E+03	1.651E+01

SampleID 102
Site Chalmeton
Date 30/01/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.790E+01	2.518E+00
K +	7.780E+00	1.990E-01
Mg++	7.200E+01	5.923E+00
Ca++	2.050E+02	1.023E+01

Annexe 6

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.320E+01	3.723E-01
SO4--	6.300E+02	1.312E+01
HCO3-	2.916E+02	4.780E+00

SampleID	103
Site	Chalmeton
Date	11/07/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	5.170E+01	2.249E+00
K +	8.450E+00	2.161E-01
Mg++	7.010E+01	5.767E+00
Ca++	2.400E+02	1.198E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.000E+00	2.539E-01
SO4--	8.350E+02	1.739E+01
HCO3-	3.952E+02	6.478E+00

SampleID	104
Site	Les Esteraings
Date	19/02/99

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.560E+02	6.786E+00
K +	1.050E+01	2.685E-01
Mg++	8.200E+01	6.746E+00
Ca++	1.570E+02	7.834E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.020E+01	2.877E-01
SO4--	4.050E+02	8.433E+00
HCO3-	7.784E+02	1.276E+01

SampleID	105
Site	Les Esteraings
Date	30/01/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.510E+02	6.568E+00
K +	1.080E+01	2.762E-01
Mg++	8.730E+01	7.182E+00
Ca++	1.350E+02	6.737E+00

Annexe 6

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.000E+01	2.821E-01
SO4--	3.700E+02	7.704E+00
HCO3-	6.478E+02	1.062E+01

SampleID	106
Site	Les Esteraings
Date	11/07/01

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.520E+02	6.612E+00
K +	1.060E+01	2.711E-01
Mg++	8.210E+01	6.754E+00
Ca++	1.490E+02	7.435E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.000E+01	2.821E-01
SO4--	4.400E+02	9.161E+00
HCO3-	7.393E+02	1.212E+01

Annexe 7 : Données d'entrées pour les diagrammes de Piper et Schoeller pour les moyennes par émergences.

Database: C:\Program Files\AquaChem\EMERGENCES-MOYENNES.HC3

SampleID	01	
Site	Fontanes	
Location	Ales	
Date	01/01/95	
Aquifer geology	Carbonifère	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	7.955E+02	3.460E+01
K +	5.770E+01	1.476E+00
Mg++	2.294E+02	1.887E+01
Ca++	4.462E+02	2.227E+01
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	9.864E+01	2.782E+00
SO4--	2.804E+03	5.838E+01
HCO3-	9.720E+02	1.593E+01

SampleID	02	
Site	TB Larrieux	
Date	17/03/1626	
Aquifer geology	Carbonifère	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.640E+01	2.018E+00
Mg++	8.610E+01	7.084E+00
Ca++	1.068E+02	5.329E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.410E+00	2.372E-01
SO4--	5.206E+02	1.084E+01
HCO3-	2.290E+02	3.754E+00

SampleID	03	
Site	Crouzette	
Date	17/03/1626	
Aquifer geology	Carbonifère	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	2.167E+01	9.426E-01
Mg++	1.070E+02	8.803E+00
Ca++	2.007E+02	1.001E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	6.070E+00	1.712E-01
SO4--	7.407E+02	1.542E+01
HCO3-	2.360E+02	3.868E+00

SampleID 04
 Site **Palmesalade**
 Date 17/03/1626
 Aquifer geology Carbonifère

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	3.700E+00	1.609E-01
Mg++	1.040E+01	8.556E-01
Ca++	1.280E+01	6.387E-01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	4.560E+00	1.286E-01
SO4--	6.160E+01	1.283E+00
HCO3-	2.970E+01	4.868E-01

SampleID 05
 Site **La Fontaine**
 Date 17/03/1626
 Aquifer geology Carbonifère

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.890E+01	8.221E-01
Mg++	4.780E+01	3.933E+00
Ca++	7.810E+01	3.897E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	8.360E+00	2.358E-01
SO4--	4.160E+02	8.662E+00
HCO3-	5.190E+01	8.507E-01

SampleID 06
 Site **Luminières**
 Date 17/03/1626
 Aquifer geology Carbonifère

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	6.200E+01	2.697E+00
Mg++	8.340E+01	6.861E+00

Annexe 7

Ca ⁺⁺	1.024E+02	5.110E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	5.200E+00	1.467E-01
SO ₄ ⁻⁻	4.866E+02	1.013E+01
HCO ₃ ⁻	2.639E+02	4.326E+00

SampleID	07	
Site	Therond	
Date	17/03/1626	
Aquifer geology	Carbonifère	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	3.100E+01	1.348E+00
Mg ⁺⁺	4.740E+01	3.900E+00
Ca ⁺⁺	9.180E+01	4.581E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	4.540E+00	1.281E-01
SO ₄ ⁻⁻	2.223E+02	4.629E+00
HCO ₃ ⁻	2.786E+02	4.567E+00

SampleID	08	
Site	Corniche	
Date	17/03/1626	
Aquifer geology	Carbonifère	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	8.670E+00	3.771E-01
Mg ⁺⁺	4.967E+01	4.086E+00
Ca ⁺⁺	8.856E+01	4.419E+00
Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	5.180E+00	1.461E-01
SO ₄ ⁻⁻	3.547E+02	7.385E+00
HCO ₃ ⁻	1.327E+02	2.175E+00

SampleID	09	
Site	Silhol	
Date	17/03/1626	
Aquifer geology	Carbonifère	
Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	1.263E+03	5.493E+01

Annexe 7

K +	2.883E+01	7.373E-01
Mg ⁺⁺	1.703E+02	1.401E+01
Ca ⁺⁺	2.080E+02	1.038E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	4.078E+02	1.150E+01
SO ₄ ⁻⁻	1.954E+03	4.068E+01
HCO ₃ ⁻	7.311E+02	1.198E+01

SampleID	10
Site	Chalmeton
Date	17/03/1626
Aquifer geology	Carbonifère

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	5.480E+01	2.384E+00
K +	8.120E+00	2.077E-01
Mg ⁺⁺	7.105E+01	5.845E+00
Ca ⁺⁺	2.225E+02	1.110E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	1.110E+01	3.131E-01
SO ₄ ⁻⁻	5.805E+02	1.209E+01
HCO ₃ ⁻	4.764E+02	7.809E+00

SampleID	11
Site	Les Esteraings
Date	17/03/1626
Aquifer geology	Carbonifère

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na ⁺	1.530E+02	6.655E+00
K +	1.063E+01	2.719E-01
Mg ⁺⁺	8.380E+01	6.894E+00
Ca ⁺⁺	1.470E+02	7.335E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl ⁻	1.007E+01	2.840E-01
SO ₄ ⁻⁻	7.912E+02	1.647E+01
HCO ₃ ⁻	7.453E+02	1.222E+01

SampleID	12
Site	Laval
Date	17/03/1626

Annexe 7

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	4.701E+02	2.045E+01
Mg++	1.132E+02	9.313E+00
Ca++	4.890E+02	2.440E+01

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.137E+01	3.207E-01
SO4--	2.126E+03	4.427E+01
HCO3-	5.523E+02	9.053E+00

 SampleID 13
 Site **Ste Barbe**
 Date 17/03/1626

Cations	(mg/l)	(meq/l)
Na+	1.557E+02	6.773E+00
Mg++	5.040E+01	4.146E+00
Ca++	9.630E+01	4.805E+00

Anions	(mg/l)	(meq/l)
Cl-	1.671E+01	4.713E-01
SO4--	4.432E+02	9.228E+00
HCO3-	4.804E+02	7.874E+00

Annexe 8 : Fichiers de données dans le modèle :**Tableau 32 : Fichier landcover.dbf associant une clé pour chaque type de végétation**

KEY	LANDCOVER
_100	Coniferous forest
_101	Broad-leaved forest
_102	Mixed forest
_103	Natural grassland
_106	Bare rocks
_107	Pastures
_108	Continuous urban fabric
_109	Discontinuous urban fabric
_111	Peatdogs
_112	Transitional woodland shrub
_113	Moors and heathland
_114	Complex cultivation
_115	Land principally occupied by agriculture
_116	Sparsely vegetated areas
_000	Brook

Tableau 33 : fichier catchm.dbf

Name	Area (m ²)	Perimeter (m)	Latitude (°)
Fontanes	4363000	14422	44

Tableau 34 : gw.dbf

ID	Slope	Area (m ²)	Perimeter (m)	Length (m)	Width (m)	GW body	D1	perméabilité (m/s)	S	Epaisseur (m)
1	NORD	1521458	5791	1773,00	900,00	NAPPE_NORD	R	0,0005	0,05	200
2	SUD	2844335	10454	3229,00	800,00	NAPPE_SUD	R	0,0005	0,05	200

Tableau 35 : slopes.dbf

ID	Slope	Area (m ²)	Perimeter (m)	Catchment
1	NORD	1521458,00	5791,00	Fontanes
1	SUD	2844335,00	10454,00	Fontanes

Tableau 36 : piezo.dbf

GW body	H1 (m)	H2 (m)	Coeff	X1	X2
NAPPE NORD	121	119	0,01	2700	5
NAPPE SUD	121	119	0,01	2700	5

Annexe 8

ID	Name	Area (m ²)	Perimeter (m)	AV storage	Dominate1	Length1	Dominate2	Length2	Gradients	Slope	Landcover	Code land	Infiltration rate
1	P1N	723310	5110,00	200,00	R	2960,00			50,00	NORD	Discontinuous urban fabric	_109	0,15
2	P2N	315440	3283,00	200,00	P1N	1140,00			46,00	NORD	Coniferous forest	_100	0,15
3	P3N	309340	3102,00	200,00	P1N	324,00	R	1471	52,00	NORD	Coniferous forest	_100	0,15
4	P4N	185410	2505,00	200,00	P3N	847,00			55,00	NORD	Mixed forest	_102	0,15
5	P1S	481740	4099,00	200,00	R	1246,00			55,00	SUD	Discontinuous urban fabric	_109	0,15
6	P2S	727320	4983,00	200,00	P1S	1412,00	R	1315	46,00	SUD	Coniferous forest	_100	0,15
7	P3S	115260	1846,00	200,00	P2S	130,00	R	260	53,00	SUD	Mixed forest	_102	0,15
8	P4S	482380	4717,00	200,00	R	500,00			52,00	SUD	Discontinuous urban fabric	_109	0,15
9	P5S	85730	1422,00	200,00	P4S	800,00			48,00	SUD	Mixed forest	_102	0,15
10	P6S	53180	943,00	200,00	P4S	414,00			48,00	SUD	Discontinuous urban fabric	_109	0,15
11	P7S	362380	3293,00	200,00	P9S	650,00			56,00	SUD	Deciduous forest	_101	0,15
12	P8S	156900	2360,00	200,00	P9S	600,00			56,00	SUD	Mixed forest	_102	0,15
13	P9S	95170	2563,00	200,00	R	100,00			29,17	SUD	Discontinuous urban fabric	_109	0,15
14	P10S	282480	2780,00	200,00	P9S	1190,00			28,54	SUD	Mixed forest	_102	0,15

Tableau 37 : parcel.dbf

Annexe 9 : Etapes du modèle

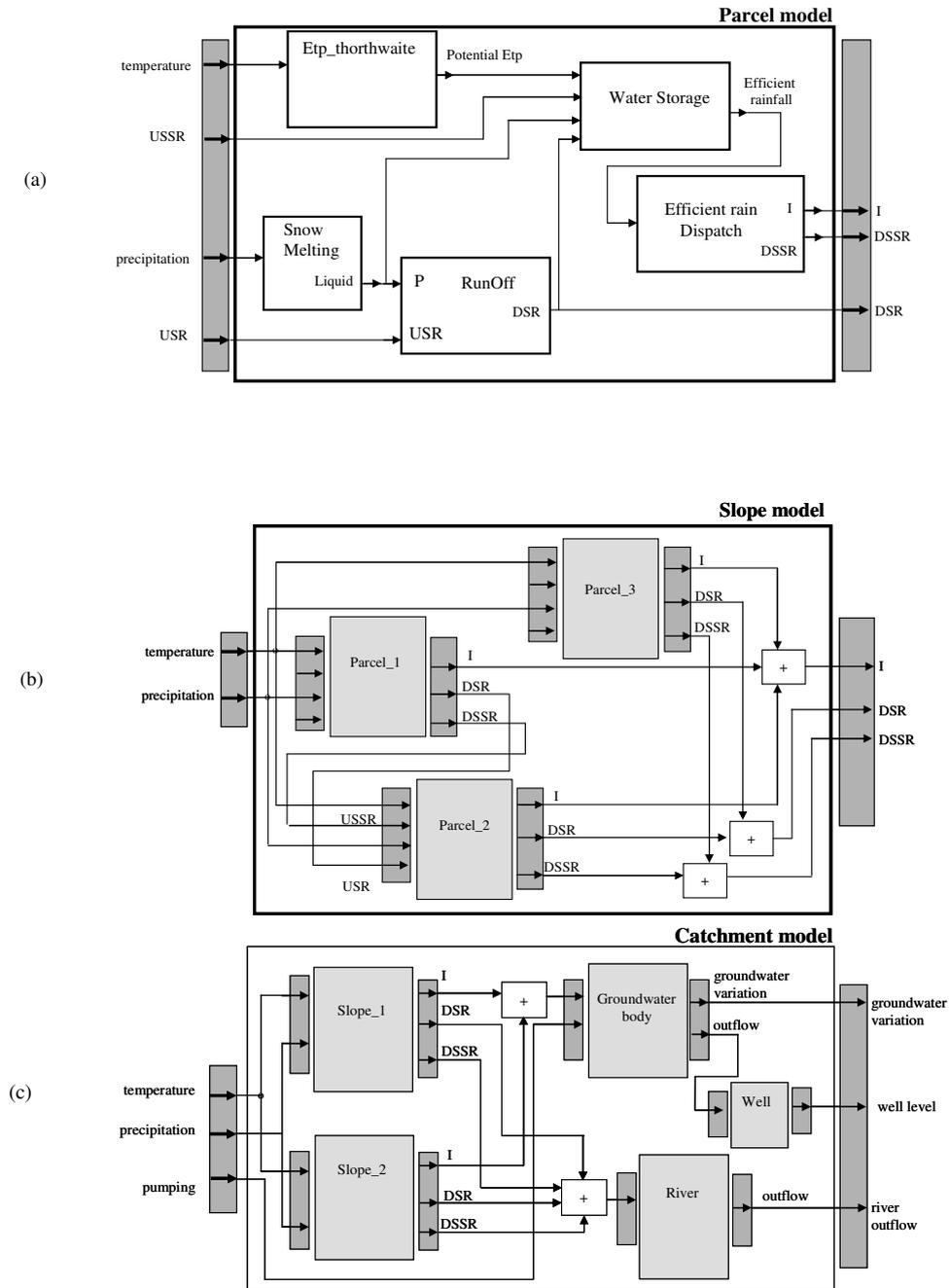


Figure 135 : Principales étapes constituant le modèle (a) modélisation des parcelles (b) modélisation des versants (c) modélisation du bassin versant total

Annexe 10 : Interfaces du modèle

Lorsque nous démarrons une nouvelle modélisation, la première fenêtre qui apparaît (Figure 136), propose le choix du type d'équation que nous voulons appliquer pour l'évapotranspiration. Nous choisirons Thornthwaite pour l'ensemble de nos simulations car il s'agit de la mieux adaptée à notre étude.

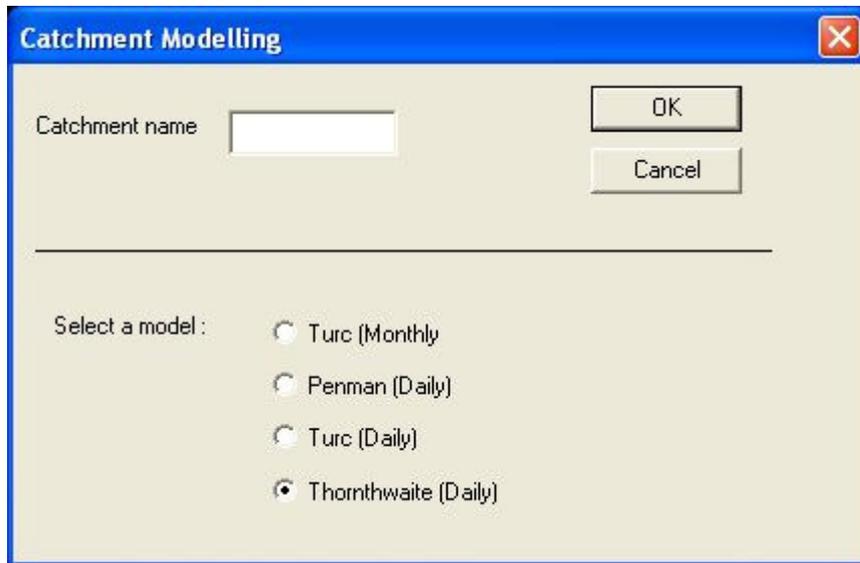


Figure 136 : Première fenêtre d'interface pour le choix de l'équation de l'ETR

La deuxième fenêtre (Figure 137) qui apparaît permet d'ajuster l'ensemble des paramètres possible avec les boutons 'parcel parameters' et 'slope, Groundwater and Well parameters'. La zone 'climatic data file' sert à choisir les données relatives à l'année qui sera simulée.

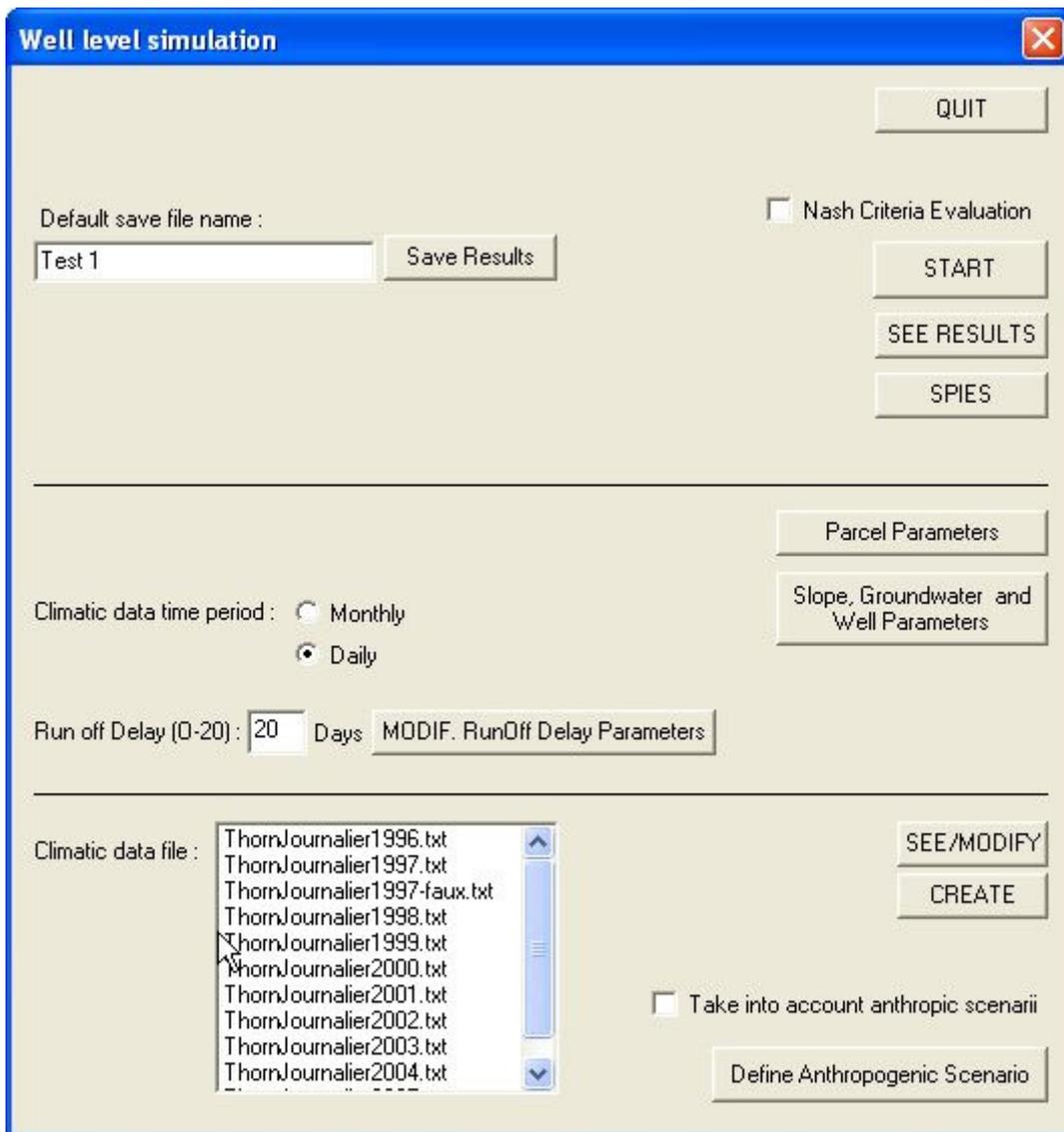


Figure 137 : Fenêtre permettant d'accéder aux choix des fichiers climatiques et aux boutons de réglages des paramètres

Pour exemple, voici la fenêtre qui apparait lorsque nous cliquons sur 'slope, Groundwater and Well parameters', la modification des paramètres s'effectue pour l'ensemble des parcelles, des versants. Si les paramètres à ajuster sont différents pour chaque parcelle et nappe, il faut utiliser le bouton 'parcel parameters'.

La fenêtre suivante (Figure 138) apparait et l'ensemble des valeurs dans les cases blanches sont modifiables.

Catchment Parameters ✖

VALIDATE

EXIT

Parcel : * Name

* Hillslope:

* Area : m²

* Available storage : mm

* Efficient rain dispatching rate of infiltration: [0 1]

* Runoff coefficient : [0 1]

* Dominated parcels P95 %
 %
 %

Groundwater body: * Name

* Length: m * Dominated Groundwater Bodies:

* Width: m %

* Permeability: m/s %

* piezo min: m %

* piezo max: m

Figure 138 : Fenêtre permettant des modifications sur les nappes et les parcelles unitaires

Annexe 11: Les différents types de géothermie

A11 – 1 - Haute énergie :

Elle s'applique pour des températures comprises entre 150 et 300°C. La vapeur produite permet de faire fonctionner des turbines pour créer de l'électricité et le captage se fait pour des profondeurs comprises entre 1500 et 3000 mètres.

A11 – 2 - Moyenne énergie

La température des eaux pour ce type de géothermie est comprise entre 80 et 150°C à une profondeur inférieure à 1 000 mètres (dans les régions à fort gradient géothermique) ou dans les bassins sédimentaires entre 2000 et 4000 mètres de profondeur.

A11 – 3 - Basse énergie

La température de l'eau est inférieure à 90 °C. Cette géothermie est notamment utilisée pour le chauffage de logement et d'installation indépendante.

Annexe 12 : Les types de géothermie et les pompes

A12 – 1 - Forage profond à très haute énergie

Les forages utilisés sont profonds et cette profondeur dépend de la température recherchée et du gradient géothermique local (en moyenne 4°C par 100 m) (site de wikipédia).

Le système mis en place n'utilise pas de fluide caloporteur contrairement à la géothermie basse température.

Géothermie haute énergie

La température est supérieure à 150°C et la production d'électricité se fait directement grâce à une pression assez importante pour² actionner des turbines.

A12 – 2 - Géothermie moyenne énergie

La température de l'eau est comprise entre 100 et 150 °C et la méthode utilise un fluide intermédiaire pour produire l'électricité.

A12 – 3 - Les types de pompes

Plusieurs types de pompes sont utilisables et toutes doivent être immergées en profondeur (entre -100 et -400 mètres).

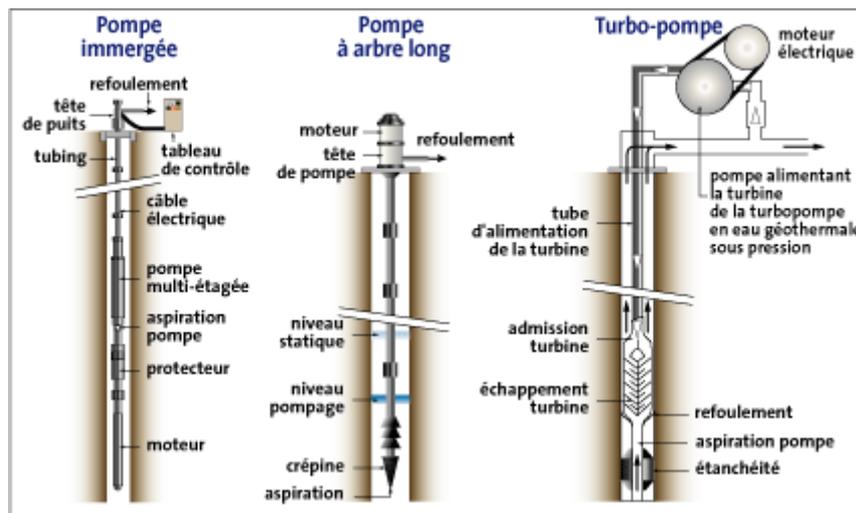


Figure 139 : Les différents types de pompe (BRGM, 2004)

L'installation des forages peut se faire selon différentes méthodes :

- forage unique : un ou plusieurs forages de pompage sans forage de réinjection
- doublet : un ou plusieurs forages de pompage de réinjection
 - o Doublet non réversible : chaque forage fonctionne toujours en pompage ou en injection
 - o Doublet réversible : chaque forage fonctionne alternativement en pompage et injection

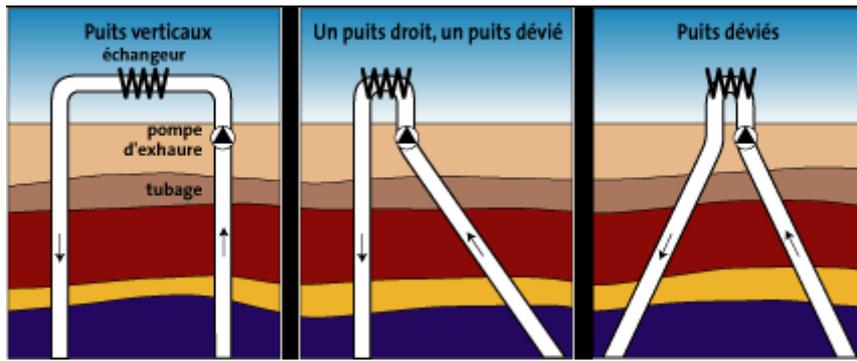


Figure 140 : Les différents doublets géothermiques (BRGM, 2004)

Dans le cas des doublets géothermiques, l'eau est réinjectée dans le réservoir dans le but de préserver la ressource. Il faut éviter que cette eau réinjectée vienne nuire à la pérennité du système géothermique compte tenu du fait qu'elle est plus froide.

Annexe 13: Etudes de Dominguez énergie

_ Puissance frigorifique = 1036,2 kW
 _ Puissance calorifique = 1287,5 kW
 _ Puissance électrique absorbée, consommée = 257,5 kW

_ Coefficient de performance froid = 4,02
 _ Coefficient de performance chaud = 5
 _ Temps de fonctionnement = 8000 h/an

_ Côté condenseur (Exhaure)

Entrée eau (°C) = 43
 Sortie eau (°C) = 48
 Débit d'eau (m3/h) = 222,4

_ Côté évaporateur (vers utilisation)

Entrée eau (°C) = 20
 Sortie eau (°C) = 15
 Débit d'eau (m3/h) = 178,7

_ Consommation correspondante

$$C = 0,2575 \times 8000 = 2\,060,00 \text{ kWh/an}$$

$$= 2,06 \text{ MWh/an}$$